

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

**О.В. ЧЕКМАРЕВА**

# **ВВЕДЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННУЮ ЭКОЛОГИЮ**

Рекомендовано Ученым советом государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности 280201.65 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов»

Оренбург 2008

**ББК 20.1я73**  
**УДК 502.1(075.8)**  
**Ч-37**

Рецензент  
доцент, кандидат технических наук В.И. Федорченко

**Чекмарева О.В.**  
**Ч-37      Введение в промышленную экологию: учебное пособие /**  
**О.В. Чекмарева – Оренбург: ОГУ ОГУ, 2008. – 116 с.**

В учебном пособии рассматриваются определение и основные принципы промышленной экологии, безотходные и малоотходные производства, принципы их организации. Приведены эффективные технологические процессы и основная аппаратура для очистки газовых выбросов от примесей различной природы. Даны методы эколого-экономических оценок и нормирования, управления экологизацией предприятий.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 280201.65 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов»

**ББК 20.1я73**

© Чекмарева О.В. 2008  
© ГОУ ОГУ, 2008

## Содержание

Введение.....	7
1 Предмет промышленной экологии.....	8
1.1 Основные понятия, термины, определения.....	8
1.2 Источники техногенного загрязнения биосферы в системе техносфера – атмосфера – литосфера – гидросфера.....	10
1.3 Техногенный круговорот веществ.....	15
1.4 Оценка жизненного цикла.....	16
1.5 Контрольные вопросы.....	20
2 Рациональное природопользование.....	20
2.1 Пути снижения вредного антропогенного воздействия .....	20
2.2 Системный подход к природопользованию.....	23
2.3 Безотходные или чистые производства .....	33
2.4 Учет нормирования нагрузки на окружающую среду при организации мало- и безотходного производства.....	37
2.5 Экологическая оценка влияния промышленности на природу.....	39
2.6 Контрольные вопросы.....	40
3 Методы очистки и обезвреживания отходящих газов .....	40
3.1 Основные принципы выбора метода очистки.....	40
3.2 Классификация методов и аппаратов для обезвреживания.....	42
3.3 Контрольные вопросы.....	49
4 Очистка отходящих газов от аэрозолей .....	49
4.1 Основные свойства пылей.....	49
4.2 Очистка газов в сухих механических пылеуловителях.....	53
4.3 Очистка газов в фильтрах.....	60
4.4 Очистка газов в мокрых пылеуловителях.....	67
4.5 Рекуперация пылей .....	69
4.6 Контрольные вопросы.....	72
5 Очистка промышленных газов от газообразных .....	72
5.1 Очистка топочных газов от диоксида серы.....	72
5.2 Очистка отходящих газов от оксидов азота .....	78
5.3 Снижение выбросов оксидов азота в атмосферу путем регулирования процесса горения .....	82
5.4 Очистка отходящих газов от оксида углерода и углеводородов .....	84
5.5 Очистка отходящих газов от галогенов и их соединений.....	85
5.6 Очистка отходящих газов от сероводорода и сероорганических соединений .....	88
5.7 Улавливание туманов .....	90
5.8 Очистка отходящих газов от паров летучих растворителей.....	91
5.9 Контрольные вопросы.....	94
6 Дезодорация и обеззараживание газо-воздушных выбросов .....	95
6.1 Методы и устройства для дезодорация и обеззараживание.....	95
6.2 Контрольные вопросы.....	99
7 Эколого-экономическая эффективность мероприятий по защите воздушного бассейна .....	99
7.1 Экономический ущерб от загрязнения атмосферы.....	99
7.2 Платежи за выбросы загрязняющих веществ.....	101
7.3 Экономическая оценка эффективности природоохранных мероприятий... ..	104
7.4 Контрольные вопросы.....	110

Заключение.....	111
Список использованных источников.....	112
Приложение А.....	113
Приложение Б.....	114
Приложение В.....	116
Приложение Г.....	118

## Введение

Потребление ресурсов давно уже вышло за пределы возможностей окружающей нас природы, возможности же утилизировать, непрерывно растущие потоки отходов крайне ограничены.

Количество отходов не просто растет; они становятся все более качественно не совместимыми с природными процессами: эти процессы не способны разложить и усвоить многие материалы, совершенно чуждые природным деструкторам — в основном микроорганизмам.

Человек должен думать об этом заранее, закладывая в будущее отходы производственной и потребительской деятельности такие свойства, которые позволят природе достаточно хорошо справляться с ними и не отравят биосферу веществами и процессами, опасными для живых организмов.

Настало время выстроить новый тип отношений с окружающей нас природной средой: с потребительского и эксплуататорского предстоит перейти на паритетный и партнерский тип отношений, а это очень трудно, поскольку для этого нужно перешагнуть через самих себя, отказаться от многих расточительных привычек, перейти на разумно достаточный уровень материального потребления.

Большое значение в решении стоящих перед человечеством проблем, прежде всего технического и технологического плана, имеют методы и средства промышленной экологии.

Промышленная экология - это самостоятельная наука, изучающая влияние промышленной деятельности на биосферу.

При изучении курса особое внимание уделяется характеристике вредных веществ и основным методам и аппаратам, применяемым для борьбы с ними, созданию технологий малоотходных и безотходных производств.

Изучение промышленной экологии способствует выработке у молодых экологов активной жизненной позиции.

# 1 Предмет промышленной экологии

## 1.1 Основные понятия, термины, определения

**Экология** – наука, изучающая закономерности взаимоотношений между организмами и окружающей средой на всех уровнях организации с учетом воздействия человека.

В настоящее время существует много прикладных ответвлений экологии: инженерная экология, медицинская экология, социальная экология, промышленная экология и т.д. Каждое из этих ответвлений решает определенный круг проблем. Одной из самых важных проблем на сегодняшний день является вопрос **экологической безопасности**.

Экологическая безопасность трактуется как любая деятельность человека, исключающая вредное воздействие на окружающую среду. Под экологической безопасностью понимают также положение, при котором путем правового нормирования, выполнения экологических, природозащитных и инженерно-технических требований достигается предотвращение или ограничение опасных для жизни и здоровья людей, разрушительных для народного хозяйства и окружающей среды последствий экологических катастроф.

В зависимости от вида антропогенного воздействия понятие экологическая безопасность может трансформироваться в широко применяемое на практике понятие химической безопасности.

**Химическая безопасность** - это совокупность определенных свойств объектов окружающей среды и создаваемых условий, при которых (с учетом экономических, социальных факторов и научно обоснованных допустимых дозовых нагрузок химических вредных веществ) удерживаются на разумно низком, минимально возможном уровне риска возникновения аварий на химически опасных объектах, прямое и косвенное воздействие этих веществ на окружающую среду и человека, и исключаются отдаленные последствия влияния химически вредных веществ для настоящего и последующих поколений.

Поддержание и обеспечение экологической (химической) обстановки на приемлемом уровне достигается целенаправленной деятельностью людей. Эта деятельность, выражающаяся в определенных мероприятиях, называется экологическим (химическим) обеспечением.

**Экологическое обеспечение** - это комплекс мероприятий организационно-технического, социально-экономического, правового регулирования и других, направленных на сохранение и восстановление качества природной среды, а также обеспечение высокого уровня жизни людей в процессе функционирования народно-хозяйственных, культурно-бытовых и других объектов и структур.

**Экологизация** - процесс неуклонного и последовательного внедрения систем технологических, управленческих и других решений, позволяющих повышать эффективность использования природных ресурсов и условий

наряду с улучшением или хотя бы сохранением качества природной среды на локальном, региональном и глобальном уровнях.

**Экологизация технологий (производств)** - мероприятия по предотвращению отрицательного воздействия производственных процессов на природную среду. Осуществляется путем разработки малоотходных (ресурсосберегающих) технологий, аппаратов и оборудования, дающих на выходе минимум вредных выбросов.

**Промышленная экология** изучает взаимосвязь промышленного производства со средой обитания человека и других живых организмов.

**Предметом** изучения промышленной экологии являются эколого-экономические системы.

**Эколого-экономические системы** включают человека, производство и среду обитания. Объединяет все объекты системы единая территория.

**Территория** – пространство, включающие в себя в совокупности человека, животных, растений воздух, воду, почву, промышленный объект и химически опасное вещество.

**Промышленный объект** (промышленное предприятие) выступает в качестве источника загрязнения среды, если концентрация примесей в среде больше ПДК. Предприятие – источник отходов, которые в свою очередь нормируются через ПДК. Количество отходов для воздуха ПДВ, для воды ПДС.

Если  $M < (ПДВ, ПДС)$  – предприятие природопользователь, при  $M > (ПДВ, ПДС)$  – предприятие загрязнитель.

**Химически опасное вещество** - это вещество, нормированное в среде по концентрации.

**Экологический кризис** – это та стадия взаимодействия между обществом и природой, на которой до предела обостряются противоречия между экономикой и экологией, т.е. между экономическими интересами общества, заключающиеся в потреблении и экологическими, заключающиеся в окружающей среде.

Если говорить в широком смысле понятие промышленной экологии включает в себя определение путей решения многочисленных и разноплановых экологических проблем.

**Цели промышленной экологии:**

- 1) решение проблем рационального использования природных ресурсов;
- 2) предотвращение (на первом этапе — ограничение) загрязнения окружающей среды;
- 3) совмещение техногенного и биогеохимического кругооборотов веществ.

**Задачи промышленной экологии:**

- 1) контроль загрязнения окружающей среды (и как высшая форма контроля — мониторинг);
- 2) анализ экологической ситуации (в широком понимании контроль включает в себя инвентаризацию материальных и энергетических ресурсов, качественную и количественную оценку влияния человека на окружающую

среду и поиск путей снижения отрицательного воздействия промышленности на окружающую среду);

- 3) определение отраслей-загрязнителей и источников загрязнения;
- 4) нахождение путей снижения вредных выбросов источниками загрязнения с учетом снижения материальных затрат на природоохранную деятельность;
- 5) прогнозирование последствий хозяйственной деятельности;
- 6) экологизация промышленных технологий;
- 7) очистка воздуха и воды;
- 8) решение проблем использования или захоронения твердых промышленных и бытовых отходов;
- 9) эколого-экономическая экспертиза технических решений.

Таким образом, основой промышленной экологии является системный подход с учетом всего многообразия технологических, экономических и др. связей между человеком, объектами хозяйственной деятельности и окружающей средой.

## **1.2 Источники техногенного загрязнения биосферы в системе техносфера – атмосфера – литосфера – гидросфера**

В атмосферу выбрасывается ежегодно 200 млн. т оксида углерода, 150 млн. т диоксида серы, 50 млн. т оксидов азота (в основном  $\text{NO}_2$ ), более 50 млн. т различных углеводородов и 20 млрд. т  $\text{CO}_2$ . За последние десятилетия потребление минеральных и органических сырьевых ресурсов резко возросло: в 1913 г. на одного жителя Земли ежегодно расходовалось 5 т минерального сырья, в 1940 г. - 7,4, в 1960 г. - 14,3, а в 21 веке потребление составляет 40-50 т. Соответственно возрастают и объемы отходов промышленного и коммунально-бытового происхождения [13].

Загрязнение биосферы - результат выбросов загрязняющих веществ или некоторых видов энергии (например, электромагнитные поля) из различных источников.

Загрязнители (контаминанты) могут иметь естественное (природное) и искусственное (антропогенное) происхождение. По своему физическому состоянию, например, загрязнители атмосферы делятся на твердые (пыли, дымы), жидкие (туманы), газообразные (газы, пары) и комбинированные. От общей массы выбрасываемых в атмосферу веществ газы (пары) составляют около 90 %.

К естественным источникам загрязнений относятся пыльные бури, вулканические извержения, газовые выделения из гейзеров и геотермальных источников, прижизненные выделения в атмосферу растений, животных, микроорганизмов и т.д.

Источники искусственного загрязнения - различные промышленные предприятия, коммунальное хозяйство, утечки из газохранилищ и трубопроводов и т.д. Классификация антропогенных видов загрязнения окружающей среды приведены в приложении В.

Источники загрязнения атмосферы выбросами могут быть классифицированы исходя из разных параметров.

По назначению:

- 1) технологические, содержащие хвостовые газы после установок улавливания (рекуперации, абсорбции и т.д.);
- 2) вентиляционные выбросы - местные отсосы, вытяжки.

По месту расположения:

- 1) незатененные или высокие (высокие трубы, точечные источники, удаляющие загрязнения на высоту, превышающую высоту здания в 2,5 и более раз);
- 2) затененные или низкие, то есть расположенные на высоте, в 2,5 раза меньшей высоты здания;
- 3) наземные - находящиеся у земной поверхности (открытое технологическое оборудование, проливы, колодцы производственной канализации и т.д.).

По геометрической форме:

- 1) точечные (трубы, шахты, вентиляторы);
- 2) линейные (аэрационные фонари, открытые окна, факелы).

По режиму работы:

- 1) непрерывного действия;
- 2) периодического действия;
- 3) залповые;
- 4) мгновенные.

Так, отвод доменного газа считается непрерывным, а отвод конвертерного газа — периодическим.

Залповые выбросы возможны при авариях, сжигании быстрогорящих отходов производства. При мгновенных выбросах загрязнения выбрасываются в доли секунды и часто на значительную высоту. Это возможно при взрывных работах и авариях.

По дальности распространения:

- 1) внутривысотные, то есть создающие высокие концентрации только на территории промышленной площадки, а в жилых районах не дающие ощутимых загрязнений (для таких выбросов предусматривается санитарно-защитная зона достаточных размеров);
- 2) вневысотные, когда выбрасываемые загрязнения способны создать высокие концентрации (порядка ПДК для воздуха населенных пунктов) на территории жилой застройки.

Кроме того, промышленные выбросы в окружающую среду могут классифицироваться и по другим признакам.

1. По организации контроля и отвода — на организованные и неорганизованные:

- организованный промышленный выброс — это выброс, поступающий в окружающую среду (воздушный и водный бассейны) через специально сооруженные газоходы, водоводы и трубы;

- неорганизованный промышленный выброс — это выброс в окружающую среду в виде неправильных самопроизвольных водных или газовых потоков, образующихся в результате несовершенства технологического оборудования или нарушения его герметичности, отсутствия или неудовлетворительной работы оборудования по отсосу газов или отводу загрязненной воды в местах загрузки и хранения сырья, материалов, отходов, готовой продукции, например, пыление отвалов пустой породы, нерегулируемый поверхностный сток промышленных предприятий.

2. По температуре — когда температура потока (газового, водяного или смешанного) выше, ниже или равна температуре окружающей среды.

3. По локализации — выбросы происходят в основном, вспомогательном, подсобном производствах, на транспорте и т.д.

4. По признакам очистки — на чистые, нормативно очищенные, частично очищенные, выбрасываемые без очистки. При этом под очисткой понимается отделение, улавливание и превращение в безвредное состояние загрязняющего вещества, поступающего от промышленного источника.

Атмосферные загрязнители подразделяются на первичные, поступающие непосредственно в атмосферу, и вторичные, являющиеся результатом их превращений. Например, поступающий в атмосферу диоксид серы окисляется кислородом воздуха до триоксида серы, который затем, взаимодействуя с водяными парами, образует капельки серной кислоты. При оценке загрязнения атмосферы учитывается период пребывания загрязняющих веществ в ней.

Основным элементом загрязнения атмосферы являются аэрозольные образования. Аэрозоли представляют собой дисперсную систему, в которой дисперсионной (сплошной) средой является газ, в частности, воздух, а дисперсионной фазой — твердые или жидкие частицы. Наиболее мелкие (тонкие) аэрозольные частицы по размерам близки к крупным молекулам, а для наиболее крупных наибольший размер (до 100..200 мкм) определяется их способностью более или менее длительное время находиться во взвешенном состоянии.

Различают дисперсионные и конденсационные аэрозоли. Дисперсионные аэрозоли образуются при измельчении (диспергировании) твердых и жидких веществ, конденсационные — при конденсации насыщенных паров, а также в результате газовых реакций. Дисперсионные частицы обычно значительно грубее, чем конденсационные, обладают большей полидисперсностью, имеют неправильную форму. Конденсационные аэрозоли имеют часто правильную шарообразную или кристаллическую форму и при коагуляции, сливаясь, снова получают шарообразную форму [10].

На практике часто приходится встречаться с аэрозолями, включающими частицы как дисперсионного, так и конденсационного происхождения, обычно ультрамикроскопического размера.

К аэрозолям относятся пыли, туманы и дымы.

Пыли представляют собой диспергированные вещества. Эта дисперсия может быть молекулярной и коллоидной до очень крупных размеров. Пылью

обычно также называют совокупность осевших частиц (гель или аэрогель). Размеры пылевых частиц колеблются в пределах от 1 до 500 мкм.

Туманы - газообразная среда с жидкими частицами как конденсационными, так и дисперсионными, независимо от их дисперсности.

Дымы - конденсационные аэрозоли с твердой дисперсной фазой или включающие частицы и твердые, и жидкие.

Пыль может быть классифицирована по нескольким признакам, в том числе по своему происхождению, т. е. по материалу, из которого она образована.

В зависимости от происхождения различают пыль естественного происхождения и промышленную пыль.

Пыль естественного происхождения образуется в результате процессов, не связанных непосредственно с процессом производства, хотя во многих случаях имеется взаимосвязь между этим видом пылеобразования и хозяйственной деятельностью человека. К пыли естественного происхождения относят пыль, образующуюся в результате эрозии почвы, а также пыль, возникающую при выветривании горных пород, пыль космического происхождения и т. д. Естественное происхождение имеют органические пылевидные частицы - пыльца, споры растений. К образующейся в результате эрозии почвы, обветривания горных пород и т. п. близка по составу пыль, возникающая при выветривании строительных конструкций, дорог и других сооружений. С пылью естественного происхождения приходится сталкиваться, главным образом, при решении вопросов очистки приточного воздуха перед поступлением его в вентилируемые помещения [10].

Промышленная пыль возникает в процессе производства. Почти каждому виду производства, каждому материалу или виду сырья сопутствует определенный вид пыли. Многие технологические процессы направлены на получение различных материалов, состоящих из мелких частиц, например цемента, строительного гипса, муки и т. д. Совокупность этих частиц правильно называть пылевидным материалом. Большая часть видов пыли возникает в результате процессов, связанных с обработкой материалов (резание, шлифование и т. п.), их сортировкой и транспортированием (погрузка, разгрузка и т. п.).

В зависимости от материала, из которого пыль образована, она может быть органической и неорганической.

Органическая пыль бывает растительного (древесная, хлопковая, мучная, табачная, чайная и т. д.) и животного (шерстяная, костяная и др.) происхождения.

Неорганическая пыль подразделяется на минеральную (кварцевая, цементная и др.) и металлическую (стальная, чугунная, медная, алюминиевая и др.).

Значительная часть промышленных пылей - смешанного происхождения, т. е. состоит из частиц неорганических и органических или, будучи органической, включает в себя частицы минеральной и металлической пыли.

Все вредные вещества (ВВ) по степени воздействия на организм человека подразделяют на четыре класса опасности:

- 1) вещества чрезвычайно опасные, ПДК менее 0,1 мг/м<sup>3</sup>;
- 2) вещества высокоопасные, ПДК 0,1-1 мг/м<sup>3</sup>;
- 3) вещества умеренно опасные, ПДК 1,1-10 мг/м<sup>3</sup>;
- 4) вещества мало опасные, ПДК более 10 мг/м<sup>3</sup>.

Сточные воды, содержащие растворенные и взвешенные вещества, отводящиеся (отходящие) в гидросферу или литосферу, рассматриваются как сбросы. Сбросы разделяются на неорганизованные, если они стекают в водный объект непосредственно с территории промышленного предприятия, не оборудованного специальной, например, ливневой канализацией или иными устройствами для сбора. А также на организованные, если они отводятся через специально сооруженные источники - водовыпуски. Выпуски классифицируются по следующим признакам: по типу водоема или водотока; по месту расположения выпуска; по конструкции распределительной части; по конструкции оголовка или сбросного устройства.

Большую опасность представляет биологическое накопление и аккумуляция загрязняющих жидких веществ, выбрасываемых предприятиями. В городских сточных водах (смеси бытовых и производственных) содержатся минеральные (глина, песок, окалина, сажа, сульфаты, хлориды, соли тяжелых металлов и т.д.) и органические (белковые вещества, углеводы, жиры, масла, нефтепродукты, синтетические ПАВ и т.д.) загрязнения. Биогенные элементы - соединения азота и фосфора находятся в сточных водах в органической и неорганической форме [4].

Все перечисленные загрязнения могут находиться в грубодисперсном (оседающем под действием силы тяжести), коллоидном и растворенном состояниях. Большая часть органических загрязнений городских сточных вод находится в грубодисперсном (15-20 %) и коллоидном (50-60 %) состоянии.

По степени загрязнения и происхождению сточные воды можно разделить на следующие группы:

- 1) загрязненные; представляющие собой смесь отработанных жидкостей после технологических процессов, а также после мытья оборудования и полов (75-80 %);
- 2) условно-чистые воды от охлаждения оборудования, компрессорных и холодильных установок, вентиляционных устройств и т.д. (6-18 %);
- 3) хозяйственно-фекальные (5-6 %);
- 4) ливневые воды от мытья территории, автотранспорта и т.д. (2-3 %).

Твердые отходы представляют собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава: черные и цветные металлы, макулатуросодержащие и текстильные компоненты, отходы стекла, пластмассы, кожи, резины, дерева, камней, а также остатки непрореагировавшего твердого сырья, смолы, кубовые остатки от перегонки, различные осадки и шламы, отработанные катализаторы, фильтровальные материалы, адсорбенты, не подлежащие регенерации, общезаводской мусор и др. На удаление таких отходов производства затрачивается в среднем 8-10% стоимости производимой продукции.

Для складирования твердых отходов московских предприятий ежегодно в Московской области выделяется 20 га земли. Транспортирование и складирование отходов ежегодно поглощает миллиарды рублей.

Условно предприятия можно разделить на три группы, учитывая их потенциальные возможности загрязнения биосферы. К первой группе относятся предприятия с преобладанием химических технологических процессов. Ко второй группе - предприятия с преобладанием механических (машиностроительных) технологических процессов. К третьей группе - предприятия, на которых осуществляется как добыча, так и химическая переработка сырья.

Предприятия химической промышленности - I группа. Они отличаются разнообразием токсичных газовых выбросов и жидких стоков. Главные из них - органические растворители, амины, альдегиды, хлор и его производные, оксиды азота, циановодород, фториды, сернистые соединения (диоксид серы, сероводород, сероуглерод), металлоорганические соединения, соединения фосфора, мышьяка, ртуть.

К предприятиям механического профиля (II группа) относится металлургия, т.е. те производства, которые включают заготовительные и кузнечно-прессовые цеха, цеха термической и механической обработки металлов, цеха покрытий. Они также выделяют значительное количество газов, жидких стоков и твердых отходов.

Нефтегазовые, горнодобывающие объекты и теплоэнергетику условно относят к предприятиям III группы. При нефтегазовом строительстве основным источником техногенных воздействий является опорно-двигательная часть машин, механизмов и транспорта. Они разрушают почворастительный покров любого типа за 1-2 прохода или проезда. На этих же этапах происходит максимальное физико-химическое загрязнение почв, грунтов, поверхностных вод горюче-смазочными материалами, твердыми отходами, бытовыми стоками и др. Плановые потери добытой нефти составляют в среднем 50 %.

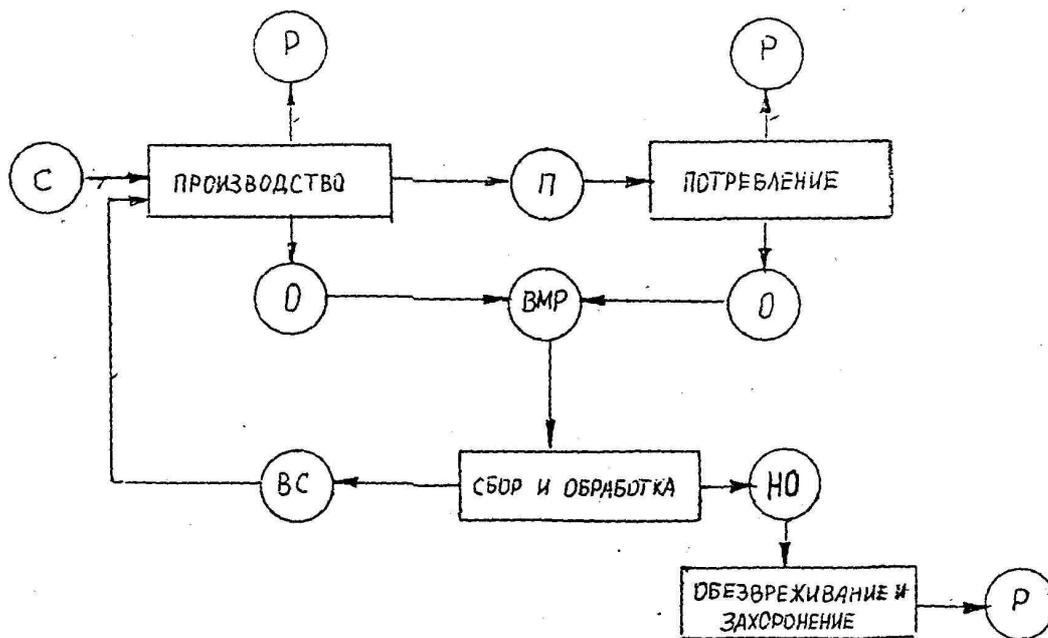
К промежуточной комбинированной группе предприятий (I + II + III гр.) относится муниципальное производство и объекты коммунально-городского хозяйства. Современные города выбрасывают в атмосферу и гидросферу около 1000 химических соединений.

### **1.3 Техногенный круговорот веществ**

Техногенный круговорот вещества - это включение в круговорот веществ не свойственных данной природной среде ни в количественном, ни в качественном отношении техногенных элементов (рисунок 1.1) [14].

Отходы производства - остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, образовавшиеся при производстве продукции и утратившие полностью или частично исходные потребительские свойства.

Вторичные материальные ресурсы (ВМР) - сумма отходов производства и отходов потребления.



С - первичное сырье; П - продукция; Р - рассеивание в окружающей среде; О - отходы; ВМР - вторичные материальные ресурсы; ВС - вторичное сырье; НО – не утилизируемые отходы

Рисунок 1.1 Техногенный круговорот вещества

Отходы потребления - изделия и материалы, утратившие свои потребительские свойства в результате физического или морального износа.

Вторичное сырье - ВМР, которые в настоящее время могут повторно использоваться в народном хозяйстве.

Неутилизируемые отходы - та часть ВМР, для которой в настоящее время отсутствуют условия использования.

#### 1.4 Оценка жизненного цикла

Производственный процесс — это последовательность операций, разработанная для достижения определенного технологического результата. Как и продукты, производственные процессы также имеют жизненный цикл, хотя отличаются их составляющие. Жизненные стадии процесса охватывают три периода (рисунок 1.2): обеспечение ресурсами и осуществление процесса возникают одновременно; первичные и вторичные операции процесса также возникают одновременно; починка, рециклирование и размещение — стадии конца жизни [7].

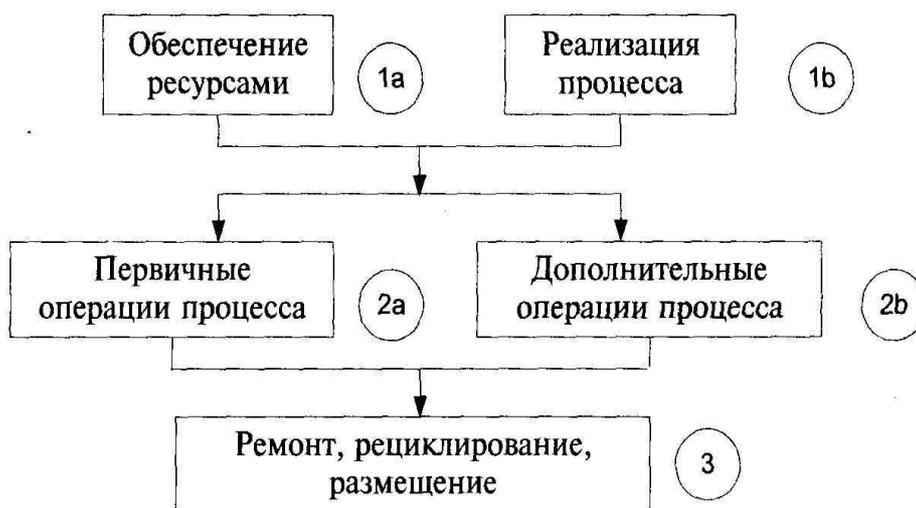


Рисунок 1.2 Стадии жизненного цикла производственного процесса

**Обеспечение ресурсами.** Первая стадия жизненного цикла любого процесса - обеспечение материалами для производства ресурсов, используемых на протяжении жизни оцениваемого процесса.

**Реализация процесса.** Главным образом это включает производство и установку оборудования процесса, трубопроводов, конвейерных лент, выхлопных труб и т.п.

**Первичные операции.** Процесс должен быть разработан так, чтобы его функционирование было экологически ответственным. В таком процессе в идеале было бы ограничено использование опасных материалов, минимизировано потребление энергии, исключено или минимизировано образование твердых, жидких или газообразных отходов и обеспечено использование любых произведенных отходов в других секторах экономики.

**Дополнительные операции.** Часто дело обстоит так, что несколько производственных процессов образуют символическую связь, и каждый из них предполагает существование остальных и зависит от него.

**Ремонт, рециклирование и размещение.** Все оборудование процесса, в конце концов, станет непригодным. Поэтому оно должно быть разработано так, чтобы оптимизировать его разборку и повторное использование либо модулей (предпочтительный вариант), либо материалов. В этом смысле к оборудованию процесса предъявляются такие же требования и рекомендуются такие же действия, как и к любому продукту: использование быстроразъемных частей оборудования, идентификационная маркировка пластика и так далее.

Центральный принцип промышленной экологии — оценка жизненного цикла.

Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) — это объективный процесс подсчета экологических воздействий, связанных с продуктом, процессом или деятельностью, путем подсчета и определения использованных энергии, материалов и выбросов в окружающую среду, и подсчета, реализации возможностей по введению в действие экологических улучшений. Оценка включает полный жизненный цикл продукта, процесса или вида деятельности, охватывая добычу и переработку сырья, производство, транспортировку и распределение, использование, повторное использование, обслуживание, рециклирование и конечное размещение.

Оценка жизненного цикла может быть крупной и сложной задачей и иметь много вариантов. Тем не менее, существуют общие три стадии:

- 1) определение цели и масштаба;
- 2) инвентаризация выбросов;
- 3) анализ воздействия.

При этом за каждой стадией следует интерпретация результатов (рисунок 1.3). Стрелки на рисунке обозначают основные потоки информации.

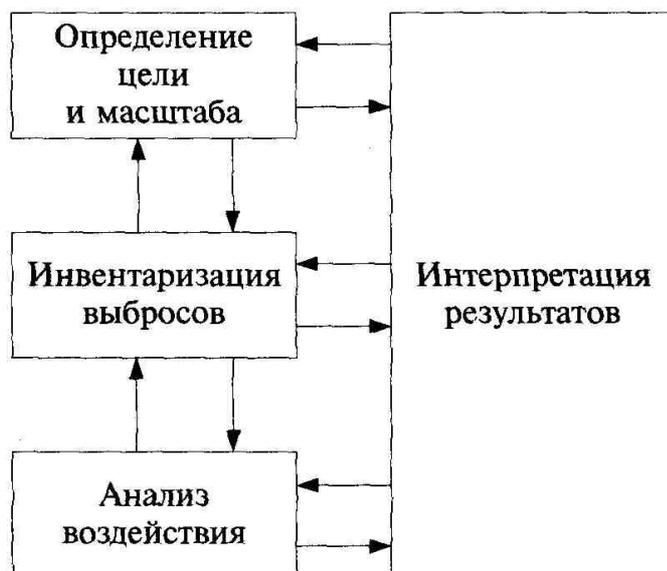


Рисунок 1.3 Стадии оценки жизненного цикла технологической деятельности

Сначала определяются цель и масштаб ОЖЦ, затем проводятся инвентаризация выбросов и анализ воздействия. Интерпретация результатов на каждой стадии стимулирует анализ возможных улучшений (которые могут в качестве обратной связи воздействовать на каждый из этапов, так что весь процесс носит итеративный характер). Наконец, выпускается руководство по проектированию с учетом требований окружающей среды.

Возможно для начала оценки ОЖЦ нет более важного шага, чем точное определение масштаба оценки: какие материалы, процессы или продукты должны рассматриваться и насколько широко будут определены альтернати-

вы? Следует также оценить ресурсы, которые можно использовать для проведения анализа

Вторая составляющая ОЖЦ — инвентаризационный анализ, несомненно, разработан лучше всего. Он использует количественные данные для определения уровней и типов энергии и материалов, используемых в промышленной системе, и соответствующих выбросов в окружающую среду (рисунок 1.4).

Третья стадия ОЖЦ, анализ воздействия, включает сопоставление выбросов системы и воздействий на внешний мир, в который эти выбросы попадают или, по крайней мере, нагрузок, оказываемых на внешний мир.

Фаза интерпретации результатов заключается в том, что на основании данных, полученных на предыдущих этапах, делаются выводы и даются рекомендации. На этом этапе часто получают объяснение потребностей и возможностей сокращения воздействия на окружающую среду в результате осуществляемой или предполагаемой промышленной деятельности.



Рисунок 1.4 Элементы инвентаризационного анализа жизненного цикла

## **1.5 Контрольные вопросы**

- 1 Дайте определение понятия «экологизация».
- 2 Что такое экологическая и химическая безопасность?
- 3 Дайте определение промышленной экологии как науке (цели и задачи).
- 4 Что включают в себя эколого-экономические системы?
- 5 Перечислите основные источники техногенного загрязнения биосферы.
- 6 Какие существуют классификации источников загрязнения атмосферы?
- 7 Что такое аэрозоли? Приведите примеры.
- 8 На какие группы можно разделить предприятия, учитывая их потенциальные возможности загрязнения биосферы?
- 9 Объясните, что такое техногенный круговорот веществ.
- 10 Что такое промышленный метаболизм?
- 11 Для чего необходима оценка жизненного цикла?
- 12 Дайте характеристику предприятия с позиции промышленного метаболизма.
- 13 Назовите показатели экологичности предприятия.

## **2 Рациональное природопользование**

### **2.1 Пути снижения вредного антропогенного воздействия промышленности на природу**

Существуют три основные причины, препятствующие образованию загрязнений в промышленности: политическая, экономическая и техническая.

В настоящее время основными направлениями промышленной экологии являются:

- 1) экологизация технологий;
- 2) создание малоотходных процессов;
- 3) очистка атмосферы и водных ресурсов от вредных примесей; переработка твердых отходов (или их захоронение);
- 4) использование экономических и правовых рычагов для охраны окружающей среды.

Для производства пищи, одежды и жилья необходимо переработать много сырья, сжечь много топлива. К сожалению, сделать это, не нанося ущерба окружающей среде, невозможно. В настоящее время только 2 % сырья переходит в необходимую для человека продукцию, все остальное превращается в отходы, некоторые из которых являются токсичными (опасными для здоровья) [5].

Однако пути снижения вредного антропогенного воздействия промышленности на природу существуют. Среди них в первую очередь можно назвать следующие:

- 1) совершенствование с точки зрения экологии существующих технологических процессов;
- 2) создание малоотходных (в идеале — безотходных) производств;
- 3) очистка вредных выбросов, отравляющих атмосферу, гидросистему и почву.

Наиболее простым и дешевым (хоть и не самым эффективным) является первый путь. Совершенствование существующих технологий должно проходить по всем направлениям производства, но главным образом это касается самого технологического процесса, аппаратуры, сырья, продукции и организации ее производства. Рассмотрим отдельно каждый из этих путей.

Совершенствование технологического процесса включает в себя:

1) комплексное использование сырьевых и энергетических ресурсов. Например, в нефтеперерабатывающем производстве нефть очищается от серы, и эта элементарная чистая сера, естественно, должна использоваться в химической промышленности;

2) что касается энергоресурсов, то, безусловно, целесообразно использовать тепло уходящих из печей газов в котлах-утилизаторах для получения горячей воды или пара (в зависимости от нужд предприятия, и не только технологических). Это приносит двойную экологическую пользу: снижает тепловое загрязнение атмосферы и косвенно уменьшает степень загрязнения окружающей среды за счет того, что для получения необходимого количества тепла и электроэнергии не требуется сжигать топливо с выбрасыванием в атмосферу  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$ ;

3) снижение количества стадий при проведении технологических процессов, так как на каждой стадии переработки сырья происходит его потеря и образуются отходы (чаще всего токсичные). Например, объединение при получении бензина нескольких процессов в одной ректификационной колонне приводит к экономии сырья и повышению экологичности процесса;

4) внедрение непрерывных процессов, позволяющее снижать расход сырья и тепла. Например, при использовании непрерывного процесса разлива стали, экономится более 30 % тепла, так как не требуется постоянно охлаждать и нагревать металлургические печи;

5) автоматизацию и компьютеризацию производственных процессов. Это позволяет проводить процесс в узких рамках оптимальных технологических параметров, что, с одной стороны, сводит к минимуму потери сырья и топлива, а с другой — обеспечивает безопасность производства. В частности, при переработке нефти работа вручную не только не эффективна, но и невозможна;

б) максимально возможную замену первичных материальных и энергетических ресурсов на вторичные.

Для усовершенствования аппаратуры используются:

1) разработка комбинированных аппаратов (например, многофункциональных ректификационных колонн). Это позволяет снизить расход материалов на их изготовление и экологизировать процесс;

2) уменьшение габаритных размеров аппаратов при увеличении их производительности за счет оптимизации технологического процесса. Такие аппараты занимают меньшую производственную площадь, что снижает расходы на строительство производственных зданий;

3) изготовление аппаратов повышенной герметичности, в частности, автоклавов (аппаратов, работающих под давлением). Во многих производствах (в том числе и при переработке нефти) утечка сырья и продукта недопустима, так как их возгорание может привести к экологической катастрофе. Даже небольшая протечка в сальниках насосов загрязняет почву вокруг технологических аппаратов;

4) внедрение в производство современных эффективных очистных сооружений;

5) применение новых конструкционных материалов, позволяющих увеличить срок службы аппаратов за счет снижения скорости коррозии и уменьшить их габаритные размеры и массу.

Усовершенствование сырья, материалов и энергоресурсов включает в себя:

1) научно-практическое обоснование качества ресурсов. Например, совсем не обязательно в производстве бензина применять питьевую воду, на очистку которой расходуется много средств. Ее можно заменить технической и при необходимости использовать многократно;

2) предварительную подготовку сырья и топлива. Это мероприятие удешевляет и улучшает технологический процесс, а также снижает его экологическую опасность (например, после извлечения серы из сырой нефти обессеривание мазута, подаваемого в котлы и печи, способствует резкому снижению выбросов  $SO_2$  в атмосферу);

3) замену высокотоксичных материалов (ртути, кадмия, свинца) на менее ядовитые (при производстве красителей, катализаторов, электролита);

4) замену привозного сырья на местное (например, добываемое попутно).

Усовершенствование готовой продукции включает в себя:

1) обеспечение безопасности продукции в соответствии с нормами;

2) увеличение срока службы продуктов производства;

3) обеспечение регенерации (восстановления) и утилизации продукции;

4) обеспечение удобства использования продукции.

В целях усовершенствования организации производства используются следующие меры:

1) экономия материальных и энергетических ресурсов за счет организационных средств (правильная организация работы смен, ликвидация простоев оборудования и т.д.);

- 2) устранение запланированных и незапланированных потерь сырья, материалов, энергоресурсов;
- 3) внедрение на предприятии новых, более совершенных процессов и аппаратов;
- 4) обеспечение экологического контроля качества сырья и продукции;
- 5) составление экологического паспорта предприятия;
- 6) осуществление постоянной отчетности перед экологическими службами;
- 7) проведение экологического контроля в масштабах предприятия в целях предупреждения чрезвычайных экологических ситуаций.

## **2.2 Системный подход к природопользованию**

Защита природной среды от негативного воздействия хозяйственной деятельности может и должна проводиться на различных уровнях: глобальном, государственном (национальном), территориальном, отраслевом, объектовом [8].

Глобальный уровень регламентации воздействия антропогенной деятельности на окружающую среду планеты осуществляется такими международными организациями, как ООН, ЮНЕСКО, Совет Европы и др. Сфера их деятельности заключается в разработке конвенций, договоров, соглашений и других документов, регламентирующих уровень воздействия хозяйственной деятельности государств на все структуры биосферы Земли, а также на ближайший космос.

Государственный (национальный) уровень. В данном случае рассматривается роль государства в сфере организации и управления природопользованием в стране.

Территориальный уровень экологической безопасности должен осуществляться в рамках территориально-административного деления государства (область, район, город).

Отраслевой уровень охраны окружающей среды осуществляется через отраслевые министерства, ведомства. В данном случае каждая отрасль должна иметь программу обеспечения экологической безопасности предприятий, планы технического перевооружения производств на основе использования энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования, комплексного использования природных ресурсов и т. п., которые разрабатываются исходя из действующего законодательства.

Объектовый уровень охраны окружающей среды является основным для обеспечения экологической безопасности страны. К объектам хозяйственной деятельности относятся предприятия, хозяйства, колхозы, совхозы, организации, учреждения, фирмы всех форм собственности.

Один из путей рационального природопользования это стандартизация. Стандартизация - это разработка и внедрение в практику научно обоснованных, обязательных для выполнения технических требований и норм (стандартов), регламентирующих человеческую деятельность по отношению к

окружающей среде. Стандарты качества окружающей среды устанавливают государственные органы (Госстандарт России, здравоохранения и другие министерства, комитеты, ведомства). Стандарты подразделяются на: национальные стандарты (ГОСТР), межгосударственные (ГОСТ) и стандарты организаций (СТО) ГОСТР 1.0-2004.

Для предотвращения (снижения) отрицательных последствий воздействия загрязняющих веществ на атмосферу, литосферу и гидросферу необходимо знать их предельные уровни, при которых обеспечивается нормальная жизнедеятельность. Основной величиной экологического нормирования качества природной среды является предельно допустимая концентрация (ПДК) вредного вещества (ВВ) или веществ в биосфере - воздухе, воде и почве.

В общем случае предельно допустимая концентрация примеси в атмосфере – это максимальная концентрация примеси в атмосфере, отнесенная к определенному времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного действия, включая отдаленные последствия, и окружающую среду в целом.

ПДК должны устанавливаться на основе различных токсикометрических оценок, с отдельным нормированием уровней загрязнения, например, воздуха, в рабочих зонах и в населенных пунктах. На рисунке 2.1 приведена классификация ПДК [4].



Рисунок 2.1 Классификация предельно допустимых концентраций

В настоящее время используются несколько видов ПДК: максимальная из разовых (ПДК<sub>мр</sub>), среднесуточная (ПДК<sub>сс</sub>), и предельно допустимая концентрация для воздуха рабочей зоны (ПДК<sub>рз</sub>).

Максимальная разовая ПДК – основная характеристика опасности вредного вещества. Она устанавливается для предупреждения рефлекторных

реакций у человека (ощущение запаха, световой чувствительности и др.) при кратковременном воздействии атмосферных примесей. Среднесуточная ПДК установлена для предупреждения общетоксического, канцерогенного, мутагенного и другого влияния вещества на организм человека.

ПДК ВВ в воздухе рабочей зоны - это концентрации, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 часов или другой продолжительности, но не более 41 часа в неделю, в течение всего рабочего стажа не могут вызвать заболеваний или отклонений здоровья человека, обнаруживаемых современными методами исследований, в процессе работы или неблагоприятных последствий у его потомства.

При одновременном содержании в воздухе рабочей зоны нескольких ВВ с концентрациями  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , обладающих однонаправленным действием, должно выполняться условие

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ПДК_n} \leq 1 \quad (2.1)$$

Если в воздухе содержатся ВВ, не обладающие однонаправленным действием, концентрация каждого из них не должна превышать ПДК. К ВВ однонаправленного действия, как правило, следует относить вещества, близкие по химическому строению и характеру биологического воздействия на организм человека. ПДК ВВ устанавливаются в зависимости от степени воздействия на организм человека.

На рисунке 2.2 представлена схема нормирования примесей ВВ в воздухе с учетом их переноса и рассеивания в атмосфере, а также токсикологических принципов.

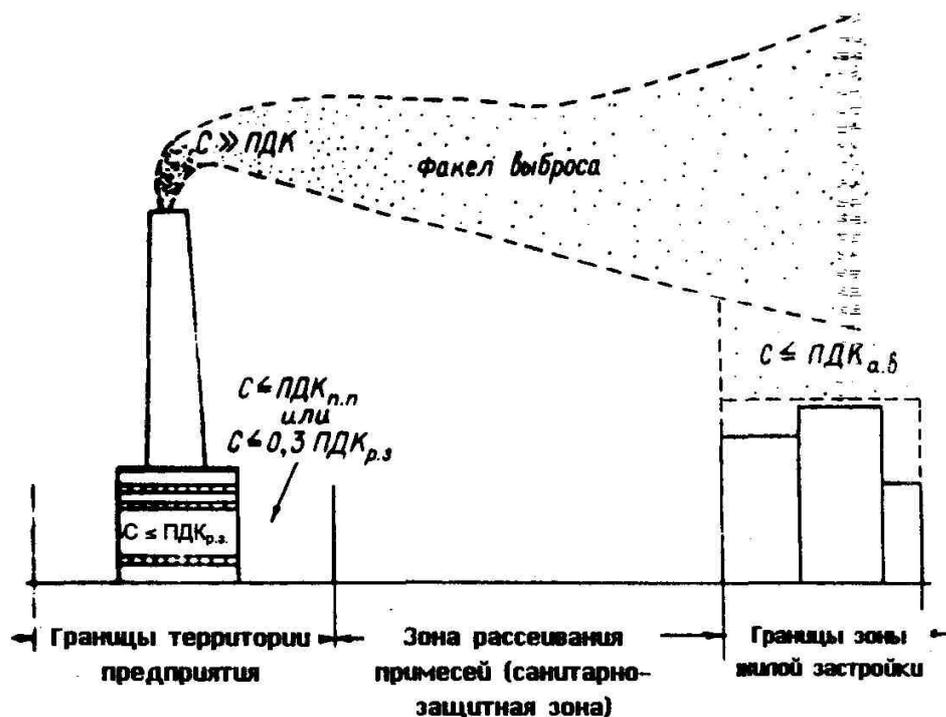


Рисунок 2.2 Схема нормирования примесей вредных веществ по зонам жизнедеятельности человека

Учитывая, что экологическая ниша человека неизменна, где бы он ни находился, условием экологической безопасности для него будет выполнение условия  $C_{\text{вв}} \leq \text{ПДК}$ , где  $C_{\text{вв}}$  - концентрация вредного вещества  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

Фактическое загрязнение атмосферы воздуха городов и населенных пунктов оценивается по 5-балльной шкале:

- I - допустимое загрязнение;
- II - умеренное;
- III - слабое;
- IV - сильное;
- V - очень сильное.

Загрязнение I степени является безопасным для здоровья населения. При загрязнении II—V степеней вероятность возникновения неблагоприятных эффектов возрастает с увеличением степени загрязнения

Для оценки состояния атмосферного воздуха также используются следующие показатели:

Разовая концентрация - это концентрация примеси в атмосфере, определяемая по пробе, отобранной за 20 - 30-минутный интервал времени.

Среднесуточная концентрация — это концентрация примеси в атмосфере, определяемая по среднесуточной пробе, которая представляет собой пробу воздуха, отбираемую в течение 24 ч непрерывно или с равными интервалами между отборами, но не менее 4 раз в сутки.

В некоторых случаях используют среднемесячные и среднегодовые концентрации примесей в атмосфере.

Среднемесячная концентрация - это концентрация примеси в атмосфере, определяемая как среднее значение из среднесуточных концентраций или из разовых концентраций, измеряемых по полной программе контроля (не реже 4 раз в сутки) не менее 20 суток в месяц.

Среднегодовая концентрация - это концентрация примеси в атмосфере, определяемая как среднее значение из среднесуточных концентраций или из разовых концентраций, измеряемых по полной программе контроля не менее 200 суток в год.

В качестве интегрального показателя загрязнения воздуха используют показатель  $P$ , который учитывает характер комбинированного действия вредных веществ и класс их опасности.

Суммарный показатель загрязнения атмосферы ( $P_i$ ) рассчитывается по формуле

$$P_i = \sqrt{\sum K_i^2} \quad (2.2)$$

где  $K_i = \frac{C_i}{ПДК_i}$ , ( $C_i$  - среднегодовая, среднемесячная или среднесуточная концентрация  $i$ -го вещества в атмосферном воздухе,  $мг/м^3$ ,  $ПДК_i$  - среднесуточная ПДК,  $мг/м^3$ ).

Для гигиенической оценки загрязнения воздуха можно применять комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), учитывающий классы опасности, стандарты качества и средние уровни загрязнения воздуха. Расчет ИЗА по данным наблюдений для одной примеси ведется по формуле

$$ИЗА_i = \left( \frac{q_{ccl}}{ПДК_{ccl}} \right)^{K_i} \quad (2.3)$$

где  $q_{ccl}$  - среднегодовая концентрация  $i$ -й примеси;

$ПДК_{ccl}$  - среднесуточная ПДК для  $i$ -й примеси,  $мг/м^3$ ;

$K_i$  - безразмерный показатель вредности  $i$ -го вещества

Комплексный ИЗА, учитывающий  $m$  примесей, присутствующих в атмосфере, рассчитывают по формуле

$$ИЗА_m = \sum_{i=1}^m \left( \frac{q_{ccl}}{ПДК_{ccl}} \right)^{K_i} \quad (2.4)$$

Выбор веществ для расчета  $ИЗА_m$  производится с помощью предварительного сопоставления убывающего вариационного ряда величин  $ИЗА_i$  рассчитанных для 5-6 приоритетных примесей.

Уровень загрязнения атмосферы считается высоким, если средние значения концентраций превышают средние, или ИЗА превышает 9; повышенным - если концентрации примеси в отдельных случаях превышают  $ПДК_{ccl}$  и  $ПДК_{mp}$  (максимальную из разовых); низким - если среднегодовые концентрации примеси находятся в пределах или ниже  $ПДК_{ccl}$ , максимальные из разо-

вых только в отдельных случаях превышают допустимые нормы.

Для характеристики склонности атмосферного воздуха промышленного города к загрязнению используется метеорологический потенциал рассеивающей способности атмосферы (МПА).

В качестве основных характеристик метеоусловий в нем использовали вероятность штиля ( $P_{ш}$ ), тумана ( $P_{т}$ ), осадков ( $P_{о}$ ) и ветреной погоды в городе. Совокупность этих характеристик позволяет оценить количественно МПА, который рассчитывается по формуле

$$\text{МПА} = \frac{P_{ш} + P_{т}}{P_{о} + P_{в}} \quad (2.5)$$

где  $P_{ш}$  - повторяемость скорости ветра; 0-1 м/с;

$P_{т}$  - повторяемость дней с туманами;

$P_{о}$  - повторяемость дней с осадками больше 0,05 мм;

$P_{в}$  - повторяемость скорости ветра,  $P_{в} > 6$  м/с.

Если значение МПА меньше 1, повторяемость процессов, способствующих самоочищению атмосферы преобладает над повторяемостью процессов, способствующих накоплению вредных примесей в ней. Создаются хорошие условия для рассеивания примесей в атмосфере. При  $\text{МПА} > 1$  условия неблагоприятные для рассеивания примесей, при  $\text{МПА} > 3$  создаются крайне неблагоприятные условия для рассеивания примесей.

Наиболее действенным инструментом в защите атмосферного воздуха от загрязнения вредными веществами является разработка и внедрение на всех крупных и средних предприятиях проекта тома предельно допустимых выбросов (ПДВ). ПДВ - это научно-технический норматив, устанавливаемый из условия, что содержание загрязняющих веществ в приземном слое воздуха (на высоте 1,5-2,5 м от поверхности земли) от источника или их совокупности не превышало норматива качества воздуха (ПДК) для населения, животного и растительного мира.

При установлении ПДВ для источника загрязнения атмосферы учитывают фоновые концентрации ВВ в воздухе  $C_{ф}$ , определяемые расчетом и экспериментально. Под фоновой концентрацией для отдельного источника загрязнения атмосферы понимают ее загрязнение, связанное с другими источниками, исключая рассматриваемый.

Если в воздухе городов или других населенных пунктов концентрация вредных веществ уже превышает ПДК, а значения ПДВ по объективным причинам не могут быть достигнуты, вводится поэтапное снижение выброса вредных веществ. В этом случае фактический выброс, превышающий ПДВ, называется временно согласованным (ВСВ). На каждом этапе устанавливают ВСВ на уровне аналогичных предприятий с передовой технологией. Нормативы ПДВ (в г/с) устанавливаются для каждого конкретного источника и для предприятия в целом (в т/год).

Для установления целесообразности и приоритетности разработки нормативов ПДВ рассчитывают категорию опасности предприятий (КОП) для окружающей среды по формуле

$$КОП = \sum_{i=1}^m КОВ_i = \sum_{i=1}^m \left( \frac{M_i}{ПДК_i} \right)^{\alpha_i}, \quad (2.6)$$

где  $m$  – количество загрязняющих веществ, выбрасываемых предприятием;

$КОВ_i$  – категория опасности  $i$ -го вещества,  $м^3/с$ ;

$M_i$  – масса выбросов  $i$ -ой примеси в атмосферу,  $мг/с$ ;

$ПДК_i$  – среднесуточная ПДК  $i$ -го вещества в атмосфере населенного пункта,  $мг/м^3$ ;

$\alpha_i$  – безразмерная константа, позволяющая соотнести степень вредности  $i$ -го вещества с вредностью диоксида серы (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Значения коэффициента  $\alpha_i$  для разного класса опасности загрязняющих веществ

Класс опасности вещества	Значения $\alpha_i$
1	1,7
2	1,3
3	1,0
4	0,9

Значения КОП рассчитывают при условии, когда  $\frac{M_i}{ПДК_i} > 1$ . При  $\frac{M_i}{ПДК_i} < 1$  значения КОП не рассчитываются и приравниваются к нулю.

Для расчета КОП при отсутствии  $ПДК_{сс}$  используют значения  $ПДК_{мр}$ , ОБУВ или уменьшенные в 10 раз значения предельно допустимых концентраций рабочей зоны. Для веществ, по которым отсутствует информация о ПДК или ОБУВ, значения КОП приравнивают к массе выбросов данных веществ.

Предприятия по величине категории опасности делят на четыре категории. Граничные условия для деления предприятий на категории опасности приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Граничные условия для деления предприятий по категории опасности

Категория опасности предприятия	Значения КОП
I	$\geq 31,7 \cdot 10^6$
II	$\geq 31,7 \cdot 10^4$
III	$\geq 31,7 \cdot 10^3$
IV	$< 31,7 \cdot 10^3$

Предприятия 1-й и 2-й категории представляют собой наибольшую опасность для окружающей среды, к ним необходимо применять особые требования при разработке нормативов ПДВ (ВСВ) и ежегодном контроле за их достижением. Для этих предприятий тома ПДВ разрабатываются по полной программе.

Предприятия 3-й категории опасности, как правило, самые многочисленные, и они могут иметь тома ПДВ, разработанные по сокращенной программе. Контроль источников выбросов на таких предприятиях проводится выборочно, один раз в несколько лет.

К 4-й категории опасности относят самые мелкие предприятия с небольшим количеством выбросов вредных веществ в атмосферу. Для таких предприятий устанавливают нормативы ПДВ на уровне фактических выбросов. Эти предприятия могут отчитываться о выбросах не ежегодно, а один раз в три года при проведении очередной инвентаризации. Тома ПДВ для таких предприятий могут не составляться.

Для того, чтобы обеспечить научно-обоснованное управление качеством воздуха, необходима информация о выбросах вредных веществ, об уровнях загрязнения воздушной среды, их изменениях в течение короткого и длительного промежутков времени, а также о метеорологических условиях распространения примесей в атмосфере.

Лишь совместное рассмотрение этой информации позволит установить правильный диагноз состояния загрязнения воздушного бассейна и, главное, прогнозировать его на перспективу.

Для воздуха таким интегральным показателем может служить критерий качества атмосферы ( $K_{атм}$ ). При этом рассматривается система “атмосфера–территория”, основными элементами которой выступают источник, среда и условия распределения примесей:

1. Генератор (источник) примесей – производство, предприятие, выбрасывающее в атмосферу  $n$ -ое количество примесей.

2. Среда, в которую наблюдается диффузия примеси – атмосфера. Под атмосферой нами подразумевается ее приземный слой высотой 50–100 м ( $H=50\div 100$  м).

3. Метеоусловия, задающие механизм распределения примеси в атмосферном воздухе территории [15].

Критерий качества атмосферы ( $K_{атм}$ ) промышленного города будет определяться по формуле

$$K_{атм} = \frac{\sum_1^n \left( \frac{M_i}{ПДК_i} \right)^{\alpha_i}}{\sum_1^n \left( \frac{J_{полн}}{ПДК_i} \right)^{\alpha_i}} = \frac{КОГ}{КОТ} \quad (2.7)$$

где КОГ - категория опасности города, м<sup>3</sup>/с;

КОТ- категория опасности территории, м<sup>3</sup>/с.

КОТ представляет собой условный объем загрязненного воздуха, который разбавлен до санитарно-гигиенических нормативов и приведен к одной токсичности.

Категория опасности города (КОГ) оценивается как сумма категорий опасности предприятий (КОП), расположенных на территории или вблизи города и определяется по формуле

$$КОГ = \sum_{i=1}^n КОП_i = \sum_{i=1}^m КОВ_i, \quad (2.8)$$

где m - количество загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух данного города;

n – количество предприятий на территории или вблизи города.

Для объектов, являющихся источниками загрязнения атмосферного воздуха, должна быть организована санитарно-защитная зона (СЗЗ), ширина которой определяется классом размещаемого производства. Достаточность ширины санитарно-защитной зоны должна быть подтверждена расчетами прогнозируемых уровней загрязнения в соответствии с действующими указаниями по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, а также результатами лабораторных исследований атмосферного воздуха в районах размещения аналогичных действующих объектов.

В зависимости от характера и количества выбросов установлено пять классов предприятий с шириной санитарно-защитной зоны от 1000 до 50 м. Размер СЗЗ устанавливается:

а) для предприятий с технологическими процессами - источниками загрязнения атмосферного воздуха вредными и неприятнопахнущими веществами - непосредственно от источника загрязнения атмосферы, а также от мест загрузки сырья или открытых складов;

б) для тепловых электростанций, производственных и отопительных котельных - от дымовых труб.

В соответствии с санитарной классификацией предприятий, производств и объектов устанавливаются следующие размеры санитарно-защитной зоны, которые представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Размеры санитарно-защитной зоны

Класс предприятия	Расстояние, м
I	1000
II	500
III	300
IV	100
V	50

Расчетный размер СЗЗ, может быть определен (и соответственно изменен в сравнении с нормативным) по формуле

$$S = \sum_j^R \sum_i^n \left[ \frac{C_1}{ПДК_1} \cdot N_1 + \frac{C_2}{ПДК_2} \cdot N_2 + \frac{C_k}{ПДК_k} \cdot N_k \right] + \frac{C_\phi}{ПДК} \quad (2.9)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_k$  - расчетная приземная концентрация загрязняющих веществ характеризуемого производства;

$ПДК_1$ ,  $ПДК_2$ ,  $ПДК_k$  - ПДК данных веществ;

$\frac{C_\phi}{ПДК}$  - показатель фоновых концентраций;

$N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_k$  - переводные коэффициенты, зависящие от класса опасности вещества;

$R$  - число румбов для расчета показателя;

$J$  - номер румба;

$N$  - количество расчетных точек;

$i$  - одно из расчетных направлений от источника загрязнения (румб).

Санитарно-защитная зона для предприятий и объектов может быть увеличена по следующим причинам: использование неэффективных методов очистки выбросов в атмосферу; отсутствие эффективных способов очистки выбросов; необходимость размещения жилой зоны с подветренной стороны по отношению к предприятию, в зоне возможного загрязнения атмосферы; в зависимости от розы ветров и других неблагоприятных метеорологических условий (частые штили, туманы и др.); строительство новых, еще недостаточно изученных в санитарном отношении производств.

Санитарно-защитная зона или какая-либо ее часть не может рассматриваться как резервная территория предприятия и использоваться для расширения промышленной площадки.

Территория санитарно-защитной зоны должна быть озеленена и благоустроена. В санитарно-защитной зоне допускается размещать предприятия, их отдельные здания и сооружения с производствами меньшего класса вредности, чем производство, для которого установлена санитарно-защитная зона (при условии аналогичного характера вредности): пожарные депо, бани, прачечные, гаражи, склады, здания управления, конструкторских бюро, учебные заведения, магазины, предприятия общественного питания, поликлиники, научно-исследовательские лаборатории, связанные с обслуживанием данного

производства, помещения для дежурного персонала и охраны предприятия, стоянки общественного и индивидуального транспорта, коммуникации, линии электропередачи, нефте- и газопроводы, сооружения для подготовки технической воды и т. д.

Поэтому, мероприятия по защите атмосферного воздуха должны рассматриваться на предприятиях как составная часть общего плана по охране окружающей среды и включать две стадии: определение необходимости осуществления мероприятий по сокращению выбросов и снижению уровня загрязнения воздуха, а затем определение конкретного содержания мероприятий, обеспечивающих требования государственных стандартов. Мероприятия, направленные на снижение уровня загрязнения воздуха, нужно осуществлять, если в результате расчетов (для  $n$  источников) выполняются условия:

для атмосферного воздуха населенных пунктов

$$ПДК \leq \sum_{i=1}^n C_i + C_{\phi} \quad (2.10)$$

для воздуха промышленных площадок

$$0,3ПДК_{MP} \leq \sum_{i=1}^n C_i + C_{\phi} \quad (2.11)$$

После определения необходимости осуществления мероприятий по снижению уровня загрязнения воздуха должно быть разработано их конкретное содержание. Разработка мероприятий начинается с определения требуемой степени очистки выбросов по каждому источнику

$$\eta = \frac{M}{ПДВ} \cdot 100\% \quad (2.12)$$

где  $M$  - фактическое количество вредного вещества, выбрасываемого из источника.

### 2.3 Безотходные или чистые производства

Предприятие должно осуществлять организацию производства на базе безотходных технологий.

**Безотходная технология** - это такой способ производства продукции (процесс, предприятие, территориально-производственный комплекс), при котором наиболее рационально и комплексно используются сырье и энергия в цикле сырьевые ресурсы - производство - потребление - вторичные сырьевые ресурсы таким образом, что любые воздействия на окружающую среду не нарушают ее нормального функционирования».

**Под малоотходным** понимается такой способ производства продукции (процесс, предприятие, территориально-производственный комплекс), при котором вредное воздействие на окружающую среду не превышает уровня, допустимого санитарно-гигиеническими нормами; при этом по техническим, организационным, экономическим или другим причинам часть сырья и материалов переходит в отходы и направляется на длительное хранение или захоронение [11].

**«Чистое» производство** - производство, которое характеризуется непрерывным и полным применением к процессам и продуктам природоохранной стратегии, предотвращающей загрязнение окружающей среды таким образом, чтобы понизить риск для человечества и окружающей среды.

Применительно к процессам это рациональное использование сырья и энергии, исключение применения токсичных сырьевых материалов, уменьшение количества и степени токсичности всех выбросов и отходов, образующихся в процессе производства.

С точки зрения продукции чистое производство означает уменьшение ее воздействия на окружающую среду в течение всего жизненного цикла (продукта) от добычи сырья до утилизации (или обезвреживания) после использования.

Чистое производство обеспечивается путем улучшения технологии, применением новых эффективных процессов, а также путем изменения управления производством и утилизации побочных продуктов.

#### **Принципы разработки малоотходных технологий:**

1 Цикличность или многократность использования сырья. Реализация цикличности — это попытка человека подражать природе, в которой основным фактором является кругооборот веществ.

2 Максимальное потребление большинства компонентов сырья и потенциала энергетических ресурсов. К сожалению, использовать сырье и энергию целиком невозможно, поэтому не существует полностью безотходная технология, однако необходимо стремиться к ее возможно большей экологизации.

3 Соблюдение предприятием требований по предельно допустимой экологической нагрузке (ПДЭН) и ПДК вредных веществ, т. е. поддержание такого состояния окружающей среды, при котором антропогенное воздействие не вызывает ее отрицательных изменений.

Направления создания малоотходных производств подразделяются на технические и организационные [3].

Основные технические направления разработки и внедрения малоотходных технологий

1 Разработка и внедрение принципиально новых технологических процессов, реализация которых позволяет существенно уменьшить образование отходов.

2 Применение малоэнергоемких процессов (например, методов порошковой металлургии).

3 Использование высокоэффективных методов тепло- и массообмена (например, кипящего слоя в установках каталитического крекинга при переработке нефти).

4 Замена прямоточных потоков материалов и теплоносителей противоточными.

5 Внедрение технологии с использованием кислорода, водорода, озона и электроэнергии.

6 Использование эффекта сверхпроводимости, а также технологий с применением сверхвысоких давлений и температур.

7 Использование механических методов вместо химических процессов с применением кислот и щелочей.

8 Разработка высоких технологий, в частности плазменных и лазерных.

9 Внедрение современных мембранных, ионно-обменных, экстракционных методов выделения ценных (и токсичных) веществ.

10 Применение при разработке эффективных геотехнологических методов (например, подземное выщелачивание).

11 Внедрение безводных методов обогащения и переработки сырья.

12 Замена плавки руд и отходов гидрометаллургическими методами, так как воду проще очищать, чем газы.

13 Изготовление биоразлагаемой тары, например пакетов, которые в отличие от полиэтиленовой тары разлагаются в течение 3 — 5 лет.

Организационные направления внедрения малоотходных производств

1 Создание замкнутых водооборотных схем. При этом снижаются расходы на подготовку, потери воды в технологическом процессе и количество вредных выбросов. Осадки после очистки воды перерабатываются и используются в виде вторичного сырья.

2 Реализация многоразового использования материалов за счет организации циклических процессов. Это касается не только воды, и газов, и материалов. Примером может служить рациональное использование катализаторов.

3 Комбинирование производств при организации комплексно использования сырья, энергоресурсов и продукции производства.

4 Кооперация производств с учетом утилизации.

5 Научно-практическое обоснование района строительства производств с учетом фонового загрязнения окружающей среды, рекультивации почвы и возможности кооперации с другими производствами региона.

6 Создание малоотходных территориально-производственных Комплексов (ТПК) или эколого-промышленных парков. При этом отходы одного предприятия могут использоваться на другом предприятии, кроме того, решаются вопросы транспорта и рационального размещения жилых построек.

7 Рациональная организация производства. Это позволяет увеличить объем выпуска продукции, а также расширить ее номенклатуру и улучшить качество.

8 Организация региональных центров по переработке и обезвреживанию отходов производства и быта. Создание полигонов по захоронению твердых отходов является дорогостоящим мероприятием, однако извлечение из них полезных веществ позволяет снизить расходы на создание и эксплуатацию полигонов.

Количественным критерием малоотходного производства является **коэффициент безотходности ( $K_6$ )**, который характеризует полноту использования в производстве материальных и энергетических ресурсов, а также интенсивность воздействия этого производства на окружающую среду:

$$K_6 = A \cdot K_M \cdot K_3 \cdot K_a \quad (2.13)$$

где  $K_6$  – коэффициент безотходности, характеризующий полноту использования в производстве материальных и энергетических ресурсов, а также интенсивность воздействия этого производства на окружающую среду.

$A$  - коэффициент пропорциональности, определяемый эмпирически;  
 $K_M$  - коэффициент полноты использования материальных ресурсов;  
 $K_3$  - коэффициент полноты использования энергетических ресурсов;  
 $K_a$  - коэффициент соответствия экологическим требованиям.

$$K_M = \frac{P_o + \sum P_d}{M_{oo} + M_{eo} + \sum M_d} \quad (2.14)$$

где  $P_o$  – основная продукция;  
 $P_d$  – дополнительная продукция;  
 $M_{oo}$  – основное сырье и материалы основного производства;  
 $M_{eo}$  – вспомогательное сырье и материалы основного производства;  
 $M_d$  – дополнительное сырье и материалы.

$$K_3 = \frac{KПД_\phi}{KПД_m} \quad (2.15)$$

$$K_a = 1 + \frac{Y_d - Y_\phi}{Y_d + Y_\phi} \quad (2.16)$$

где  $Y_d$  – допустимый ущерб, который возникает в случае соответствия выбросов (сбросов) предельно допустимым, руб/год;

$Y_\phi$  – фактический ущерб, руб/год.

Для малоотходного производства значение коэффициента безотходности, равно 0,8-0,9, а для безотходного производства – 0,9-0,98.

В общем случае для оценки степени совершенства технологического процесса, учитывая взаимодействие с окружающей средой, за критерий безотходности принят коэффициент экологического действия.

$$k = \frac{B_m}{B_\phi} = \frac{B_m}{B_m + B_n} \quad (2.17)$$

где  $B_t$  - теоретическое воздействие, необходимое для производства;

$B_\phi$  - фактическое воздействие;

$B_n$  - воздействие, определяемое конкретным производством.

Если  $B_\phi \gg B_m$ , то  $K \rightarrow 0$ , то есть данное производство абсолютно не учитывает требований экологической безопасности. Чем выше значение коэффициента экологического воздействия  $K$ , тем более совершеннее производство с учетом воздействия на окружающую среду.

## 2.4 Учет нормирования нагрузки на окружающую среду при организации мало- и безотходного производства

При безотходном производстве рационально используются сырье и энергия и не оказываются вредного влияния на окружающее пространство. Экономический эффект в этом случае образуется за счет непосредственного возвращения сырья (отходов) в производство  $\mathcal{E}_{нв}$ , предотвращения социально-экономического ущерба от загрязнения окружающей среды  $\mathcal{E}_y$  и снижения затрат на добычу сырья  $\mathcal{E}_p$  по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{нв} + \mathcal{E}_y + \mathcal{E}_p \quad (2.18)$$

Непосредственный эффект от использования отходов производства определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{нв} = Z \cdot n \cdot f \cdot \mathcal{Z}_n \quad (2.19)$$

где  $Z$  - замыкающие затраты на данный вид продукции;

$n$  - количество используемых отходов;

$f$  - коэффициент, учитывающий количественное соотношение отходов и исходного сырья;

$\mathcal{Z}_n$  - приведенные затраты на вовлечение отходов в производственный цикл.

$$\mathcal{E}_y = Y_v - Y_\phi \quad (2.20)$$

где  $Y_v$  - возможный ущерб при отсутствии природоохранных мероприятий, выраженных в стоимостной форме;

$Y_\phi$  - фактический ущерб, выраженный в стоимостной форме и существующий в данное время.

Региональный эффект  $\mathcal{E}_p$  может быть предоставлен в виде снижения приведенных затрат на единицу продукции за счет использования отходов производства.

Социально-экономический эффект безотходных производств определяется по комплексному критерию

$$\eta = \frac{\sum_{l=1}^n \mathcal{E}_l - Y}{Z_n} \rightarrow \max \quad (2.21)$$

где  $Y$  - ущерб от загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления;

$Z_n$  - полные затраты на осуществление безотходного производства.

$\sum_{l=1}^n \mathcal{E}_l$  - сумма всех эффектов, достигаемых при внедрении безотходного производства, которая определяется по формуле

$$\sum_{l=1}^n \mathcal{E}_l = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_5 \quad (2.22)$$

где  $\mathcal{E}_1$  - эффект от производства конечной продукции, полученной при внедрении безотходного производства и более полного использования исходного сырья;

$\mathcal{E}_2$  - эффект от потребления конечной продукции, полученной при внедрении безотходного производства и более полного использования исходного сырья;

$\mathcal{E}_3$  - экономия затрат на разведку, добычу и транспортировку отдельного ресурса;

$\mathcal{E}_4$  - эффект от комплексного развития региона и совершенствования размещения производственных сил;

$\mathcal{E}_5$  - внешнеторговый эффект (сокращение импорта или рост экспорта сырья, продуктов переработки, конечного продукта).

При наличии ряда вариантов безотходного производства должен быть выбран вариант с наибольшим коэффициентом абсолютной социально-экономической эффективности при равных или близких по значению народно-хозяйственных затратах (независимо от агрегатного состояния отходов: газ, жидкость, твердое, комбинированное) [4].

## 2.5 Экологическая оценка влияния промышленности на природу

Существуют нормы абсолютного количества вредных веществ на 1 т готовой продукции [4]. В качестве критерия оценки можно рекомендовать индекс относительной токсичности массы (ОТМ), который определяется по формуле

$$I_o = \frac{ПДК_I}{ПДК_j} \quad (2.23)$$

где  $ПДК_I$  и  $ПДК_j$  - предельно допустимые концентрации вещества, соответственно принятого за эталон и сравниваемого (эталонные  $ПДК_I$  - 1 мг/л для воды и 0,01 мг/м<sup>3</sup> для воздуха).

ОТМ выбросов определяется с учетом объемов единичного, группового и суммарного выбросов. Общий баланс ОТМ технологического процесса равен

$$\sum (M_c + M_e) - \sum M_n - \sum M_p = 0 \quad (2.24)$$

где  $M_c$  - масса отходов, поступающих в окружающую среду со сточными водами;

$M_e$  - масса отходов, поступающих в окружающую среду с газовыми выбросами;

$\sum M_n$  - масса нейтрализованных отходов;

$\sum M_p$  - масса рассеянных отходов.

В качестве единицы ОТМ принята условная единица 1 етм, соответствующая загрязненности 1 м<sup>3</sup> природной или техногенной среды 1 кг ОТМ.

Оценивая уровень загрязнения окружающей среды, необходимо иметь в виду, что для одной природной сферы (атмосферы, гидросферы) на основании существующих санитарных норм обязательно соблюдение условия

$$\sum I_j \leq 1$$

Если в сточных водах, выпускаемых с предприятия в водоем, присутствуют одновременно загрязняющие вещества, относящиеся к различным группам по лимитирующим показателям вредности (санитарно-токсикологического - ст, токсикологического - т, общесанитарного - ос), следует вначале привести их к суммарным значениям ОТМ внутри каждой группы ( $M_{ст}$ ,  $M_t$ ,  $M_{ос}$ ), а затем к общей ОТМ

$$M_{общ}^e = \sum M_{cm} + \sum M_m + \sum M_{oc} \quad (2.25)$$

Сопоставление частных ОТМ в выбросах в водоем по группам вредности позволяет выявить, по каким именно веществам создается неблагоприятная обстановка в водоеме и требуется принятие мер. ОТМ каждой группы веществ, отнесенная к площади водосбора в единицу времени, представляет собой модуль химического стока в единицах ОТМ с площади  $F$  промышленной площадки

$$M_{xc} = \frac{M_{общ}^e}{F} \quad (2.26)$$

Который в сопоставлении с модулем естественно-ионного стока характеризует нагрузку на окружающую среду в исследуемом районе.

## **2.6 Контрольные вопросы**

1 Какие существуют пути снижения вредного антропогенного воздействия промышленности на природу?

2 На каких уровнях должна осуществляться защита природной среды от негативного воздействия хозяйственной деятельности?

3 Что такое комплексная оценка качества атмосферного воздуха?

4 Какие существуют критерии и параметры для оценки качества воздушной среды?

5 От чего зависит ширина санитарно-защитной зоны?

6 Что такое чистые, малоотходные и безотходные технологии?

7 Принципы разработки малоотходных технологий

8 Какие существуют основные направления создания малоотходных и безотходных производств?

9 Что является количественным критерием малоотходного и безотходного производства? Что он учитывает?

10 Как определяется экономический эффект при организации мало- и безотходного производства?

11 Каким образом осуществляется экологическая оценка влияния промышленности на природу?

## **3 Методы очистки и обезвреживания отходящих газов**

### **3.1 Основные принципы выбора метода очистки**

Каждое предприятие – это источник отходов, которые в свою очередь нормируются через предельно допустимое количество отходов. Для воздуха ПДВ, для воды ПДС. Поэтому при организации любого производства, и в особенности мало- или безотходного, необходимой стадией является промышленная и санитарная очистка газовоздушных выбросов.

**Очистка** - удаление (выделение, улавливание) примесей из различных сред.

**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, при этом технологическое оборудование связано друг с другом материальными потоками с соответствующей обвязкой аппаратов.

**Санитарная очистка** - это очистка газа от остаточного содержания в газе 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, и именно на этой стадии необходимо предусматривать возможность отбора проб газов с целью контроля их на содержание вредных примесей [1].

Выбор метода очистки отходящих газов зависит от конкретных условий производства и определяется рядом основных факторов:

- 1) объемом и температурой отходящих газов;
- 2) агрегатным состоянием и физико-химическими свойствами примесей;
- 3) концентрацией и составом примесей;
- 4) необходимостью рекуперации или возвращения их в технологический процесс;
- 5) капитальными и эксплуатационными затратами;
- 6) экологической обстановкой в регионе.

**Установки очистки газа** - это комплекс сооружений, оборудования и аппаратуры, предназначенный для отделения от поступающего из промышленного источника газа или превращения в безвредное состояние веществ, загрязняющих атмосферу.

В зависимости от агрегатного состояния улавливаемого или обезвреживаемого вещества установки подразделяются на газоочистные и пылеулавливающие.

**Аппарат очистки газа** - элемент установки, в котором непосредственно осуществляется избирательный процесс улавливания или обезвреживания веществ, загрязняющих атмосферу.

Основной величиной, характеризующей работу газоочистных установок в промышленных условиях, является степень очистки или эффективности работы газоочистного оборудования, которая определяется по формуле:

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} \cdot Q_1 - C_{\text{вых}} \cdot Q_2}{C_{\text{вх}} \cdot Q} \quad (3.1)$$

$$\eta = 1 - \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \quad (3.2)$$

где  $C_{\text{вх}}$ ,  $C_{\text{вых}}$  - средние концентрации примесей в отходящих газах до и после очистки соответственно, г/м<sup>3</sup>;

$Q_1$  и  $Q_2$  объемные расходы отходящих газов до и после очистки, приведенные к нормальным условиям, м<sup>3</sup>/ч.

Кроме того, газоочистное оборудование характеризуется величиной аэродинамического сопротивления, технологическими условиями очистки (температура, влажность газового потока, дисперсность и плотность пыли, способность ее к коагуляции и гидратации, заряд частиц пыли, физико-химические свойства примесей, пожаро- и взрывоопасность, объемный расход очищаемого газа и т. д.), металло- и энергоемкостью, расходом орошающей жидкости, себестоимостью очистки 100 м<sup>3</sup> газа и др.

Основные требования к эксплуатации газоочистного оборудования заключаются в следующем:

1) надежная, бесперебойная работа с показателями, соответствующими проектным;

2) все установки очистки газа должны быть зарегистрированы, иметь паспорт, журнал учета работы и неисправностей;

3) установки должны подвергаться проверке на эффективность периодически (не реже одного раза в год) с оформлением соответствующего акта, а также при работе технологического оборудования на измененном режиме более трех месяцев, при переходе его на новый постоянный режим работы и после строительства, капитального ремонта или реконструкции установки. Установки, предназначенные для очистки выбросов с токсичными примесями, проверяют на эффективность не реже 2 раз в год;

4) эксплуатация технологического оборудования при отключенных установках очистки газа запрещается;

5) увеличение производительности технологического оборудования без соответствующего наращивания мощности существующих установок очистки газа не разрешается;

6) при эксплуатации установок очистки газа, предназначенных для очистки газов с высоким содержанием горючих, взрывоопасных, агрессивных, абразивных веществ, следует строго соблюдать правила эксплуатации и следить за герметичностью оборудования и исправностью всех его систем и устройств.

### **3.2 Классификация методов и аппаратов для обезвреживания газовых выбросов от различных примесей**

Классификация основных методов и аппаратов для обезвреживания газовых выбросов от различных примесей представлена в приложении А.

Для обезвреживания аэрозолей (пылей и туманов) используют сухие, мокрые и электрические методы. Кроме того, аппараты отличаются друг от друга как по конструкции, так и по принципу осаждения взвешенных частиц. В основе работы сухих аппаратов лежат гравитационные, инерционные и центробежные механизмы осаждения или фильтрационные механизмы. В мо-

крых пылеуловителях осуществляется контакт запыленных газов с жидкостью. При этом осаждение происходит на капли, на поверхность газовых пузырей или на пленку жидкости. В электрофилтрах отделение заряженных частиц аэрозоля происходит на осадительных электродах.

Для обезвреживания отходящих газов от газообразных и парообразных токсичных веществ применяют следующие методы абсорбции (физической и хемосорбции), адсорбции, каталитические, термические, конденсации и компримирования.

**Абсорбция** - это процесс поглощения газов или паров из газовых или паровых смесей жидкими поглотителями - **абсорбентами**. Различают физическую и химическую абсорбцию. При **физической абсорбции** молекулы поглощаемого вещества (абсорбтива) не вступают с молекулами абсорбента в химическую реакцию. При этом над раствором существует определенное равновесное давление компонента. Процесс абсорбции проходит до тех пор, пока парциальное давление целевого компонента в газовой фазе выше равновесного давления над раствором.

При **химической абсорбции** (хемосорбция) молекулы абсорбтива вступают в химическое взаимодействие с активными компонентами абсорбента, образуя новое химическое соединение. При этом равновесное давление компонента над раствором ничтожно мало по сравнению с физической абсорбцией и возможно полное его извлечение из газовой среды.

Абсорбционные методы очистки отходящих газов подразделяют по следующим признакам:

- 1) по абсорбируемому компоненту;
- 2) по типу применяемого абсорбента;
- 3) по характеру процесса — с циркуляцией и без циркуляции газа;
- 4) по использованию абсорбента — с регенерацией и возвращением его в цикл (циклические) и без регенерации (не циклические);
- 5) по использованию улавливаемых компонентов — с рекуперацией и без рекуперации;
- 6) по типу рекуперированного продукта;
- 7) по организации процесса — периодические и непрерывные;
- 8) по конструктивным типам абсорбционной аппаратуры.

Процесс абсорбции является избирательным и обратимым. **Избирательность**-это поглощение конкретного целевого компонента (абсорбтива) из смеси при помощи абсорбента определенного типа. Процесс является обратимым, так как поглощенное вещество может быть снова извлечено из абсорбента (десорбция), а абсорбтив снова может быть использован в процессе.

Применяемые абсорбенты должны хорошо растворять извлекаемый газ, иметь минимальное давление паров, чтобы возможно меньше загрязнять очищаемый газ парами поглотителя, быть дешевым, не вызывать коррозию аппаратуры [2].

Для очистки газов от диоксида углерода в качестве абсорбентов используются вода, растворы этаноламинов, метанол.

Очистка от сероводорода осуществляется растворами этаноламинов, водными растворами  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  (с последующим окислением поглощенного  $\text{H}_2\text{S}$  кислородом воздуха с получением элементарной серы).

Для удаления оксида углерода его абсорбируют медно-аммиачными растворами.

Процесс абсорбции протекает на поверхности раздела фаз, поэтому абсорбер должен иметь возможно более развитую поверхность соприкосновения между жидкостью и газом. По способу образования этой поверхности абсорберы можно разделить на поверхностные, насадочные и барботажные. Поверхностные абсорберы малопроизводительны и используются для поглощения только хорошо растворимых газов. Наиболее распространенными универсальными видами являются насадочные абсорберы. Они имеют более развитую поверхность соприкосновения, просты по устройству, надежны. Их широко применяют для очистки газов от оксидов азота,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{Cl}_2$  и некоторых других веществ.

Более компактными, но и более сложными по устройству являются барботажные абсорберы, в которых газ барботируется через слой абсорбента, размещенного в колонне на тарелках.

Еще более совершенными являются пенные абсорберы. В этих аппаратах жидкость, взаимодействующая с газом, приводится в состояние пены, что обеспечивает большую поверхность контакта между абсорбентом и газом, а следовательно, и высокую эффективность очистки.

Удаление абсорбтива из абсорбента может осуществляться несколькими способами:

1) отгонкой в токе водяного пара или инертного газа в десорберах. При использовании инертного газа или воздуха в процессе последующее извлечение компонента из смеси затруднительно, поэтому этот способ применяют в тех случаях, когда компонент в дальнейшем не используется;

2) подогревом абсорбента; для этого к десорберу подводят глухой пар и при повышении температуры из абсорбента выделяется абсорбтив; если вместе с ним частично выделяются и пары абсорбента, то смесь разделяют ректификацией;

3) снижением давления над абсорбентом в десорбере; при этом в тех случаях, когда процесс абсорбции проводится под давлением выше атмосферного, десорбцию можно осуществлять при атмосферном давлении.

**Адсорбция** - основана на избирательном извлечении примесей из газа при помощи адсорбентов - твердых веществ с развитой поверхностью.

Целевой поглощаемый компонент, находящийся в очищаемом газе, называют адсорбтивом, этот же компонент в адсорбированном состоянии, т. е. поглощенное вещество в адсорбенте, - адсорбатом.

По характеру взаимодействия адсорбата с поверхностью различают физическую и химическую адсорбцию.

Физическая адсорбция обуславливается силами межмолекулярного взаимодействия (дисперсионный, ориентационный и индукционный эффекты). Межмолекулярные силы слабы, поэтому при физической адсорбции происходит лишь небольшая деформация адсорбированных частиц. Этот вид адсорбции — чисто физический процесс с энергией активации порядка 4... 12 кДж/моль. При физической адсорбции поглощаемые молекулы газов и паров удерживаются силами Ван-дер-Ваальса, при хемосорбции — химическими силами. При физической адсорбции взаимодействие молекул с поверхностью адсорбента определяется сравнительно слабыми силами (дисперсными, индукционными, ориентационными). Для физической адсорбции характерна высокая скорость, малая прочность связи между поверхностью адсорбента и адсорбтивом, малая теплота адсорбции (до 60 кДж/моль).

Химическая адсорбция (хемосорбция) осуществляется за счет ненасыщенных валентных сил поверхностного слоя. При этом могут образовываться поверхностные химические соединения, свойства и строение которых еще мало изучены. Известно только, что они отличны от свойств объемных соединений.

Адсорбционные явления развиваются на границе твердой или жидкой фазы с другой жидкой фазой или газом.

При прохождении потока газа через слой адсорбента (рисунок 3.1) сначала участвует в работе лишь нижний слой высотой  $h_0$ , который быстро насыщается до состояния, близкого к равновесному. В этом слое начальная концентрация извлекаемого вещества снижается до нуля (работающий слой или зона массопередачи).

Концентрация загрязнителя по мере прохождения отбросных газов через следующие слои адсорбента понижается по некоторому закону, выраженному графически кривой 1, и на определенной высоте  $h_1$  становится равной нулю. Далее через слой чистого адсорбента высотой  $(H - h_1)$  фильтруется чистый газ. Через определенное время волна насыщения адсорбента доходит до высоты  $h_2$ , а отбросные газы полностью освобождаются от загрязнителя на высоте  $H$ , т. е. на выходе из слоя адсорбента (кривая 2). Процесс адсорбции прекращают, когда концентрация загрязнителя в отбросных газах на выходе из слоя достигает заранее заданной величины проскока  $\Pi$  (кривая 3). При этом волна насыщения адсорбента достигает высоты  $h_3$  и его направляют на регенерацию.

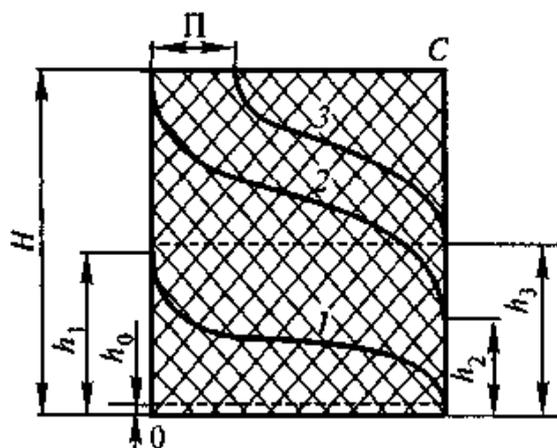


Рисунок 3.1 Механизм процесса адсорбции

При адсорбции может происходить проскок компонента, когда адсорбент перестает поглощать его. Под активностью адсорбента понимают его способность поглощать вещество. Адсорбенты характеризуются статической и динамической активностью [10].

Динамическая активность адсорбента — количество вещества, поглощенное единицей веса (объема) адсорбента за время от начала адсорбции до начала проскока.

Статическая активность адсорбента — количество вещества, поглощенное тем же количеством адсорбента за время от начала адсорбции до установления равновесия.

Динамическая активность всегда меньше статической, поэтому расход адсорбента определяется по его динамической активности. От активности адсорбента зависят размеры адсорбционной аппаратуры, эффективность очистки газов.

Процесс адсорбции в течение определенного времени протекает при постоянном значении степени поглощения адсорбируемого вещества. Это время называется временем защитного действия слоя адсорбента.

Промышленные адсорбенты изготавливают из твердых пористых материалов и используют в дробленном, гранулированном или порошкообразном виде.

Адсорбент должен иметь высокую сорбционную емкость, т. е. возможность поглощать большое количество адсорбтива при его малой концентрации в газовой среде, что зависит от удельной площади поверхности и физико-химических свойств поверхностных частиц. Адсорбционная емкость адсорбента зависит от его природы. Она возрастает с увеличением поверхности, пористости, со снижением размеров пор адсорбента, а также с повышением концентрации адсорбтива в газе-носителе и давления в системе. С увеличением температуры и влажности адсорбционная емкость адсорбентов снижается. Хорошие адсорбенты выдерживают несколько сотен и тысяч циклов адсорбция — десорбция без существенной потери активности.

Адсорбент должен иметь высокую селективность (избирательность) в отношении адсорбируемого компонента, обладать достаточной механической прочностью. Чтобы аэродинамическое сопротивление слоя было невысоким, плотность адсорбента должна быть небольшой, а форма частиц обтекаемой и создавать высокую порозность насыпки. Адсорбент для процесса физической сорбции должен быть химически инертным по отношению к компонентам очищаемой газовой среды, а для химической сорбции (хемосорбции) - вступать с молекулами загрязнителей в химическую реакцию. Для снижения затрат на десорбцию уловленных компонентов удерживающая способность адсорбента не должна быть слишком высокой, т. е. он должен иметь способность к регенерации. Адсорбенты должны иметь невысокую стоимость и изготавливаться из доступных материалов.

В качестве адсорбентов применяют в основном активные угли, силикагели, синтетические и природные цеолиты.

**Активные угли** представляют собой зернистые или порошкообразные углеродные адсорбенты, изготовленные по специальной технологии из каменного угля, торфа, полимеров, косточек кокосовых орехов, древесины и другого сырья. Для очистки газоздушных выбросов используют газовые и рекуперационные угли.

Газовые угли применяют для улавливания относительно плохо сорбирующихся веществ с небольшой концентрацией. Если же концентрация целевого компонента в газовом потоке значительна, то в этом случае необходимо использовать рекуперационные угли.

**Силикагели** являются минеральными адсорбентами с регулярной структурой пор (средний радиус пор  $0,8 \cdot 10^{-9} - 10^{-8}$  м). Они производятся двух типов: кусковые (зерна неправильной формы) и гранулированные (зерна сферической или овальной формы). Силикагели представляют собой твердые стекловидные или матовые зерна размером 0,2 - 7,0 мм, насыпной плотностью 400 - 900 кг/м<sup>3</sup>. Силикагели используют в основном для осушки воздуха, газов и поглощения паров полярных веществ, например метанола.

Близкими по свойствам к силикагелям являются **алюмогели** (активный оксид алюминия), которые выпускаются промышленностью в виде гранул цилиндрической формы (диаметром 2,5 - 5,0 мм и высотой 3,0 - 7,0 мм) и в виде шариков (со средним диаметром 3-4 мм). Алюмогели стойки к воздействию капельной влаги. Гидрофильный адсорбент с развитой пористой структурой. Используется, как и силикагель, для осушки газов и поглощения из них ряда полярных органических веществ.

**Цеолиты** (молекулярные сита) - это синтетические алюмосиликатные кристаллические вещества, обладающие большой поглотительной способностью и высокой избирательностью даже при весьма низком содержании определенного вещества (адсорбтива) в газе.

Универсальным адсорбентом, удовлетворительно работающим во влажных средах, является активированный уголь. Он удовлетворяет и большинству других требований, в связи с чем широко применяется. Одним

из основных недостатков активированного угля является химическая нестойкость к кислороду, особенно при повышенных температурах.

Адсорбцию осуществляют в основном в адсорберах периодического действия. Очищаемый газ проходит сверху вниз через слой адсорбента. Процесс поглощения адсорбтива начинается с верхнего слоя сорбента, затем фронт поглощения постепенно передвигается вниз, захватывая все его слои, и после исчерпания поглотительной способности всех слоев наступает «проскок» поглощаемого компонента, показывающий, что аппарат должен быть переключен на процесс десорбции.

Десорбцию ведут обычно острым паром, подаваемым снизу, который выносит из сорбента поглощенный им продукт (адсорбат) и поступает в холодильник-конденсатор, где продукт отделяется от воды.

Каталитические методы очистки основаны на химических превращениях токсичных компонентов в нетоксичные на поверхности твердых катализаторов. Очистке подвергаются газы, не содержащие пыли и катализаторных ядов. Методы используются для очистки газов от оксидов азота, серы, углерода и от органических примесей. Их проводят в реакторах различной конструкции.

В рекуперационной технике наряду с другими методами для улавливания паров летучих растворителей используют методы конденсации и компримирования.

В основе метода конденсации лежит явление уменьшения давления насыщенного пара растворителя при понижении температуры. Смесь паров растворителя с воздухом предварительно охлаждают в теплообменнике, а затем конденсируют. Достоинствами метода являются простота аппаратного оформления и эксплуатации рекуперационной установки. Однако проведение процесса очистки паровоздушных смесей методом конденсации сильно осложнено, поскольку содержание паров летучих растворителей в этих смесях обычно превышает нижний предел их взрываемости. К недостаткам метода относятся также высокие расходы холодильного агента и электроэнергии и низкий процент конденсации паров (выход) растворителей (обычно не превышает 70-90 %). Метод конденсации является рентабельным лишь при содержании паров растворителя в подвергаемом очистке потоке  $>100 \text{ г/м}^3$ , что существенно ограничивает область применения установок конденсационного типа.

Метод компримирования базируется на том же явлении, что и метод конденсации, но применительно к парам растворителей, находящимся под избыточным давлением. Однако метод компримирования более сложен в аппаратном оформлении, так как в схеме улавливания паров растворителей необходим компримирующий агрегат. Кроме того, он сохраняет все недостатки, присущие методу конденсации, и не обеспечивает возможность улавливания паров летучих растворителей при их низких концентрациях.

Термические методы (методы прямого сжигания) применяют для обезвреживания газов от легкоокисляемых токсичных, а также дурнопахнущих примесей. Методы основаны на сжигании горючих примесей в топках печей

или факельных горелках. Преимуществом метода является простота аппаратуры, универсальность использования. Недостатки: дополнительный расход топлива при сжигании низкоконцентрированных газов, а также необходимость дополнительной абсорбционной или адсорбционной очистки газов после сжигания.

Следует отметить, что сложный химический состав выбросов и высокие концентрации токсичных компонентов заранее определяют многоступенчатые схемы очистки, представляющие собой комбинацию разных методов.

### 3.3 Контрольные вопросы

- 1 Что такое очистка? Виды очистки.
- 2 От чего зависит выбор метода и аппарата для улавливания загрязняющих веществ?
- 3 Каковы основные требования к эксплуатации газоочистного оборудования?
- 4 Какие существуют основные методы и аппараты для очистки газовых выбросов от различных примесей?
- 5 Перечислите основные виды адсорбентов?
- 6 Дайте определение понятия абсорбция? Виды абсорбции.
- 7 Как может осуществляться десорбция?
- 8 Как определяется эффективность очистки?

## 4 Очистка отходящих газов от аэрозолей

### 4.1 Основные свойства пылей

**Плотность частиц.** Различают истинную, насыпную и кажущуюся плотность. Насыпная плотность (в отличие от истинной) учитывает воздушную прослойку между частицами пыли. При слеживании насыпная плотность возрастает в 1,2—1,5 раза.

Кажущаяся плотность представляет собой отношение массы частиц к занимаемому ею объему, включая поры, пустоты и неровности. Гладкие монокристаллические частицы имеют плотность, практически совпадающую с истинной. Пыли, склонные к коагулированию и спеканию, снижают кажущуюся плотность по отношению к истинной [2].

**Дисперсность частиц.** Размер частицы является основным ее параметром. Выбор пылеуловителя определяется дисперсным составом улавливаемой пыли.

Частицы промышленной пыли имеют различную форму (шарики, палочки, пластинки, иглы, чешуйки, волокна и т.д.). Частицы пыли могут коагулироваться и объединяться в агломераты, поэтому понятие размера частицы условно. В пылеулавливании принято характеризовать размер частицы величиной, определяющей скорость ее осаждения. Такой величиной служит се-

диффузионный диаметр — диаметр шара, скорость осаждения и плотность которого равны скорости осаждения и плотности частицы. При этом сама частица может иметь произвольную форму. Пылевые частицы различной формы при одной и той же массе оседают с разной скоростью. Чем ближе их форма к сферической, тем быстрее они оседают.

Наибольший и наименьший размеры частиц характеризуют диапазон дисперсности данной пыли. Для характеристики дисперсного состава пыли разбивают всю массу пылинок на некоторые фракции, ограниченные частицами определенного размера с указанием, какую долю в процентах по массе (или по числу частиц) они составляют.

Дисперсный состав пыли изображается в виде интегральных кривых.

**Адгезионные свойства частиц.** Эти свойства частиц определяют их склонность к слипаемости.

Аутогезия частиц — это связь между соприкасающимися частицами, которая препятствует их разъединению. Для нарушения этой связи необходимо внешнее воздействие.

Понятие «аутогезия» охватывает все виды и формы этого явления независимо от числа и свойств взаимодействующих частиц, природы сил, обуславливающих это взаимодействие, причин возникновения и условий, при которых оно имеет место.

Сыпучие материалы часто представляют собой смеси разнородных веществ. Поэтому понятие аутогезии включает взаимодействие частиц неодинаковой природы.

Аутогезии близки такие явления, как адгезия и когезия.

Адгезия частиц в отличие от аутогезии означает взаимодействие частиц и твердой поверхности макроскопических тел (стенок и рабочих органов технологических аппаратов и др.).

Когезия — это связь между молекулами (атомами, ионами), приводящая к образованию единого тела. При взаимодействии твердых тел когезия может возникать на участках непосредственного их соприкосновения.

Агломерацией называют процесс укрупнения измельченных руд. В металлургии под агломерацией понимают укрупнение частиц в результате спекания рудной мелочи.

Агрегация и агрегирование — это самопроизвольное укрупнение частиц сыпучего материала. Если твердые частицы находятся во взвешенном состоянии, то процесс укрупнения называют коагуляцией.

Сцеплением в механике грунтов и сыпучих тел называют предельное сопротивление сыпучего материала сдвигу при нулевом значении нагрузки, нормальной к плоскости скольжения. Сцепление, как и агрегация частиц, обусловлено аутогезией и представляет собой одну из форм ее проявления.

Материалы, обладающие сцеплением, называют связными. Если сцепление равно нулю, то сыпучий материал относят к несвязным.

Таким образом, понятие «аутогезия» используют для обозначения всего рассматриваемого явления в целом, а остальные термины относятся к отдельным его видам и формам проявления [12].

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 (таблица 4.1). В качестве показателя слипаемости применяют прочность пылевого слоя разрыва  $P$ , Па.

Таблица 4.1 Характеристика пыли по слипаемости

Характеристика пыли	Разрыв прочности слоя, Па	Вид пыли
Неслипающаяся	$P < 60$	Сухая шлаковая, кварцевая; сухая глина
Слабослипающаяся	$P = 60-300$	Коксовая; магнезитовая сухая; апатитовая сухая; доменная; колошниковая летучая зола, содержащая много несгоревших продуктов; сланцевая зола
Среднеслипающаяся	$P = 300-600$	Торфяная, влажная магнезитовая; металлическая, содержащая колчедан, оксиды свинца, цинка и олова, сухой цемент; летучая зола без недожига; торфяная зола; сажа, сухое молоко; мука, опилки
Сильнослипающаяся	$P > 600$	Цементная; выделенная из влажного воздуха; гипсовая и алебастровая; содержащая нитрофоску, двойной суперфосфат, клинкер, соли натрия; волокнистая (асбест, хлопок, шерсть)

Наличие схватывающихся пылей в составе загрязнителей указывает на возможность химических реакций между компонентами выбросов. Считают, что для влажной пыли степень ее слипаемости должна быть увеличена на один уровень. Слипаемость возрастает с уменьшением размера частиц.

Со слипаемостью тесно связана другая характеристика пыли — ее сыпучесть. Сыпучесть пыли оценивается по углу естественного откоса, который принимает пыль в свеженасыпанном состоянии.

**Абразивность частиц.** Абразивность пыли характеризует интенсивность износа металла при одинаковых скоростях газов и концентрациях пыли. Она зависит от твердости, формы, размера и плотности частиц. Абразивность учитывают при расчетах аппаратуры (выбор скорости газа, толщины стенок аппаратуры и облицовочных материалов).

**Коагуляция аэрозолей.** Аэрозоль - неустойчивая система. Он подвержен постоянным изменениям. С течением времени в аэрозоле происходит укрупнение взвешенных частиц. Этот процесс носит название коагуляции (агрегирования, агломерации); он происходит в результате взаимодействия

частиц под влиянием различного рода физических факторов. Параллельно с процессом образования агломератов происходит процесс разрушения образовавшихся укрупненных частиц.

Коагуляция взвешенных в газах частиц существенно влияет на эффективность действия пылеулавливающих устройств. С точки зрения обеспыливания воздуха (газов) коагуляция - положительное явление, так как благодаря укрупнению пылевых частиц повышается эффективность их улавливания. Мелкодисперсная пыль, плохо или совсем не улавливаемая в более простых аппаратах, может быть задержана ими после коагуляции. Соединение и укрупнение частиц происходит при слипании их вследствие столкновения под действием гравитационных сил, сил инерции, броуновского движения, взаимного притяжения и т. д. Наибольшая роль в коагуляции принадлежит молекулярным силам и силам электрического притяжения [10].

Коагуляция будет происходить тем интенсивнее, чем больше вероятность столкновения аэрозольных частиц. Мелкие частицы в большей степени подвержены коагуляции, чем крупные. Ускоряется также коагуляция при повышении концентрации пылевых частиц в газовой среде.

Различают естественную коагуляцию, когда этот процесс происходит под действием естественных сил, т. е. в основном за счет броуновского движения и гравитационных сил, и искусственную, когда этот процесс интенсифицируют, применяя дополнительные факторы, например турбулизацию запыленного потока, его искусственную ионизацию и акустическую обработку. Процесс коагуляции в результате ускоряется во много раз, так как вероятность столкновения и взаимодействия частиц во много раз увеличивается.

**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 твердые тела разделяют на три основные группы:

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

**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.

**Электрическая проводимость слоя пыли.** Этот показатель оценивается по удельному электрическому сопротивлению слоя пыли  $r_{сл}$ , которое зависит от свойств отдельных частиц (от поверхностной и внутренней электропроводности, формы и размеров частиц), а также от структуры слоя и пара-

метров газового потока. Оно оказывает существенное влияние на работу электрофильтров.

В зависимости от удельного электрического сопротивления, пыли делят на три группы:

1) низкоомные пыли  $\rho_{\text{сл}} < 10^4$  Ом • см. При осаждении на электроде частицы пыли мгновенно разряжаются, что может привести ко вторичному уносу;

2) пыли с  $\rho_{\text{сл}} = 10^4 — 10^{10}$  Ом • см. Эти пыли хорошо улавливаются в электрофильтре, так как разрядка 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].

**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.

**Способность частиц пыли к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом.** Горючая пыль вследствие сильно развитой 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.

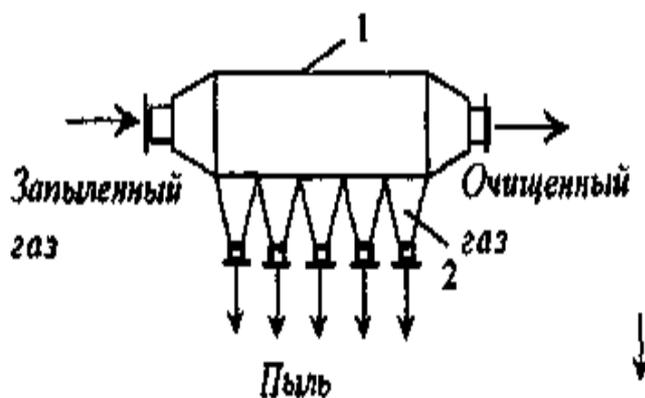
Минимальные взрывоопасные концентрации взвешенной в воздухе пыли — примерно  $20\text{--}500$  г/м<sup>3</sup>, максимальные —  $700\text{--}800$  г/м<sup>3</sup>. Чем больше содержание кислорода в газовой смеси, тем вероятнее взрыв и больше его сила. При содержании кислорода менее 16 % пылевое облако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

Выбор типа пылеуловителя обусловлен степенью запыленности газа, дисперсностью частиц и требованиями к степени его очистки.

## 4.2 Очистка газов в сухих механических пылеуловителях

К сухим механическим пылеуловителям относят 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 установки на его пути препятствия) и центробежный (одионочные, групповые и батарейные циклоны, вихревые и динамические пылеуловители) [2].

В гравитационном оборудовании отделение взвешенных частиц от газа осуществляется преимущественно под действием силы тяжести. Устройства для гравитационной очистки просты по конструкции, но пригодны главным образом для грубой предварительной очистки газов. Наиболее простыми являются пылеосадительные камеры (рисунок 4.1).



1 — корпус; 2 — бункеры.

Рисунок 4.1 Пылеосадительная камера

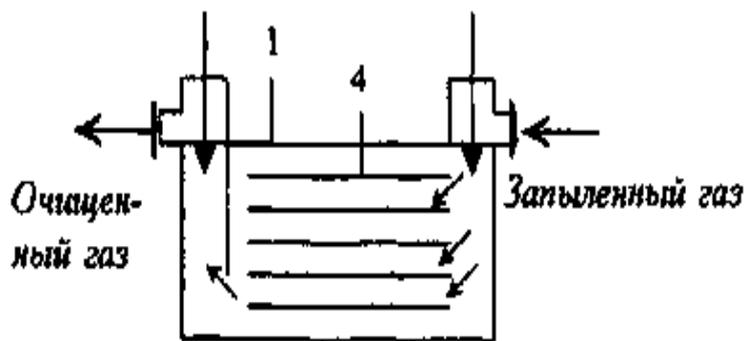
Они применяются в основном для предварительной очистки газов от крупной пыли (с размером частиц 100 мкм и более) и одновременно для охлаждения газа. Камера представляет собой пустотелый или с полками короб прямоугольного сечения с бункером внизу для сбора пыли. Площадь сечения камеры значительно больше площади подводящих газоходов, вследствие чего газовый поток движется в камере медленно около 0,5 м/с и пыль оседает.

Достоинствами пылеосадительной камеры является то, что она имеет низкое аэродинамическое сопротивление, проста и выгодна в эксплуатации; недостатками — громоздкость, низкая степень очистки. Эффективность камеры можно довести до 80 - 85 %, если сделать внутри камеры перегородки, увеличивающие время нахождения газа в ней (рисунок 4.2).

Обычно пылеосадительные камеры встраивают в газоходы, они изготавливаются из металла, кирпича, бетона и т. д.

В промышленности более широко применяются инерционные пылеуловители. В этих аппаратах за счет резкого изменения направления газового потока частицы пыли по инерции ударяются об отражательную поверхность и выпадают на коническое днище пылеуловителя, откуда разгрузочным устройством непрерывно или периодически выводятся из аппарата.

Наиболее простые из пылеуловителей этого типа - пылевые коллекторы (мешки). Они также задерживают только крупные фракции пыли, степень очистки 50 - 70 % (рисунок 4.3).



1 — корпус; 4 — полка

Рисунок 4.2 Многополочная камера

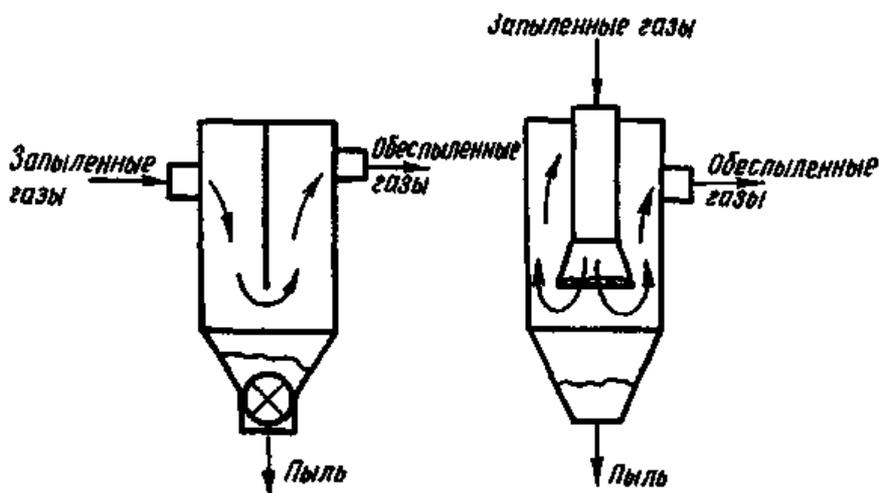
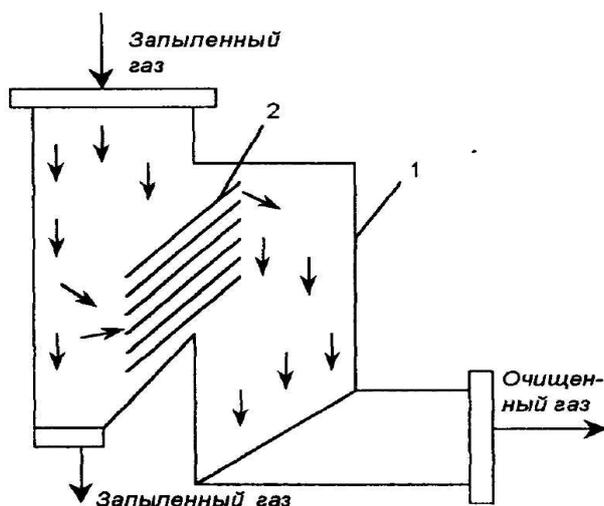


Рисунок 4.3 Инерционные пылеуловители (пылевые коллекторы)

В более сложных жалюзийных аппаратах улавливаются частицы размером 50 мкм и более. Они предназначены для очистки больших объемов газозоуддушных выбросов (рисунок 4.4) [1].

Жалюзи состоят из перекрывающихся друг друга рядов пластин или колец с зазорами 2-3 мм, причем всей решетке придается некоторая конусность для поддержания постоянства скорости газового потока. Газовый поток, проходя сквозь решетку со скоростью 15 м/с, резко меняет направление. Крупные частицы пыли, ударяясь о наклонные плоскости решетки, по инерции отражаются от последней к оси конуса и осаждаются. Освобожденный от крупнодисперсной пыли газ проходит через решетку и удаляется из аппарата. Часть газового потока в объеме 5-10 % от общего расхода отсасывается из пространства перед жалюзийной решеткой, содержащей основное количество пыли и направляется в циклон, где освобождается от пыли и затем присоединяется к основному потоку запыленного газа.



1 — корпус, 2 — решетка

Рисунок 4.4 Жалюзийный пылеуловитель

Степень очистки газов от пыли размером более 25 мкм составляет примерно 60 %. Основными недостатками жалюзийных пылеуловителей является сложное устройство аппарата и абразивный износ жалюзийных элементов.

Широко распространенными устройствами для пылеулавливания являются циклоны, действие которых основано на использовании центробежной силы.

Циклоны являются эффективными пылеулавливающими устройствами, степень очистки которых зависит от размера частиц и может достигать 95 % (при размере частиц более 20 мкм) и 85 % (при размере частиц более 5 мкм).

Они имеют следующие достоинства:

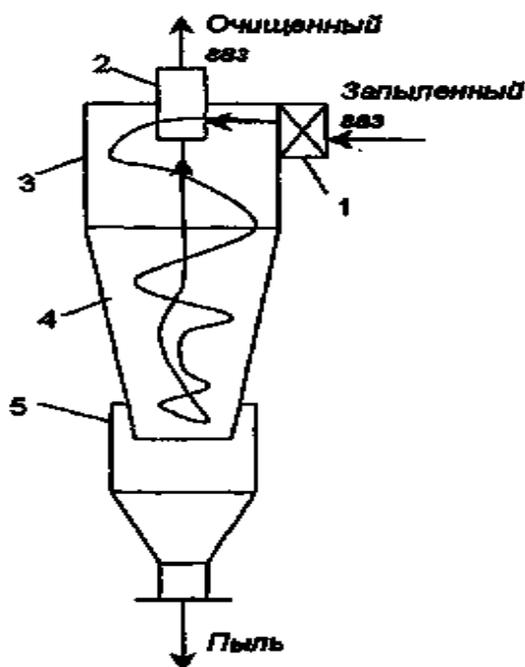
- 1) отсутствие движущихся частей в аппарате;
- 2) надежность работы при температурах газов вплоть до 500 °С (для работы при более высоких температурах циклоны изготавливают из специальных материалов);
- 3) возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными 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.

К недостаткам циклонов всех конструкций относится сравнительно высокое аэродинамическое сопротивление (400 - 700 Па), значительный абразивный износ стенок аппаратов, вероятность вторичного уноса осевшей в пылесборнике пыли за счет перегрузки по газу и неплотностей. Кроме того,

циклоны недостаточно эффективно улавливают полидисперсные пыли с диаметром частиц менее 10 мкм и низкой плотностью материала и невозможность использования для очистки газов от липких загрязнений.

Принцип работы циклона. Газ вращается внутри циклона, двигаясь сверху вниз, а затем движется вверх. Частицы пыли отбрасываются центробежной силой к стенке, опускаются вниз и собираются в приемном бункере. Из бункера пыль периодически выгружается через затвор, называемый «мигалкой». Когда нарастающая масса столба пыли над клапаном «мигалки» достигает определенной величины, клапан под тяжестью пыли открывается, сбрасывает пыль и возвращается под действием контргруза в исходное состояние. «Мигалка» должна быть отрегулирована так, чтобы пыль в бункере не накапливалась выше определенного уровня, иначе воздух, движущийся в конусной части циклона, будет захватывать и уносить с собой верхний слой осевшей пыли. Очищенный воздух выбрасывается через центральную трубу из аппарата (рисунок 4.5).

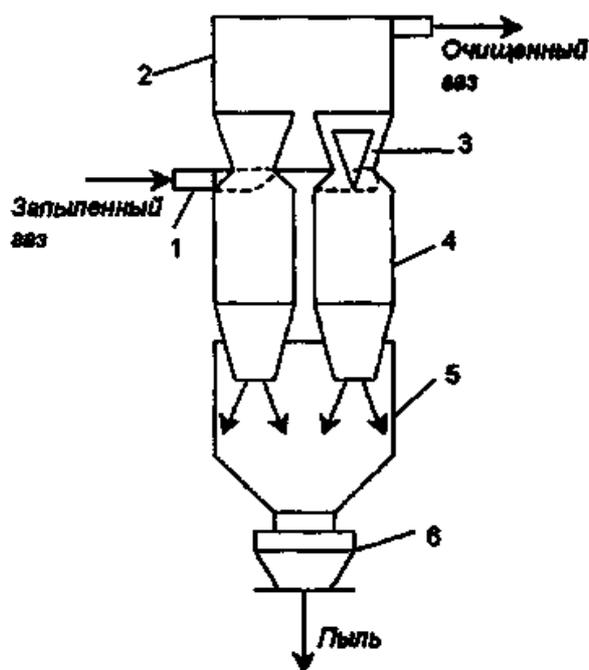
Обычно в циклонах центробежное ускорение в несколько сот, а то и тысячу раз больше ускорения силы тяжести, поэтому даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за газом, а под влиянием центробежной силы движутся к стенке.



1 — входной патрубок; 2 — выхлопная труба; 3 — цилиндрическая камера; 4 — коническая камера; 5 — пылеосадительная камера

Рисунок 4.5 Циклон одинарный

Известно, что эффективность улавливания пыли в циклоне прямо пропорциональна массе частиц и обратно пропорциональна диаметру аппарата. Поэтому вместо одного циклона большого размера целесообразно ставить параллельно несколько циклонов меньших размеров. Такие устройства называются групповыми батарейными циклонами (рисунок 4.6).



1 — входной патрубок; 2 — камера обеспыленных газов; 3 — кольцевой диффузор; 4 — циклонный элемент; 5 — бункер; 6 — пылевой затвор

Рисунок 4.6 Циклон групповой

Вихревые пылеуловители используются для высокоэффективной очистки (до 99 %) вентиляционных выбросов от мелкодисперсной пыли с заметным содержанием частиц с диаметром 3-5 мкм в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности.

Основным отличием вихревых пылеуловителей от циклонов является наличие вспомогательного закручивающего газового потока.

Достоинства вихревых пылеуловителей по сравнению с циклонами:

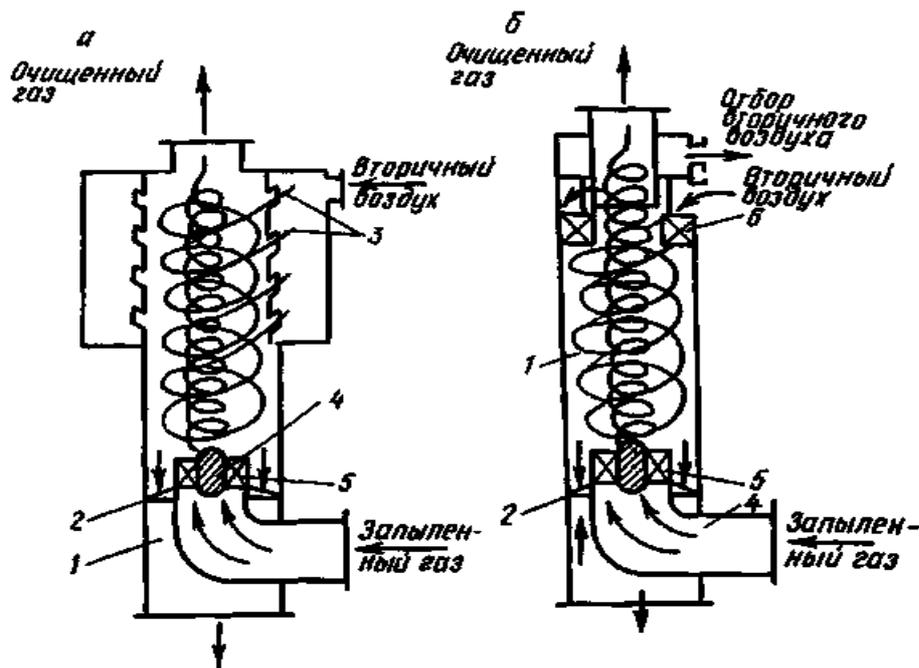
- 1) более высокая эффективность улавливания высокодисперсной пыли;
- 2) отсутствие абразивного износа внутренних поверхностей аппарата;
- 3) возможность очистки газов с более высокой температурой за счет использования холодного вторичного воздуха;

4) возможность регулирования процесса сепарации пыли за счет изменения количества вторичного газа.

Недостатки:

- 1) необходимость дополнительного дутьевого устройства;
- 2) повышение за счет вторичного газа общего объема газов, проходящих через аппарат (в случае использования атмосферного воздуха);
- 3) большая сложность аппарата в эксплуатации [2].

Существует два типа вихревых пылеуловителей (ВПУ) - сопловые и лопаточные (рисунок 4.7).



1 — камера; 2 — выходной патрубок; 3 — сопла; 4 — лопаточный завихритель типа "розетка"; 5 — входной патрубок; 6 — подпорная шайба; 7 — пылевой бункер; 8 — кольцевой лопаточный завихритель

Рисунок 4.7 Вихревые пылеуловители: а – соплового типа; б - лопаточного типа

В аппаратах такого типа запыленный газ входит в камеру 1 через входной патрубок с лопаточным завихрителем 5 типа «розетка» и обтекателем 4. Кольцевое пространство вокруг входного патрубка образовано подпорной шайбой 2, положение и размеры которой обеспечивают безвозвратное осаждение пыли в пылевой бункер. Обтекатель направляет поток запыленного газа к стенкам аппарата и вверх, а струи вторичного воздуха, выходящего из сопла 3 благодаря их тангенциально-наклонному расположению, переводят движение потока во вращательное. Возникающие в потоке воздуха центробежные силы отбрасывают частицы пыли к стенкам аппарата, а оттуда они вместе со спиральным потоком воздуха направляются вниз.

Однако при сопловой системе введения вторичного воздуха не удается избежать завихрений под верхней ограничительной шайбой, в результате чего увеличивается унос отсепарированной пыли. В связи с этим разработан ВПУ лопаточного типа. В этой конструкции вторичный воздух, отобранный с периферии очищенного газового потока, подается кольцевым направляющим аппаратом с наклонными лопастями. При этом резко сокращается унос пыли. Как показали сравнительные испытания, лопаточные ВПУ гораздо эффективнее сопловых. Вторичный воздух для закручивания потока можно подводить из окружающей среды, из потока очищенного газа или из запыленного потока.

В таблице 4.2 приведены характерные параметры сухих механических пылеуловителей [2].

Таблица 4.2 Характерные параметры сухих механических пылеуловителей

Тип пылеуловителя	Максимальная производительность, м <sup>3</sup> /ч	Эффективность пылеулавливания частиц различных размеров, %	Гидравлическое сопротивление, Па	Верхний предел температуры газов, °С
Осадительная камера	$v_T$	80—90 (50 мкм)	50—130	350—550
Циклон	85000	50—80 (10 мкм)	250—1500	350—550
Вихревой пылеуловитель	30000	90 (2 мкм)	До 2000	До 250
Батарейный циклон	170000	90 (5 мкм)	750—1500	350—550
Инерционный пылеуловитель	127000	90 (2 мкм)	750—1500	До 400
Динамический пылеуловитель	42500	90 (2 мкм)	750—1500	До 400

$v_T$  – определяется возможной площадью для размещения

### 4.3 Очистка газов в фильтрах

Фильтрация - представляет наиболее радикальное решение проблемы очистки газов от твердых примесей, обеспечивает степень очистки 99 -99,9 % при умеренных капитальных и эксплуатационных затратах.

**Фильтрами** называются устройства, в которых запыленный воздух пропускается через пористые материалы, способные задерживать или осаживать пыль.

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

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

2) полужесткие пористые перегородки — слои волокон, стружка, вязаные сетки, расположенные на опорных устройствах или зажатые между ними;

3) жесткие пористые перегородки — зернистые материалы (пористая керамика или 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.

Проходя через фильтрующую перегородку, поток разделяется на тонкие непрерывно разъединяющиеся и смыкающиеся струйки. Частицы, обладая инерцией, стремятся перемещаться прямолинейно, сталкиваются с волокнами, зернами и удерживаются ими. Такой механизм характерен для захвата крупных частиц и проявляется сильнее при увеличении скорости фильтрования. Электростатический механизм захвата пылинок проявляется в том случае, когда волокна несут заряды или поляризованы внешним электрическим полем.

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.

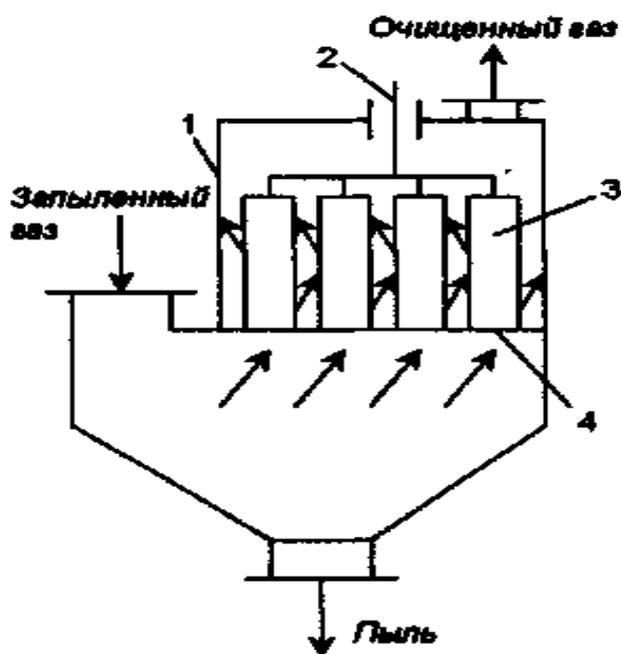
В зависимости от назначения и величины входной и выходной концентрации фильтры условно разделяют на три класса:

1) фильтры тонкой очистки (высокоэффективные или абсолютные фильтры) — предназначены для улавливания с очень высокой эффективностью (>99 %) в основном субмикронных частиц из промышленных газов с низкой входной концентрацией (<1 мг/м<sup>3</sup>) и скоростью фильтрования <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;

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

3) промышленные фильтры (тканевые, зернистые, грубоволокнистые) — применяются для очистки промышленных газов концентрацией до  $60 \text{ г/м}^3$ . Фильтры регенерируются.

В промышленных условиях применяют тканевые, или рукавные, фильтры. Они имеют форму барабана, матерчатых мешков или карманов, работающих параллельно (рисунок 4.8).



1—корпус; 2 — встряхивающее устройство; 3 — рукав; 4 - распределительная решетка

Рисунок 4.8 Рукавный фильтр

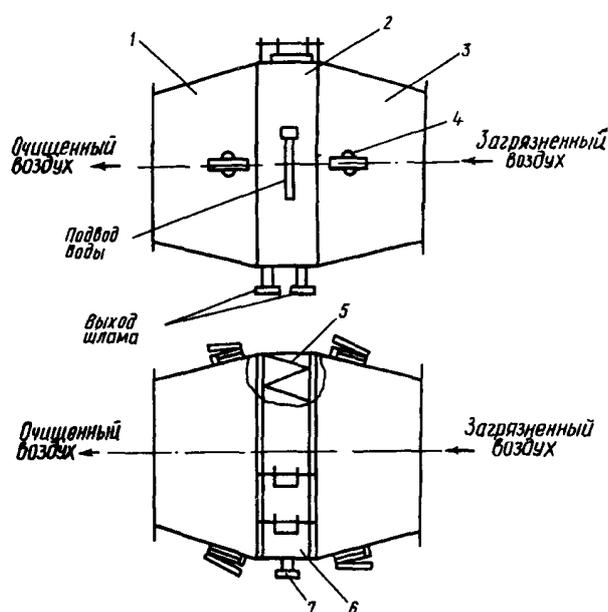
Частицы пыли, оседая на фильтрующий материал, создают слой с порами, меньшими, чем у фильтрующего материала, поэтому улавливающая способность слоя пыли возрастает, но вместе с этим увеличивается и его аэроstaticкое сопротивление. С течением времени слой пыли уплотняется, сопротивление увеличивается, поэтому пыль приходится удалять встряхиванием фильтрующего материала, обратной продувкой струей воздуха или другими способами.

Тканевые рукава изготавливаются из хлопка, шерсти, нейлона, полипропилена, тефлона, стекловолокна и других материалов.

Часто на ткани наносится силиконовое покрытие с целью повышения изгибоустойчивости, термостойкости, стойкости к усадке, абразивного изнашивания или улучшения регенерации ткани. Выбор фильтрующего материала зависит от условий его эксплуатации. По данным практики, остаточная концентрация пыли после тканевых фильтров составляет 10-50 мг/м<sup>3</sup>.

Недостатками рукавных фильтров являются трудоемкость ухода за тканью рукавов и большая металлоемкость аппаратов, так как натягивание рукавов осуществляется с помощью грузов.

Волокнистые фильтры. Фильтрующий элемент этих фильтров состоит из одного или нескольких слоев, в которых однородно распределены волокна (рисунок 4.9).



1 - камера очищенного воздуха; 2 – корпус; 3 - камера загрязненного воздуха; 4 – люк; 5 - кассета; 6 - монтажный люк; 7 - промывочное устройство

Рисунок 4.9 Волокнистый фильтр типа ФВГ-Т

Такие фильтры используют при концентрации дисперсной твердой фазы 0,5-5 мг/м<sup>3</sup> и только некоторые грубоволокнистые фильтры применяют при концентрации 5-50 мг/м<sup>3</sup>. При таких концентрациях основная доля частиц имеет размеры менее 5-10 мкм.

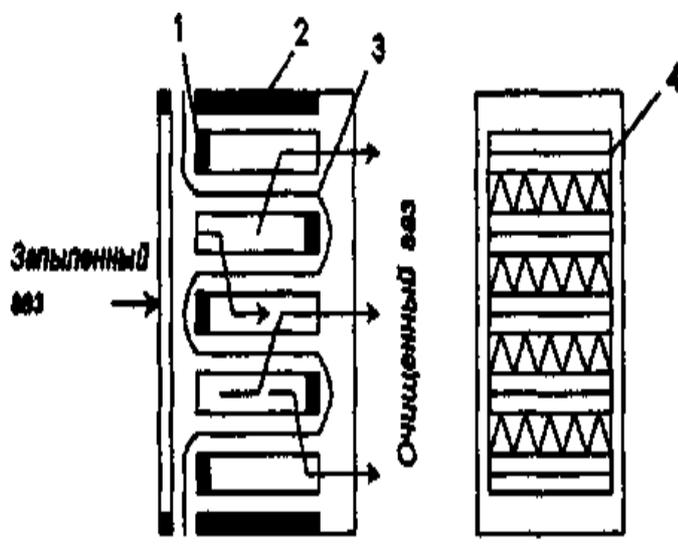
Различают следующие виды промышленных волокнистых фильтров:

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.

Волокнистые фильтры тонкой очистки. Используются в атомной энергетике, радиоэлектронике, точном приборостроении, промышленной микробиологии, в химико-фармацевтической и других отраслях. Фильтры позволяют очищать большие объемы газов от твердых частиц всех размеров, включая субмикронные. Их широко применяют для очистки радиоактивных аэрозолей. Для очистки на 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). Улавливание частиц в фильтрах тонкой очистки происходит за счет броуновской диффузии и эффекта касания (рисунок 4.10).



1 — П-образная планка; 2 — боковая стенка; 3 — фильтрующий материал; 4 — разделитель

Рисунок 4.10 Рамный фильтр тонкой очистки

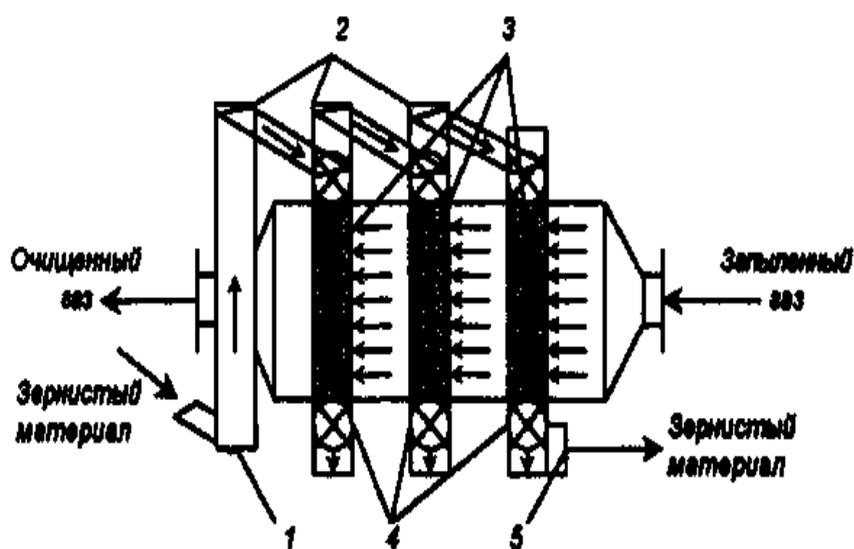
Регенерация отработанных фильтров неэффективна или невозможна. Они предназначены для работы на срок 0,5-3 года. После этого фильтр заменяют на новый.

Зернистые фильтры. Применяются 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 давле-

ний, а также резкие изменения температуры. Различают насадочные и жесткие зернистые фильтры.

Насадочные (насыпные) фильтры. В таких 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; псевдожидкие слои (рисунок 4.11). В насыпных фильтрах в качестве насадки используется песок, галька, шлак, дробленые горные породы, древесные опилки, кокс, крошка резины, пластмассы, графит и др.

Регенерацию материала от пыли проводят в отдельном аппарате путем грохочения или промывки. Если фильтрующая среда состоит из того же материала, что и пыль, то загрязненные гранулы выводят из системы и используют в технологическом процессе.



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

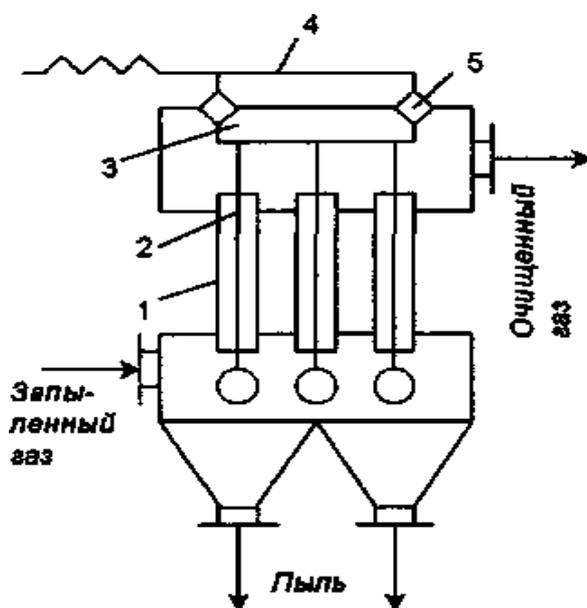
Рисунок 4.11 Фильтр с движущимися слоями зернистого материала

Зернистые жесткие фильтры. В этих 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 фильтрации сжатых газов. Недостатки таких фильтров: высокая стоимость, большое гидравлическое сопротивление и трудности регенерации, которую проводят четырьмя способами:

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

Электрофильтры применяются для очистки запыленных газов от наиболее мелких частиц пылей, туманов размером до 0,01 мкм. Промышленные электрофильтры делятся на две группы: одноступенчатые (одно-зонные), в которых одновременно происходит ионизация и очистка воздуха, и двухступенчатые (двух зонные), в которых ионизация и очистка воздуха проводятся в разных частях аппарата.

В электрофильтрах очистка газов от пыли происходит под действием электрических сил. В камере электрофильтра располагаются отрицательно (коронирующие) и положительно (осадительные) заряженные электроды, к которым подводится постоянный ток высокого напряжения. Запыленный газ движется в пространстве между электродами. При этом происходит ионизация молекул газа на отрицательно и положительно заряженные ионы. Отрицательно заряженные ионы, двигаясь в запыленном газе, сообщают частицам пыли свой заряд и увлекают их к осадительным электродам, где частицы отдают свой заряд и осаждаются (рисунок 4.12).



1 — осадительный электрод; 2 — коронирующий электрод; 3 — рама;  
4 — встряхивающее устройство; 5 — изолятор

Рисунок 4.12 Трубчатый электрофильтр

Таким образом, электроочистка включает процессы образования ионов, зарядки пылевых частиц, транспортирования их к осадительным электродам, периодическое разрушение слоя накопившейся на электродах пыли и сброс ее в пылесборные бункеры.

По конструктивным особенностям электрофильтры различают по разным признакам: по направлению хода газов — на вертикальные и горизонтальные; по форме осадительных электродов — с пластинчатыми, С-образными, трубчатыми и шестигранными электродами; по числу последовательно расположенных электрических полей — на одно- и многопольные; по расположению зон зарядки и осаждения на одно- и двухзонные; по числу параллельно работающих секций — на одно- и многосекционные.

Эффективность работы электрофильтров зависит от свойств пыли и газа, скорости и равномерности распределения запыленного потока в сечении аппаратов и т.д. Чем выше напряженность поля и меньше скорость газа в аппарате, тем лучше улавливается пыль.

#### **4.4 Очистка газов в мокрых пылеуловителях**

В тех случаях когда допустимо увлажнение очищаемого газа, применяют гидропылеуловители. В этих аппаратах запыленный поток соприкасается с жидкостью или орошаемыми ею поверхностями. 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 очищенных 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 газопотоках и дымососах;
- 3) в случае очистки агрессивных газов необходимость защищать аппаратуру и коммуникации антикоррозионными материалами;
- 4) кроме того, мокрые пылеуловители требуют значительного расхода электроэнергии для подачи и распыления воды.

В мокрых пылеуловителях в качестве орошающей жидкости чаще всего используется вода.

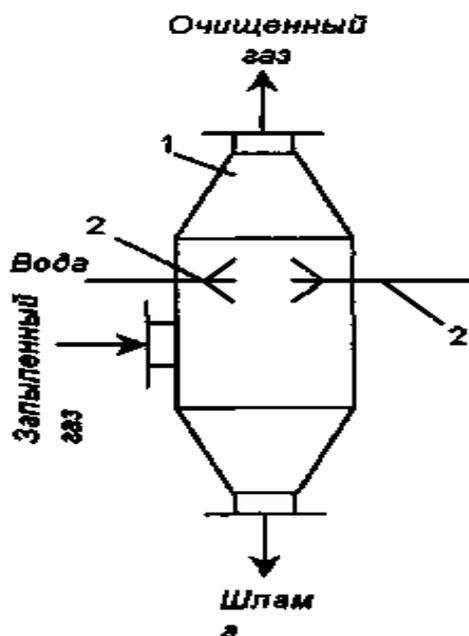
В зависимости от поверхности контакта или по способу действия их подразделяют на 8 видов:

- 1) полые газопромыватели;
- 2) насадочные скрубберы;
- 3) тарельчатые (барботажные и пенные);
- 4) с подвижной насадкой;
- 5) ударно-инерционного действия (ротоклоны);
- 6) центробежного действия;
- 7) механические газопромыватели;
- 8) скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури и эжекторные).

Эффективность мокрых пылеуловителей зависит в большей степени от смачиваемости пыли. При улавливании плохо смачиваемой пыли в орошающую воду вводят ПАВ.

В результате контакта запыленного газового потока с жидкостью образуется межфазная поверхность контакта. Эта поверхность состоит из газовых пузырьков, газовых струй, жидких струй, капель, пленок жидкости. В большинстве мокрых пылеуловителей наблюдаются различные виды поверхностей, поэтому пыль улавливается в них по различным механизмам.

Наиболее распространены полые форсуночные скрубберы (рисунок 4.13).



1 — корпус; 2 — форсунки

Рисунок 4.13 Полый форсуночный скруббер

Они представляют собой колонну круглого или прямоугольного сечения, в которой осуществляется контакт между газом и каплями жидкости. По направлению движения газа и жидкости полые скрубберы делят на противоточные, проточные и с поперечным подводом жидкости. Форсунки устанавливают в колонне в одном или нескольких сечениях: иногда рядами до 14-16 в каждом сечении, иногда только по оси аппарата.

При работе без каплеуловителей чаще используют противоточные скрубберы. Скорость газа в них изменяется от 0,6 до 1,2 м/с. Скрубберы с каплеуловителями работают при скорости газа 5-8 м/с.

#### 4.5 Рекуперация пылей

В зависимости от способа улавливания (сухие и мокрые), природы, количества, физико-химических свойств, концентрации потенциально полезного компонента, его токсичности, стоимости, перспектив последующей переработки и ряда других показателей существуют методы рекуперации, ликвидации и изоляции промышленных пылей. Естественно, наиболее рациональным является рекуперация пылей.

Возможные пути использования промышленных пылей:

- 1) использование в качестве целевых продуктов;
- 2) возврат в производство, в технологии которого происходит образование данного вида пыли;
- 3) переработка в другом производстве с целью получения товарных продуктов;
- 4) утилизация в строительных целях;
- 5) переработка с извлечением ценных компонентов;
- 6) сельскохозяйственное использование (в отдельных случаях в качестве удобрений);
- 7) утилизация в процессах, где используются отдельные физико-химические свойства (или совокупность таких свойств) пылевидных материалов.

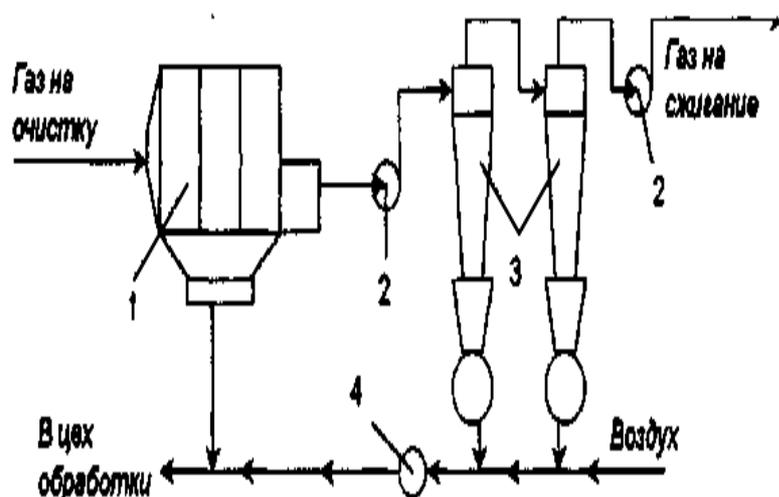
Использование пыли в качестве целевого продукта. Как правило, это относится к технологии, направленной на специальное получение продукции в виде тонкодисперсного материала. Типичным примером такой технологии является производство сажи.

Сажу широко используют во многих отраслях промышленности: в резиновой и шинной (>90 % всего производимого количества), лакокрасочной и др. Ее получают в процессе сжигания нефтепродуктов или горючих газов при недостатке воздуха (в коптящем пламени). Она характеризуется большой дисперсностью (0,01 – 5,5 мкм). В газах, поступающих на очистку, содержание сажи составляет 80-100 г/м<sup>3</sup>. Следует учитывать, что отходящие газы сажевого производства взрывоопасны и горючи.

Для выделения форсуночной сажи из технологических газов сажевого производства используют горизонтальные односекционные трехполочные электрофильтры типа СГ. Они имеют стальной корпус и снабжены взрывными клапанами для упреждения пиковых давлений при возникновении в си-

стеме "хлопков". Во избежание подсоса воздуха и образования взрывоопасных смесей электрофильтры СГ работают под избыточным давлением 50-100 Па. Наиболее устойчивый температурный диапазон их работы 180-230 °С. Допустимое содержание кислорода в поступающих на очистку газах составляет < 1,3 % (об.).

В электрофильтрах происходит частичная коагуляция взвешенных частиц, поэтому для улавливания образующихся агломератов используют вторую ступень очистки, в качестве которой служат последовательно установленные циклоны. Степень очистки в первой ступени составляет 97 %, во второй — 80 %. В среднем остаточное содержание сажи в газах после электрофильтров находится в пределах 1,5-4,5 г/м<sup>3</sup>, после циклонов — 0,5-0,7 г/м<sup>3</sup>. После второй ступени очистки газы направляют на сжигание. Выделенную из газовой фазы сажу пневмотранспортом передают в цех обработки, где ее отвеивают от посторонних включений, пропускают через микроизмельчители и уплотнители, а затем гранулируют и в виде готовой продукции затаривают в мешки или барабаны (рисунок 4.14).



1 — электрофильтр, 2 — дымосос, 3 — циклоны, 4 — вентилятор пневмотранспортера

Рисунок 4.14 Рекуперации сажи из технологических газов производства форсуночной сажи

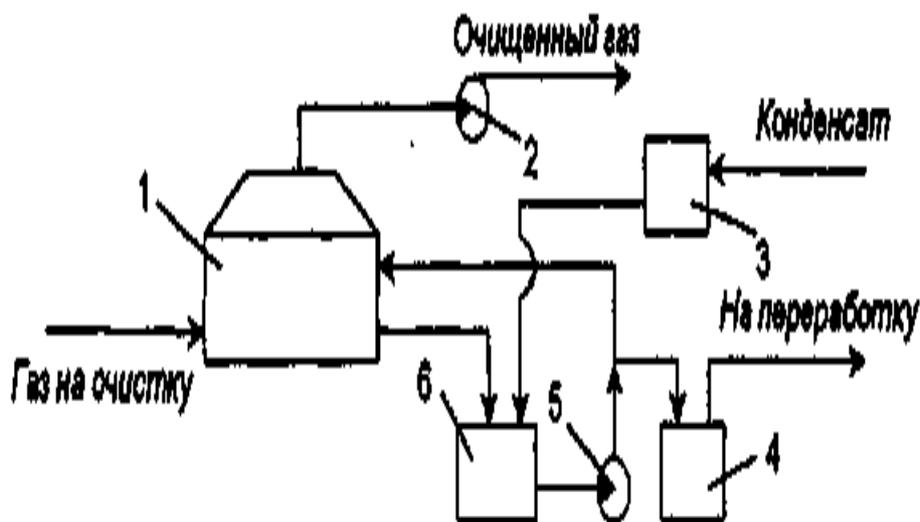
Возврат пыли в производство. Так, при производстве аммиачной селитры и карбамида — многотоннажных продуктов, используемых в основном как удобрения в сельском хозяйстве, на стадиях соответственно охлаждения высушенного в аппаратах кипящего слоя после грануляции продукта и охлаждения и сушки готового продукта в кристаллизаторах образуются пылевоздушные смеси со значительным содержанием этих веществ. Для их улавливания и очистки воздуха перед его выбросом в атмосферу используют различного вида аппараты мокрого поглощения (пенные, полые и другие скруб-

беры), орошаемые водными растворами извлекаемых компонентов, циркулирующими в системе очистки до достижения определенной концентрации, после чего образующиеся рассолы возвращают в тот или иной аппарат технологической нитки (рисунок 4.15).

Поглотительный раствор циркулирует в системе до достижения 40-50%-й концентрации в нем карбамида, после чего его передают в основное производство на переработку в товарный продукт, а для продолжения процесса очистки используют новую порцию конденсата.

Утилизация пыли, уловленной в одном производстве, в качестве сырья для другого производства. Также является весьма распространенным приемом использования пылевидных отходов в химической и других отраслях промышленности.

Так, огарковую пыль, улавливаемую в батарейных циклонах и сухих электрофильтрах при очистке содержащего диоксид серы обжигового газа в производстве серной кислоты из колчедана и содержащую в среднем 40-63 % железа, 1-2 % серы, 0,33-0,47 % меди, 0,42-1,35 % цинка, 0,32-0,58 % свинца, 10-20 г/т драгоценных металлов и другие соединения, после соответствующей обработки или без таковой можно использовать в шихте для выплавки чугуна.



1 — пенный аппарат, 2 — вентилятор, 3 — емкость для конденсата, 4 — промежуточная емкость, 5 - насос, 6 — емкость для поглотительного раствора

Рисунок 4.15 Рекуперация газообразного аммиака и пылевидного карбамида из отходящих газов кристаллизаторов в производстве карбамида

Сажа, выделенная при очистке технологических и отходящих газов ряда производств, может быть использована для приготовления гранул или брикетов, служащих в качестве котельного топлива.

## 4.6 Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные свойства пыли.
- 2 Какие свойства пыли определяют выбор мокрых методов очистки?
- 3 Какие свойства пыли определяют выбор электрических методов очистки?
- 4 Какое оборудование относят к сухим механическим пылеуловителям?
- 5 Какие существуют механизмы осаждения взвешенных частиц?
- 6 Какое оборудование используется в основном для предварительной очистки газов от крупной пыли?
- 7 Принцип работы циклона.
- 8 Перечислите основные достоинства вихревых пылеуловителей по сравнению с циклонами.
- 9 Какие существуют виды фильтров?
- 10 Как осуществляется очистка газов от пыли в электрофильтрах?
- 11 Принцип действия мокрых пылеуловителей?
- 12 Приведите примеры возможных путей использования промышленных пылей.

## 5 Очистка промышленных газов от газообразных примесей

### 5.1 Очистка топочных газов от диоксида серы

Уменьшение содержания серы в топочных газах может достигаться разными методами: использованием малосернистых углей, предварительным удалением серы из угля, удалением серы из топочных газов, предварительной переработкой нефти, угля, сланца в жидкое или газообразное горючее (с удалением серы).

Предварительное удаление серы из угля может осуществляться физическими, химическими и микробиологическими методами. Физическими методами (гравитационные и магнитные) удаляется пиритная сера - не более 50 % от общего ее содержания. Микробиологические методы широкого распространения не получили, так как для проведения процесса требуется продолжительное время (несколько дней).

Для очистки газов от диоксида серы используются различные методы. Рассмотрим основные из них.

#### **Известковые и известняковые методы.**

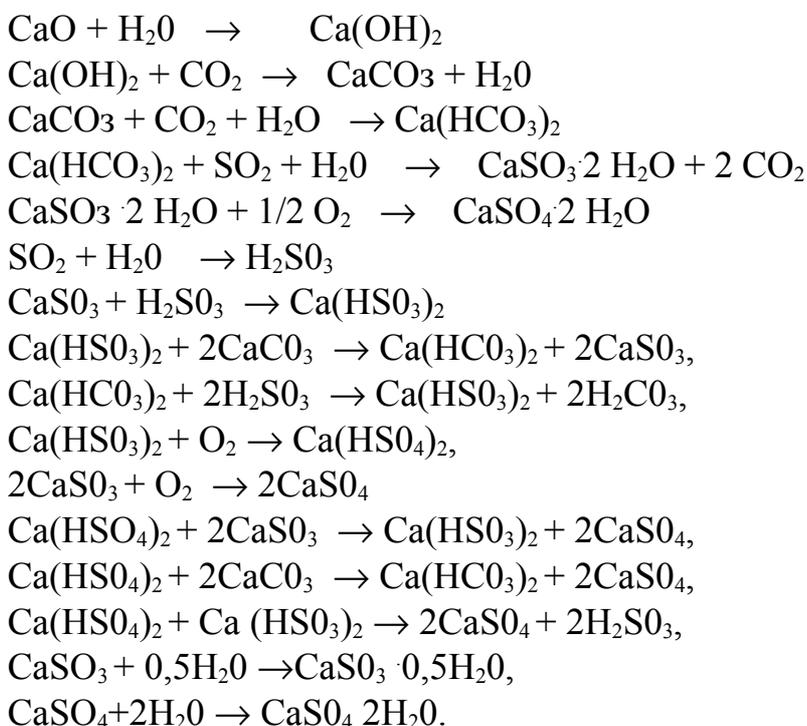
Достоинством этих методов является простая технологическая схема, низкие эксплуатационные затраты, доступность и дешевизна сорбента, возможность очистки газа без предварительного охлаждения и обеспыливания.

На практике применяются известняки, мел, доломиты, мергели. Средний состав известняка, в %: SiO<sub>2</sub>— 5,19; TiO<sub>2</sub>— 0,06; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,81; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ FeO — 0,54; MnO — 0,05; CaO — 42,61; MgO — 7,90; K<sub>2</sub>O — 0,33; Na<sub>2</sub>O — 0,05; H<sub>2</sub>O — 0,76; CO<sub>2</sub>—41,58; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>—0,04; S — 0,09; SO<sub>3</sub> — 0,05; Cl<sub>2</sub>— 0,02. Доломит CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub> содержит, в %: CaO — 30,4; MgO — 21,7; CO<sub>2</sub>— 47,9. Мергель — осадочная горная порода глинисто-карбонатного состава содержит, в %: SiO<sub>2</sub> — 8,02-53,32; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—1,52-9,92; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—0,44-3,30; MgO—0,26-1,95; CaO— 18,18-50,44; SO<sub>3</sub>—0,05-0,75.

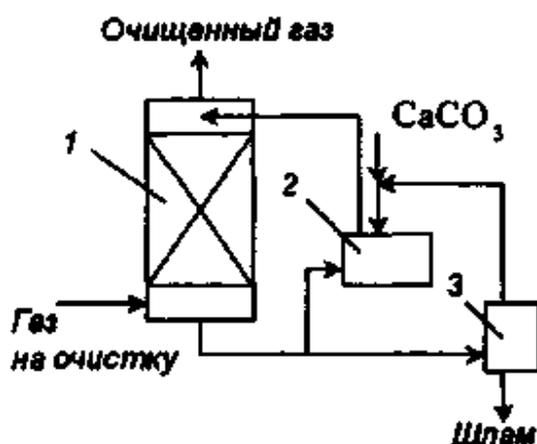
Известь получают обжигом карбонатных пород при температуре 1100-1300 °С.

Основные их недостатки - образование большого объема сульфитов и сульфатов и сложность утилизации последних [3].

Основные химические реакции, протекающие при взаимодействии SO<sub>2</sub> с пульпой гидроксида кальция или известняка, описываются следующими уравнениями:



Протекание тех или иных реакций зависит от состава и pH суспензии. В присутствии в растворе различных примесей процесс абсорбции значительно усложняется. На рисунке 5.1 представлена схема установки абсорбции диоксида серы суспензией известняка.



1- абсорбер; 2 – сборник; 3 – вакуум- фильтр

Рисунок 5.1 Схема установки абсорбции диоксида серы суспензией известняка

Образующийся в процессе улавливания  $\text{SO}_2$  сульфит кальция плохо растворим в воде (0,136 г/л) и образует мелкокристаллический осадок  $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Под действием кислорода воздуха он частично переходит в сульфат кальция. При абсорбционном выделении  $\text{SO}_2$  происходит также очистка газа от частиц летучей золы и других веществ. Поэтому образующаяся пульпа имеет сложный переменный состав и содержит смесь сульфита и сульфата кальция, непрореагировавшего  $\text{CaCO}_3$  или  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , частиц летучей золы и других веществ. Это в значительной мере затрудняет дальнейшее использование образующегося шлама. В большинстве случаев его сбрасывают в отвал, где он является источником вторичного загрязнения окружающей среды.

#### **Магнезитовый метод.**

Сущность метода состоит во взаимодействии  $\text{SO}_2$  с суспензией  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  по реакции:



Кристаллический сульфит магния подвергают сушке и обжигу, получая при этом концентрированный поток  $\text{SO}_2$  и  $\text{MgO}$ .



Окись магния возвращается в цикл, а  $\text{SO}_2$  направляется на переработку (например, на получение серной кислоты по стандартной технологии). Часть сульфита магния под действием кислорода воздуха окисляется до сульфата:



Разложение сульфита магния проводят при температуре 800-900 °С, однако при этих температурах образующийся сульфат магния не разлагается и накапливается. При таких условиях получается переобогащенный MgO, который имеет малую активность по отношению к SO<sub>2</sub>. Для устранения образования сульфата необходимо использовать ингибиторы окисления или проводить процесс в абсорберах при малом времени контакта газ — жидкость. Другой путь - производить обжиг сульфата в присутствии восстановителей (кокса, метана, оксида углерода и др.). В этом случае сульфат восстанавливается в сульфид.

Достоинствами метода являются его цикличность, высокая эффективность (степень очистки 90-92 %), возможность утилизации SO<sub>2</sub>. Основным недостатком процесса - большое количество твердофазных стадий, что приводит к сильному абразивному износу аппаратуры и загрязнению среды твердыми частицами. Весьма значительными являются и энергетические расходы на разложение сульфита и сульфата магния.

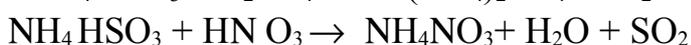
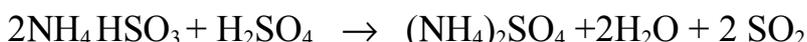
#### **Аммиачные методы.**

В основе этих методов лежит процесс абсорбции SO<sub>2</sub> раствором сульфита аммония:

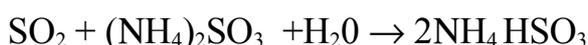


В дальнейшем в результате химических превращений из образующегося гидросульфита аммония выделяют оборотный раствор (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> и концентрированный поток SO<sub>2</sub>. По способу регенерации абсорбционного раствора методы выделения SO<sub>2</sub> из дымовых газов подразделяют на кислотный, циклический и автоклавный.

Аммиачно-кислотные методы заключаются в обработке бисульфита аммония серной (азотной, фосфорной) кислотой:



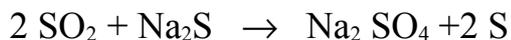
В основе аммиачно-циклического метода выделения SO<sub>2</sub> из отходящих газов лежит процесс поглощения SO<sub>2</sub> раствором сульфита аммония:



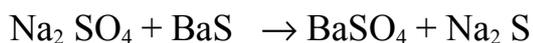
При нагревании полученного раствора бисульфит аммония разлагается с образованием сульфита аммония и диоксида серы. Выделившийся SO<sub>2</sub> после сушки является товарным продуктом, а раствор сульфита аммония возвращается на стадию абсорбции (рисунок 5.2).



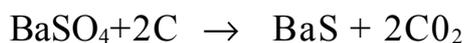
Топочные газы предварительно очищаются от пыли в электрофильтрах и доочищаются водой, при этом происходит очистка от тяжелых металлов. Далее  $\text{SO}_2$  взаимодействует в абсорбере с раствором сульфида натрия:



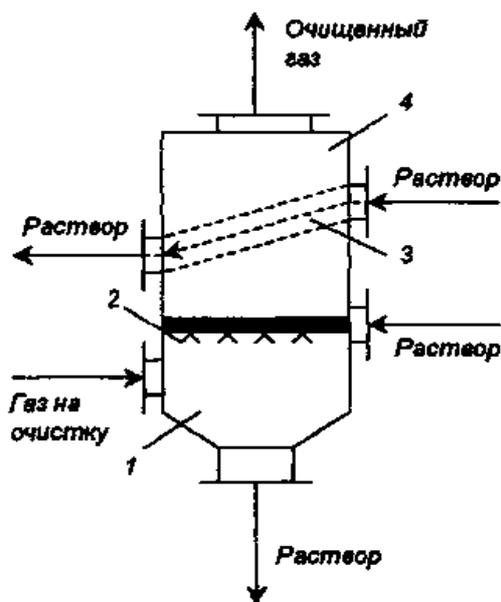
Образовавшаяся пульпа (раствор  $\text{Na}_2 \text{SO}_4$  и  $\text{S}$ ) подкисляется и нагревается в автоклаве до  $150-170^\circ\text{C}$ , сера при этом плавится и отделяется, а раствор сульфата натрия взаимодействует далее с обратным сульфидом бария:



Раствор сульфида натрия направляется на начальную стадию процесса на улавливание диоксида серы, а осадок сульфата бария - в печь для восстановления коксом:



Для проведения процессов абсорбции диоксида серы используют различные по конструкции абсорберы. Они должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокие эффективность и пропускную способность по газу, низкое гидравлическое сопротивление (до 3 кПа) быть простыми по конструкции и удобными в эксплуатации, отличаться низкой металлоемкостью, не забиваться осадками, образующимися в процессе абсорбции. На практике больше всего используются пустотелые абсорберы с форсунками и скрубберы Вентури, одноступенчатые и двухступенчатые. Совершенствование их конструкций идет по пути создания аппаратов с минимальной внутренней поверхностью. Высокой эффективностью и простотой в эксплуатации обладает абсорбер типа СМ (рисунок 5.3)



1- секция очистки газа, 2-форсунка, 3- контактные тарелки, 4- секция брызгоудаления

Рисунок 5.3 Абсорбер типа СМ

## 5.2 Очистка отходящих газов от оксидов азота

Одна из основных трудностей улавливания оксидов азота из отходящих газов, как и оксидов серы, связана со сравнительно малой их концентрацией (в основном 100-1000 мг/м<sup>3</sup>) при огромных объемах выбрасываемых газов.

Известны следующие соединения азота с кислородом: N<sub>2</sub>O, NO, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Оксид диазота N<sub>2</sub>O при невысоких температурах не вступает в реакции. При высоких температурах разлагается на азот и кислород. Полная диссоциация наступает при 900 °С. Оксид азота NO плохо растворим в воде, солях и органических соединениях. Однако с солями двухвалентного железа, меди, марганца, никеля и т. д. образует комплексные соединения, легко разрушаемые при нагревании. Диоксид азота NO<sub>2</sub> образуется в результате окисления оксида азота кислородом. С водой легко образует азотную кислоту. Триоксид азота N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> существует только при низких температурах. В виде жидкости и пара он в значительной степени диссоциирован. Тетраоксид азота N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> образуется полимеризацией диоксида азота и является сильным окислителем. Пентаоксид азота N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> мало устойчив. Сильный окислитель.

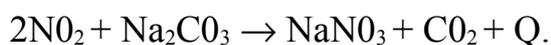
На практике большей частью с отходящими газами выбрасываются NO и NO<sub>2</sub> при их одновременном присутствии. Основная сложность абсорбционных процессов связана с низкой химической активностью и растворимостью оксида азота.

**Абсорбционные методы.** Весьма распространёнными поглотителями оксидов азота являются растворы соды, едкого натра и карбоната аммония, известковое молоко и пр. Известно, что процесс очистки отходящих газов от оксидов азота протекает в две стадии: сначала оксиды азота взаимодействуют с водой с образованием кислот, затем происходит нейтрализация кислот щелочами. Образующиеся при этом растворы азотнокислых солей могут быть использованы в промышленности и сельском хозяйстве. Однако их переработка, в частности концентрирование, и транспортировка вызывают определенные трудности [1].

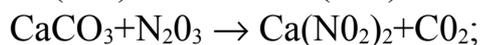
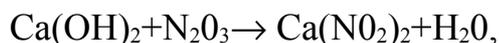
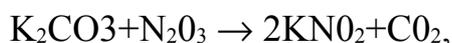
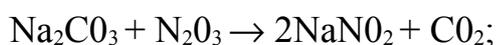
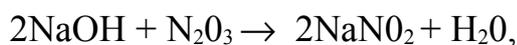
При абсорбции диоксида азота водой в газовую фазу выделяется часть оксида азота, скорость окисления которого при низких концентрациях мала:



Хемосорбция диоксида азота раствором соды протекает по уравнению:



Уравнения для хемосорбции  $\text{N}_2\text{O}_3$  различными щелочными растворами или суспензиями представлены ниже:

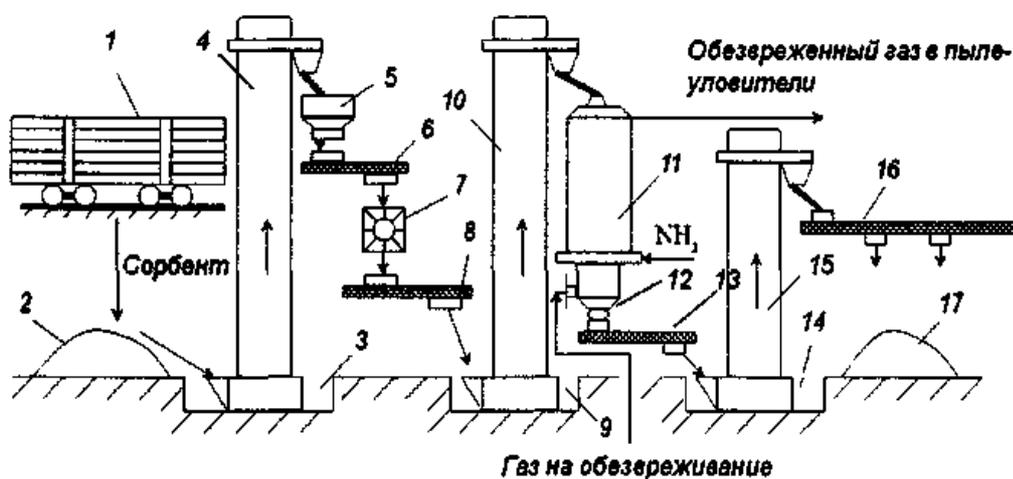


Весьма важным недостатком абсорбционных методов щелочными растворами является невысокая эффективность (70-85 %), поэтому концентрация оксидов азота в очищенных газах значительно превышает ПДК и требуется многократное их разбавление.

**Адсорбционные методы.** В случае небольших объемов газов нашли применение адсорбционные методы. Хорошим сорбентом оксидов азота служит активированный уголь, но его применение затрудняется из-за легкой окисляемости, что может привести к сильному разогреву и даже к возгоранию угля (при значительных концентрациях оксидов азота). Силикагель по адсорбционным свойствам несколько уступает углю, но он более прочен и не окисляется кислородом, а окисление  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  в его присутствии протекает даже быстрее. Однако широкому распространению этих методов препятствует то, что одновременно сорбируются и другие примеси, в результате снижается адсорбционная емкость сорбентов и осложняются процесс десорбции и использование ценных компонентов.

Сравнительно небольшой поглотительной способностью по оксидам азота характеризуются алюмогели, обладающие, кроме того, и невысокой стойкостью. Значительная емкость по отношению к  $\text{NO}_x$  и высокая механическая и термическая устойчивость свойственны алюмосиликатам.

С целью улавливания  $\text{NO}_x$  из отходящих газов разработан метод адсорбции оксидов азота торфощелочными сорбентами в аппаратах кипящего слоя. При использовании наиболее дешевого и доступного сорбента (смесь торфа и извести-пушонки) степень очистки газов, содержащих 0,1-2,0 %  $\text{NO}_x$ , при времени контакта фаз 1,6-3 с достигает 96—99 %, обеспечивая содержание  $\text{NO}_x$  в очищенных газах на уровне 0,01-0,04 %. Технологическая схема установки представлена на рисунке 5.4.

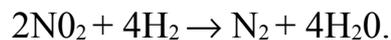
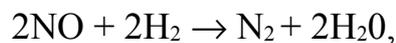
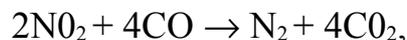
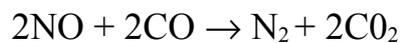


1 — железнодорожный вагон; 2,17 — склады; 3, 9, 14 — прямки; 4, 10, 15 — ковшовые элеваторы; 5 — бункер; 6, 8,13, 16 — шнековые транспортеры; 7 — молотковая дробилка; 11 — адсорбер; 12 — секторный питатель

Рисунок 5.4 Схема установки очистки нитрозных газов торфощелочным сорбентом

**Каталитическое восстановление.** Одним из основных, хорошо освоенных промышленных методов очистки отходящих газов от оксидов азота является их восстановление на катализаторе до молекулярного азота. При использовании неселективного катализатора восстановитель расходуется не только на восстановление азота, но и вступает во взаимодействие с кислородом, обычно содержащимся в газовом потоке. В качестве восстановителя применяются водород, природный газ, оксид углерода и др.

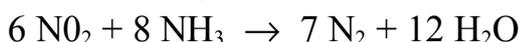
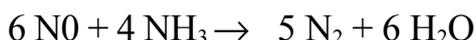
Суть протекающих восстановительных процессов выражается следующими реакциями:



Нагрев и восстановление нитрозных газов производят путем их смешения с газом-восстановителем и сжигания образующейся смеси над слоем катализатора. На практике обычно используют природный газ ввиду его доступности и низкой стоимости. Несмотря на то, что все процессы восстановления  $\text{NO}_x$  экзотермичны, нагрев реакционной смеси происходит в основном за счет реакции восстановителя с кислородом, так как содержание последнего в нитрозных газах обычно во много раз превышает концентрацию в них  $\text{NO}_x$ . В процессе восстановления температура газа быстро возрастает до 700 °С и более, поэтому возникает необходимость использования термостойких катализаторов или восстановителей с низкой температурой зажигания либо проведения ступенчатого контактирования с промежуточным охлаждением обрабатываемого газового потока.

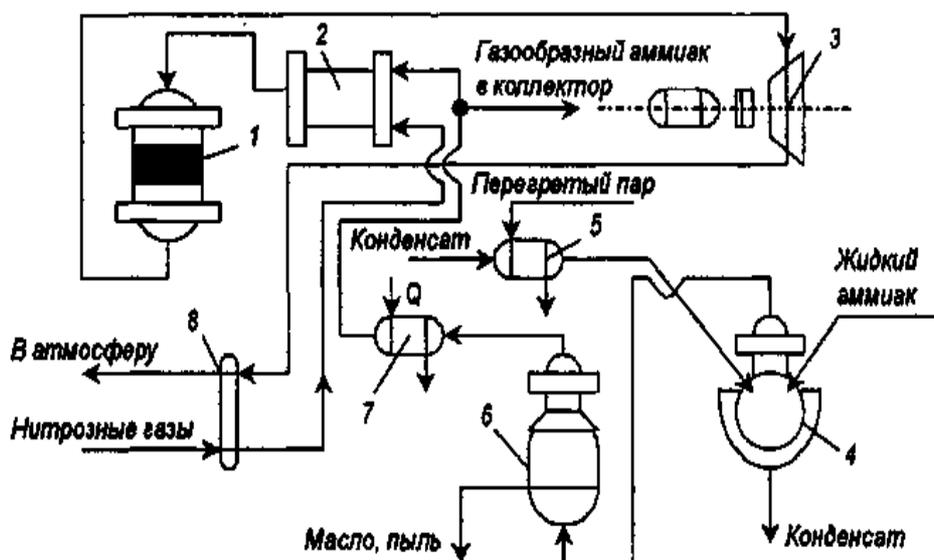
Катализаторами обычно служат элементы платиновой группы. Температура процесса колеблется от 400 до 800 °С.

Наиболее широкое распространение получило селективное каталитическое восстановление оксидов азота аммиаком:



В нашей стране для этих целей разработан специальный алюмо-ванадиевый катализатор (АВК-10). Процесс восстановления протекает при 200-360 °С, степень очистки составляет 96-98,5 %. Основным недостатком метода является необходимость точного дозирования аммиака, что при переменном составе отходящих газов (меняется концентрация оксидов азота) практически невозможно. При недостатке аммиака происходит проскок оксидов азота, а при избытке - проскок аммиака, и отходящие газы загрязняются токсичными соединениями. Со временем катализатор отравляется, что также сопряжено со значительными затруднениями.

Процесс достаточно прост по аппаратному оформлению и внедрен в производствах азотной кислоты под давлением 0,35 МПа (рисунок 5.5).

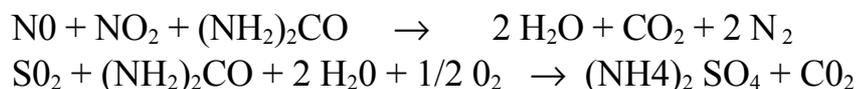


1 — реактор; 2 — смеситель; 3 — рекуперационная турбина; 4 — испаритель; 5, 7, 8 — подогреватели; 6 — фильтр

Рисунок 5.5 Схема установки каталитической очистки отходящих нитрозных газов производств азотной кислоты под давлением 0,35 МПа

**Карбамидный метод.** Позволяет очищать дымовые газы от оксидов азота на 95 % и практически полностью удалять оксиды серы из них. Процесс не требует предварительной подготовки газов, в результате очистки образуются нетоксичные продукты -  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $(NH_4)_2 SO_4$ . Величина pH абсорбционного раствора колеблется в пределах 5-9, поэтому коррозии аппаратуры не наблюдается. Эффективность метода практически не зависит от колебаний входных концентраций оксидов азота и серы [3].

В общем виде процесс описывается приведенными ниже уравнениями реакций:



### 5.3 Снижение выбросов оксидов азота в атмосферу путем регулирования процесса горения

Наряду с установкой газоочистного оборудования в конце технологического цикла сжигания топлива весьма эффективными являются ряд режимных и технологических мероприятий, позволяющих существенно снизить количество образующихся в процессе горения оксидов азота. К этим мероприятиям относятся:

- сжигание с низким коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha$  -альфа);
- рециркуляция части дымовых газов в зону горения;
- сжигание топлива в две и три ступени;
- применение горелок, позволяющих понизить выход  $\text{NO}_x$ ;
- подача влаги в зону горения;
- интенсификация излучения в топочной камере;
- выбор профиля топочной камеры, которому отвечает наименьший выход  $\text{NO}_x$ .

Следует отметить, что указанные мероприятия способны в той или иной мере подавить образование  $\text{NO}_x$  из азота воздуха, но не могут предотвратить их образования из азота, имеющегося в составе топлива [2].

Образование  $\text{NO}_x$  в процессе горения возможно в результате реакции между кислородом и азотом воздуха при высоких температурах, по радикальному механизму с участием углеводородных радикалов и из связанного азота, содержащегося в топливе (угле, мазуте).

Рециркуляция дымовых газов является одним из наиболее распространённых и хорошо изученных способов снижения выхода оксидов азота. При коэффициенте избытка воздуха 1,03 подача рециркулируемых газов в дутьевой воздух позволяет снизить количество выделяющегося  $\text{NO}_x$  до 50 % от первоначального его значения, подача через кольцевой канал вокруг горелки - до 75 %, а через шлицы под горелками - до 85 %.

Двух- и многоступенчатое сжигание топлива является одним из перспективных методов регулирования топочного режима и одновременно методом радикального снижения количества образующихся оксидов азота. Суть метода заключается в том, что в первичную зону горения топлива подаётся меньше, чем это необходимо теоретически ( $\alpha = 0,7-0,95$ ), в результате происходит снижение температуры в зоне факела, содержания атомарного и молекулярного кислорода в факеле и скорости образования оксидов азота. Температура в первичной зоне снижается настолько, что заключительный, происходящий при избытке кислорода этап горения протекает при более низкой температуре, вследствие чего во вторичной зоне горения оксиды азота практически не образуются.

При сжигании природного газа в две стадии удается добиться устойчивого снижения выхода оксидов азота в зависимости от мощности котла на 40-50 %, при сжигании мазута - на 20-50 %, а при сжигании угольной пыли - на 20-40 %.

Сочетание двухступенчатого режима сжигания топлива и рециркуляции топочных газов позволяет снизить количество образующихся  $\text{NO}_x$  на 70-90 % при использовании газа и мазута и на 55-60 % при использовании угля.

Хорошие перспективы уменьшения количества образующихся оксидов азота просматриваются при подаче водяного пара в зону реакции. Как показали исследования, в присутствии молекул воды в зоне горения не только замедляется процесс образования  $\text{NO}_x$ , но и снижается температура в ядре факела, что дополнительно уменьшает выход оксидов азота.

#### **5.4 Очистка отходящих газов от оксида углерода и углеводородов**

Основным методом очистки от углеводородов и оксида углерода в промышленности являются сжигание в пламени, а также термическое и каталитическое окисление. Наиболее известным примером сжигания является широко применяемое в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности сжигание в факеле, т.е. в открытой горелке, направленной вверх. К недостаткам процесса, помимо потерь углеводородов при горении следует отнести образование оксидов азота, а следовательно, вторичное загрязнение атмосферы.

Установки прямого сжигания представляют собой камеру, в которую по самостоятельным каналам подается топливо, очищаемый газ и воздух. Для полного окисления горючих компонентов необходимо тщательное перемешивание смеси. С целью снижения затрат отходящие газы чаще всего сжигаются совместно с твердыми отходами.

**Термический метод** обезвреживания получил более широкое распространение, так как некоторые вредные примеси трудно или невозможно полностью нейтрализовать другими методами из-за сложности их состава, низкой концентрации, а также из-за отсутствия эффективных средств улавливания. Он заключается в том, что все органические вещества полностью окисляются кислородом воздуха при высокой температуре до нетоксичных соединений. В результате выделяются минеральные продукты, вода, диоксид углерода, а также теплота, которые требуют дальнейшей их утилизации.

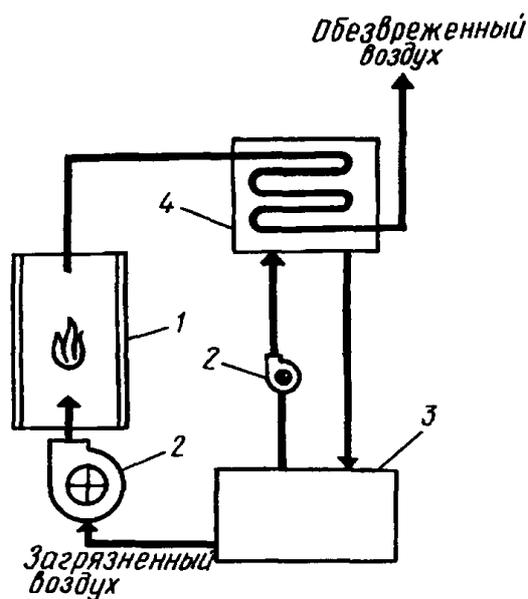
Принципиальная технологическая схема термического обезвреживания газовоздушных выбросов с утилизацией теплоты сгорания в основном технологическом процессе представлена на рисунке 5.6.

Метод термического окисления (дожига) органических веществ, содержащихся в отходящих газах, относится к энергоемким. Для поддержания необходимой температуры обезвреживания отходящих газов ( $800 - 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ) используется высококалорийное топливо (природный газ, мазут), поэтому преимущественно этот способ применяется для обезвреживания газов сложного состава и в тех случаях, когда возврат уловленных примесей в производство экономически нерентабелен [1].

К преимуществам термического метода обезвреживания отходящих газов относятся отсутствие шламового хозяйства, небольшие габариты установок, простота обслуживания, высокая эффективность, возможность обезвреживания горючих выбросов сложного состава.

При всей простоте конструктивного оформления метод прямого сжигания имеет ряд недостатков, главным из которых является необходимость высоких температур, что приводит к повышенным энергозатратам.

С целью снижения температуры обезвреживания органических примесей применяют установки сжигания, где в качестве инициатора окисления используются различные катализаторы. Тем самым достигается снижение температуры обезвреживания более чем в два раза и обеспечивается возможность нейтрализации газов с низким содержанием вредных примесей.



1 - печь дожига (термический реактор), 2 - вентилятор, 3 - технологическая установка, 4 - рекуператор тепла

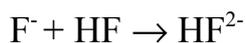
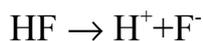
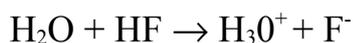
Рисунок 5.6 Принципиальная технологическая схема термического обезвреживания газовоздушных выбросов

Особенность установки термokatалитического обезвреживания состоит в том, что затраты энергии необходимы только в момент пуска, т. е. когда требуется подогреть газовый поток до начальной температуры каталитического окисления (300 - 400 °С). Затем процесс протекает самопроизвольно за счет теплоты реакции окисления.

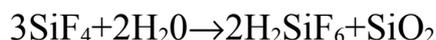
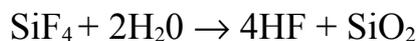
## 5.5 Очистка отходящих газов от галогенов и их соединений

### Очистка от фтора и его соединений.

В наибольших объемах фторсодержащие газы выделяются при электролитическом производстве алюминия и при переработке природных фосфатов в фосфорные удобрения. Они содержат фторид водорода (HF) и тетрафторид кремния SiF<sub>4</sub>. Фторид водорода и тетрафторид кремния хорошо растворимы в воде. При растворении HF в воде протекают реакции гидратации и диссоциации его растворенных молекул



Тетрафторид кремния растворяется в воде с образованием кремнефтористоводородной кислоты



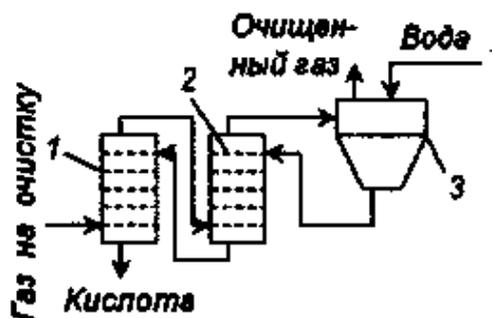
В действительности механизм абсорбции более сложен. Равновесное давление  $\text{SiF}_4$  над растворами  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  при небольших концентрациях раствора мало. При концентрации  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  выше 32% давление  $\text{SiF}_4$  резко возрастает, и он практически не улавливается водой. Введение в раствор добавок в виде солей и щелочей способствует более глубокой очистке газов [2].

В промышленности при абсорбции  $\text{SiF}_4$  обычно получают 10-22 %-й раствор  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ . Процесс проводят в распыливающих, насадочных, тарельчатых колоннах и скрубберах Вентури. Степень очистки газов достигает 90-95 %. Для достижения более глубокой очистки применяют двухступенчатые системы очистки (рисунок 5.7).

Отходящие газы, содержащие 8-10 г/м<sup>3</sup> фтора, при 75-80 °С поступают в первый абсорбер, орошаемый кремнефтористоводородной кислотой. Затем газ проходит второй абсорбер и брызгоуловитель, куда подают чистую воду. В брызгоуловителе происходит окончательная доочистка газа с образованием разбавленной кислоты, которую направляют на рециркуляцию

#### **Очистка от хлора и его соединений.**

Образование промышленных отходящих газов и вентиляционных выбросов, содержащих хлор, хлорид водорода и хлорорганические вещества, характерно для многих производств.



1,2 — абсорберы; 3 — брызгоуловитель

Рисунок 5.7 Схема двухступенчатой установки очистки газов от фторосодержащих соединений

Для абсорбции хлора и хлорсодержащих веществ используют воду, водные растворы щелочей и органических веществ, водные суспензии и органические растворители.

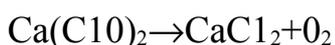
Взаимодействие хлора с растворами щелочей характеризуется реакциями



Наибольшее практическое значение имеют раствор NaOH (100-150 г/л) и водная суспензия Ca(OH)<sub>2</sub> (100-110 г/л). При абсорбции хлора гидроксидом кальция (известковым молоком) при 80-95 °С в основном образуются хлорид и хлорат кальция



Образующиеся в процессе очистки хлораты (гипохлориты) могут быть использованы для обеззараживания сточных вод или подвергаться термокаталитическому разложению под действием острого пара



Процесс можно проводить в абсорберах любой конструкции. Степень очистки газов достигает 70-90 %.

На некоторых предприятиях цветной металлургии для очистки газов от хлора используют раствор хлорида железа, который получают растворением железной стружки в соляной кислоте. При абсорбции хлора FeCl<sub>2</sub> переходит в FeCl<sub>3</sub>, который является товарным продуктом.

Хлорид водорода очень хорошо поглощается водой, поэтому ее, как правило, используют в качестве абсорбента, например, в производстве соляной кислоты. Для очистки отходящих газов от HCl применяют воду и щелочные растворы.

Очистку газов водой проводят в абсорберах различной конструкции: в скрубберах Вентури, распыливающих, насадочных абсорберах и в колоннах с тарелками. Выбор аппарата зависит от объема и состава газов, их температуры, вида и концентрации примесей, эффективности аппаратов, а также направления дальнейшего использования получаемых сорбатов.

Основным недостатком процесса очистки водой является образование тумана капельно-жидкой соляной кислоты, улавливание которого при прочих равных условиях происходит менее интенсивно.

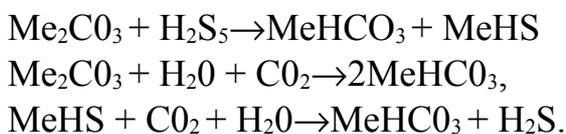
Применение водных растворов NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub> или Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> для абсорбции хлорида водорода позволяет повысить эффективность очистки и одновременно нейтрализовать образующиеся стоки. Этот способ позволяет рекуперировать хлорид водорода с получением хлоридов некоторых металлов: CaCl<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, BaCl<sub>2</sub>, NaCl.

## 5.6 Очистка отходящих газов от сероводорода и сероорганических соединений

**Очистка от сероводорода.** Сероводород содержится как примесь в природном газе и нефтяных, коксохимических газах, выделяется при выпарке целлюлозных щелоков. Технологические и топочные газы, содержащие сероводород, очень коррозионноактивны.

Для очистки газов от сероводорода применяют различные хемосорбционные методы.

Вакуум-карбонатные методы. В этих методах сероводород поглощается из газов водным раствором карбоната натрия или калия. Затем раствор регенерируют нагреванием под вакуумом, охлаждают и снова возвращают на абсорбцию. В основе методов лежат реакции

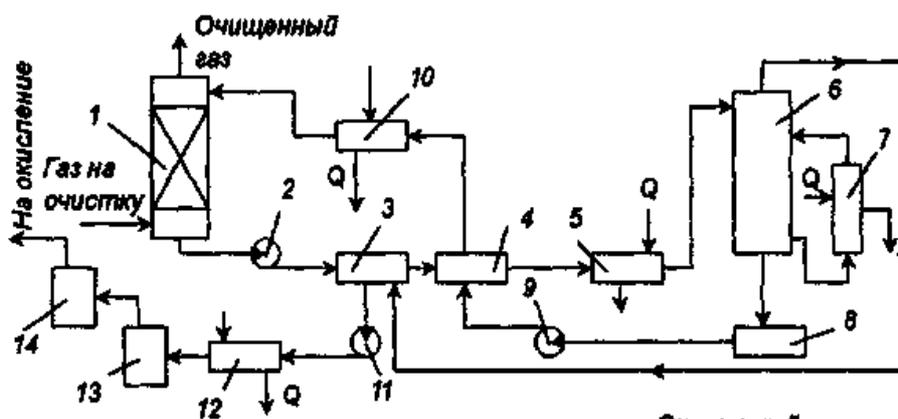


Вследствие различной растворимости  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и  $\text{KHCO}_3$  для абсорбции применяют растворы разной концентрации. Поташ лучше растворим в воде, поэтому применяются более концентрированные его растворы, которые имеют высокую поглотительную способность. Это позволяет уменьшить его расход, а также сократить расход пара на регенерацию поташа и расход энергии на перекачивание раствора.

Недостатком использования растворов поташа является их высокая стоимость. Исходя из этого, чаще используют содовый метод.

Если производится регенерация раствора без рекуперации сероводорода, то раствор нагревают в регенераторе, а из него воздухом отдувают сероводород. При этом некоторое количество сульфида натрия окисляется до тиосульфата, что приводит к понижению концентрации абсорбирующей жидкости, поэтому периодически ее заменяют свежей. Технологическая схема очистки газа от сероводорода вакуум-карбонатным методом с получением из сероводорода серной кислоты приведена на рисунке 5.8.

После очистки газа в абсорбере раствор подают в холодильник-конденсатор, где его подогревают за счет тепла конденсации паров, выделяющихся при регенерации поглотительного раствора. Затем раствор проходит теплообменник и подогреватель и поступает в регенератор. Раствор регенерируют кипячением под вакуумом (15,6 кПа). Регенерированный раствор направляют в емкость, а затем через теплообменник и холодильник — на орошение абсорбера.



1 — абсорбер; 2,9—насосы; 3 — холодильник-конденсатор; 4 — теплообменник; 5 — подогреватель; 6 — регенератор; 7 — циркуляционный подогреватель; 8—сборник; 10 — холодильник; 11 — вакуум-насос; 12 — холодильник; 13 — печь; 14 — котел-утилизатор

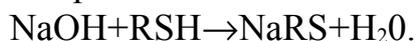
Рисунок 5.8 Схема установки очистки газа от сероводорода вакуум-карбонатным методом

Выделяющиеся при регенерации раствора пары сероводорода и воды отсасывают вакуум-насосом через конденсатор-холодильник, где конденсируется значительная часть паров воды. Далее пары поступают в холодильник, а затем в печь для сжигания сероводорода. Из печи газовая смесь, состоящая из диоксида серы, водяных паров, кислорода и инертных газов, при 900 °С поступает в котел-утилизатор, где охлаждается до 440-450 °С, а затем направляется на окисление в контактный аппарат. После окисления газы направляют на абсорбцию для получения серной кислоты.

**Очистка от сероуглерода и меркаптанов.** В газах могут содержаться следующие органические соединения серы: сероуглерод  $CS_2$  и серооксид углерода  $COS$ , меркаптаны  $RSH$ .

Сероуглерод малоактивен при обычной температуре, поэтому хемосорбционные методы его извлечения из воздуха малоэффективны. Газы, содержащие  $CS_2$  и  $COS$ , подвергают конверсии до  $H_2S$  с применением железохромового катализатора при 400-500 °С или медного при 600 °С. Затем образующийся  $H_2S$  поглощают щелочными растворами. Однако для очистки газов, содержащих  $CS_2$  и  $COS$ , наиболее экономичны абсорбционные методы.

Низшие меркаптаны хорошо растворяются в щелочах, но с увеличением молекулярной массы их растворимость уменьшается. Процесс протекает по реакции



При длительном контакте со щелочью (в присутствии кислорода и диоксида углерода) меркаптаны окисляются до дисульфидов и полисульфидов, плохо растворимых в щелочи



Абсорбцию проводят при скорости газа 0,3-0,4 м/с под давлением 1 МПа. При большом содержании в газах  $\text{CO}_2$  в абсорбере происходит образование соды, которую необходимо непрерывно удалять. Целесообразно проводить двухступенчатую очистку: на I ступени сорбировать  $\text{CO}_2$  моноэтаноламином, на II — производить щелочное поглощение меркаптана.

Для регенерации сорбента проводят десорбцию этилмеркаптана отдувкой паром или нагретым воздухом с подогревом раствора до 70-90 °С. Регенерацию проводят в насадочных или тарельчатых колоннах.

### 5.7 Улавливание туманов

Туманы образуются вследствие термической конденсации паров или в результате химического взаимодействия веществ, находящихся в аэродисперсной системе. Туманы образуются при производстве серной кислоты, термической фосфорной кислоты, при концентрировании различных кислот и солей, при испарении масел и др. [1].

Для улавливания туманов применяют волокнистые и сеточные фильтры-туманоуловители и мокрые электрофильтры. Принцип действия волокнистых фильтров-туманоуловителей основан на захвате частиц жидкости волокнами при пропускании туманов через волокнистый слой. При контакте с поверхностью волокна происходит коалесценция уловленных частиц и образование пленки жидкости, которая движется внутри слоя волокон и затем распадается на отдельные капли, которые удаляются с фильтра.

Достоинство фильтров: высокая эффективность улавливания (в том числе тонкодисперсных туманов), надежность в работе, простота конструкции, монтажа и обслуживания.

Недостатки: возможность быстрого зарастания при значительном содержании в тумане твердых частиц или при образовании нерастворимых солей вследствие взаимодействия солей жесткости воды с газами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HF}$  и др.).

Перемещение уловленной жидкости в фильтре происходит под действием гравитационной, аэродинамических и капиллярных сил, оно зависит от структуры волокнистого слоя (диаметра волокон, пористости и степени однородности слоя, расположения волокон в слое), скорости фильтрации, смачиваемости волокон, физических свойств жидкости и газа. При этом, чем больше плотность упаковки слоя и меньше диаметр волокон, тем больше жидкости удерживается в нем.

Волокнистые туманоуловители разделяют на низкоскоростные и высокоскоростные. Те и другие представляют собой набор фильтрующих элементов. Фильтрующие элементы низкоскоростного туманоуловителя включают две соосно расположенные цилиндрические сетки из проволоки диаметром 3,2 мм, приваренные к дну и входному патрубку. Пространство между сетками заполнено тонким волокном диаметром от 5 до 20 мкм с плотностью упаковки 100-400 кг/м<sup>3</sup> и толщиной слоя от 0,03 до 0,10 м. Волокна изготавливают из специальных стекол или полипропилена, полиэфира, поливинилхлорида, фторопласта и других материалов.

Фильтрующие элементы крепят на трубной решетке в корпусе колонны (до 50-70 элементов). Туманоуловители работают при скорости газа  $v_r < 0,2$  м/с и имеют производительность до 180000 м<sup>3</sup>/ч.

Высокоскоростные туманоуловители выполняются в виде плоских элементов, заполненных пропиленовыми войлоками. Их можно использовать для улавливания тумана кислот (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HF, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) и концентрированных щелочей. Войлоки выпускают из волокон диаметром 20, 30, 50 и 70 мкм.

Наиболее часто применяют двухступенчатые установки (с различными по конструкции фильтрами), которые могут быть двух типов. В установках первого типа головной фильтр предназначен для улавливания крупных частиц и снижения концентрации тумана. Второй фильтр служит для очистки от высокодисперсных частиц.

В установках второго типа первый фильтр служит агломератором, в котором осаждаются частицы всех размеров, а уловленная жидкость выносится потоком газов в виде крупных капель, поступающих во второй фильтр-брызгоуловитель. В фильтрах-брызгоуловителях используются войлоки из волокон диаметром 70 мкм. При скорости фильтрации 1,5-1,7 м/с сопротивление составляет 0,5 кПа, а эффективность очистки для частиц более 3 мкм близка к 100 %.

Для очистки от грубо дисперсных примесей брызг используют каплеуловители, состоящие из пакетов вязаных металлических сеток, из легированных сталей, сплавов на основе титана и других коррозионностойких материалов. Сетки (с диаметром проволоки 0,2-0,3 мм) гофрируют и укладывают в пакеты толщиной от 50 до 300 мм и в качестве сепараторов устанавливают в колонне. Для повышения эффективности улавливания тумана предусматривают две ступени сеточных сепараторов. Сепараторы эффективно работают при концентрации пара в газах не более 100-120 г/м<sup>3</sup>. Сетки могут быть изготовлены также из фторопласта и полипропилена.

Для улавливания тумана кислот применяют мокрые электрофильтры. По принципу действия они не отличаются от сухих электрофильтров.

### **5.8 Очистка отходящих газов от паров летучих растворителей**

Выбросы паров растворителей происходят при их хранении и при использовании в технологических процессах. Для их рекуперации наибольшее распространение получили методы адсорбции. Улавливание паров возможно любыми мелкопористыми адсорбентами: активными углями, силикагелями,

алюмогелями, цеолитами, пористыми стеклами и т.п. Однако активные угли, являющиеся гидрофобными адсорбентами, наиболее предпочтительны для решения этой задачи: при относительной влажности очищаемых паровоздушных или парогазовых потоков до 50 % влага практически не влияет на сорбируемость паров органических растворителей.

Поглощение паров летучих растворителей можно проводить в стационарных (неподвижных), кипящих и плотных движущихся слоях поглотителя, однако в производственной практике наиболее распространенными являются рекуперационные установки со стационарным слоем адсорбента, размещаемым в вертикальных, горизонтальных или кольцевых адсорберах. Адсорберы вертикального типа обычно используют при небольших потоках подлежащих очистке паровоздушных (парогазовых) смесей, горизонтальные и кольцевые аппараты служат, как правило, для обработки таких смесей при высоких (десятки и сотни тысяч кубометров в час) скоростях потоков. Рекуперационные установки с адсорберами периодического действия (со стационарным слоем адсорбента) работают по трем технологическим циклам: четырех-, трех- и двухфазному.

Четырехфазный цикл включает последовательно фазы адсорбции, десорбции, сушки и охлаждения. Адсорбцию проводят на активных углях. При десорбции из насыщенного адсорбента острым паром удаляют адсорбированный растворитель. При сушке нагретым воздухом из адсорбента вытесняют влагу, накапливающуюся в нем в фазе десорбции при конденсации части острого пара. Нагретый и обезвоженный поглотитель охлаждают атмосферным воздухом.

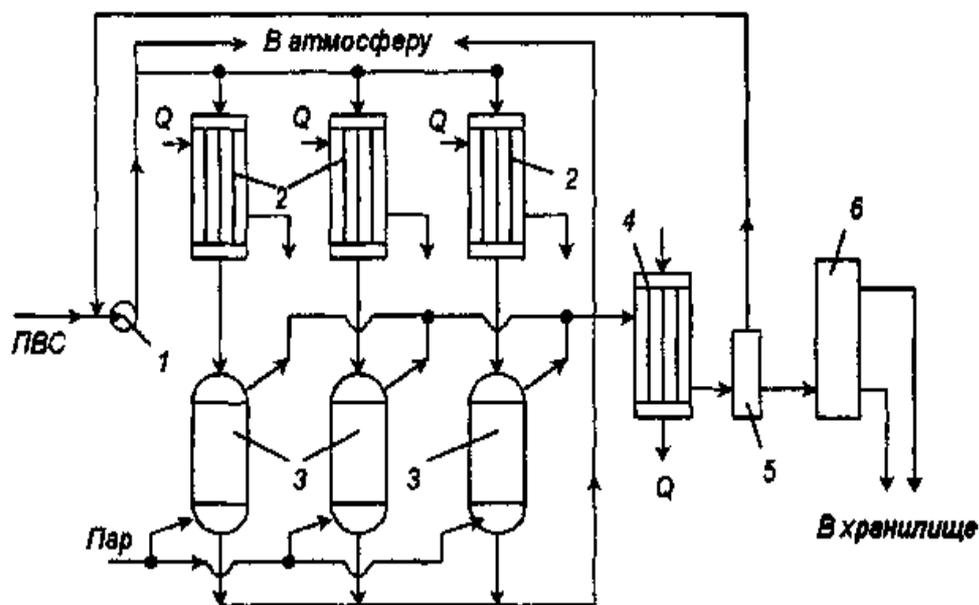
Трехфазный цикл имеет отличие от четырехфазного в том, что исключается одна из последних фаз четырехфазного цикла, например, процесс охлаждения адсорбента как самостоятельная фаза: слой поглотителя охлаждают при адсорбции отработанным (очищенным от паров растворителя) воздухом. Может исключаться и фаза сушки. В этом варианте после адсорбции производят нагрев насыщенного адсорбента горячим инертным газом с отводом паровой смеси в конденсатор. Такой процесс десорбции завершают затем продувкой слоя угля водяным паром. В последующей фазе охлаждения поглотитель обрабатывают холодным воздухом. Фазу сушки как самостоятельную стадию обычно исключают, если после десорбции адсорбент имеет относительно низкую влажность. В этом случае в фазе охлаждения достигается полная регенерация адсорбента.

Двухфазный цикл включает две стадии (операции): адсорбцию и десорбцию. При этом процесс адсорбции совмещают с сушкой и охлаждением поглотителя. С этой целью определенное время паровоздушную смесь подают в слой в нагретом состоянии (50-60 °С), а затем без подогрева, либо в течение всей фазы адсорбции паровоздушную смесь подают в слой при одинаковой температуре (до 35 °С).

Выбор того или иного цикла работы рекуперационной установки определяется характером подлежащих улавливаю растворителей, их содержанием в исходной паровоздушной смеси, особенностями и технико-экономическими возможностями производства, в технологии которого происходит образование паров летучих растворителей. Считают, что при относительно высоких концентрациях паров летучих растворителей в паровоздушных смесях (до 50 % нижнего концентрационного предела взрываемости) рационально использовать четырехфазный цикл, в случае средних и малых концентраций (2-3 г/м<sup>3</sup>) целесообразнее применять трехфазный цикл (с исключением фазы охлаждения). Двухфазный цикл с адсорбцией паров из паровоздушной смеси при одинаковой температуре (до 35 °С) может быть принят для рекуперации не смешивающихся с водой растворителей, а двухфазный цикл с подогревом паровоздушной смеси до 50-60 °С нерационален в связи с работой поглотителя в этих условиях с пониженной активностью.

С целью гарантирования непрерывности рекуперационного процесса установка улавливания паров летучих растворителей должна включать как минимум два адсорбера периодического действия (обычно их число составляет от 3 до 6 и более).

На рисунке 5.9 в качестве примера представлена схема адсорбционного отделения работающей по двухфазному циклу установки улавливания паров органических растворителей из паровоздушных смесей, образующихся при окраске кож нитроэмалями.



1 — вентилятор; 2 — калориферы; 3 — адсорберы; 4 — конденсатор, 5 — разделитель фаз, 6 — расслаиватель

Рисунок 5.9 Схема адсорбционного отделения установки улавливания паров органических растворителей из паровоздушных смесей процессов окраски кож нитроэмалями

В соответствии с этой схемой паровоздушную смесь с содержанием паров растворителей (бутилацетат, бутиловый спирт, толуол или бензол, этиловый спирт, ацетон)  $5-6 \text{ г/м}^3$  вентилятором через калориферы подают в адсорберы, заполненные активным углем AP-3, очищают в них и выбрасывают в атмосферу через выхлопную трубу. В начале процесса поглощения паровоздушную смесь в течение 2 ч подают в слой горячего и влажного поглотителя подогретой до  $50-60 \text{ }^\circ\text{C}$ , в течение последующего времени нагрев не производят (процесс насыщения длится 8-12 ч). Таким образом, параллельно с поглощением паров растворителей из очищаемой паровоздушной смеси в течение первой фазы этого цикла проводят высушивание и охлаждение поглотителя. По окончании адсорбции поглощенные растворители удаляют из угля острым паром. В течение этой второй фазы цикла температуру в адсорбере поддерживают между  $115$  и  $118 \text{ }^\circ\text{C}$ . Десорбцию прекращают при достижении плотности дистиллята, образующегося в конденсаторе, равной  $0,966 \text{ г/см}^3$ . Дистиллят (конденсат) из конденсатора через разделитель фаз и расслаиватель передают в хранилище, откуда часть продукта возвращают непосредственно в производство, а часть перекачивают в отделение ректификации для дальнейшей переработки.

## 5.9 Контрольные вопросы

- 1 Какова тенденция (и почему) загрязнения атмосферы  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$ ?
- 2 Перечислите методы очистки отходящих газов от  $\text{SO}_2$ .
- 3 Какие достоинства и недостатки имеются у известкового метода очистки дымовых газов от  $\text{SO}_2$ ?
- 4 Какие достоинства и недостатки имеет магнезитовый метод очистки дымовых газов ТЭС от  $\text{SO}_2$ ?
- 5 Какие достоинства и недостатки имеются у аммиачно-циклического метода очистки дымовых газов от  $\text{SO}_2$ ?
- 6 Перечислите методы очистки отходящих газов от  $\text{NO}_x$ .
- 7 Какие достоинства и недостатки имеет аммиачно-каталитический метод очистки от  $\text{NO}_x$ ?
- 8 Какие достоинства и недостатки имеет карбамидный метод очистки от  $\text{NO}_x$ ?
- 9 Приведите примеры режимных и технологических мероприятий, позволяющих существенно снизить количество образующихся в процессе горения  $\text{NO}_x$ .
- 10 Какие достоинства и недостатки имеются у метода прямого сжигания дымовых газов?
- 11 В чем отличие термического и термокаталитического обезвреживания отходящих газов от органических соединений?
- 12 Какие существуют методы Очистки отходящих газов от галогенов и их соединений?
- 13 С помощью, каких методов осуществляется очистка отходящих газов от сероводорода?

14 Приведите примеры очистки отходящих газов от сероорганических соединений.

15 Как осуществляется улавливание туманов?

16 С помощью, каких поглотителей осуществляется Очистка отходящих газов от паров летучих растворителей?

## **6 Дезодорация и обеззараживание газо-воздушных выбросов**

### **6.1 Методы и устройства для дезодорация и обеззараживание газо-воздушных выбросов**

**Обеззараживание** - инаktivация (дезактивация) микроорганизмов различных видов, находящихся в газовойоздушных выбросах, жидких и твердых средах.

**Дезодорация** - обработка одорантов (веществ, обладающих запахом), содержащихся в воздухе, воде или твердых средах, с целью устранения или снижения интенсивности запахов [1].

Дезодорация газо-воздушных выбросов (ГВВ), как правило, проводится для устранения запаха газовых потоков, содержащих примеси органических и неорганических веществ. Концентрация этих примесей в большинстве случаев ниже предельно допустимых значений, т. е. выбросы являются «чистыми» с точки зрения санитарных норм. Однако наличие запаха не позволяет выбрасывать такие отходящие газы в атмосферу без дополнительной обработки. Установки дезодорации, предназначенные для доочистки выбросов, снижают уровень загрязнения атмосферного воздуха одорантами.

Чаще всего для обеззараживания газо-воздушных потоков используют те же методы и устройства, что и для дезодорации.

Термические и термокаталитические методы применяются в основном при дезодорации газов, содержащих низкокипящие органические вещества, так как содержание высокомолекулярных и высококипящих органических соединений может привести к закоксуыванию поверхности катализатора продуктами их окисления. Кроме того, при неполном окислении высокомолекулярных веществ могут образовываться новые одоранты, обладающие еще более неприятным запахом, чем исходные вещества.

При термокаталитических методах дезодорации следует учитывать возможность отравления катализатора различными ядами (например, хлор-органическими соединениями). Присутствие в отходящих газах азот- и серосодержащих соединений может привести к образованию токсичных веществ. Эти методы используются для обработки небольших количеств ГВВ (до 10 тыс. м<sup>3</sup>/ч).

Перспективным комбинированным методом устранения запахов ГВВ является биосорбционная дезодорация - сочетание адсорбции одорантов различными сорбентами с последующим их биохимическим окислением ми-

кроорганизмами, образующими биопленку на поверхности сорбента. В качестве сорбентов используют торф, древесные опилки, шлам от очистных установок, компост, песок, камни, кокс, пластмассы, антрацит, активированный уголь и т. д.

Выбор вида микроорганизмов зависит от состава очищаемого газа. Так, при наличии в ГВВ значительных количеств аммиака используются бактерии-денитрификаторы, а серосодержащих соединений - бактерии-десульфаторы. Для нормальной жизнедеятельности микроорганизмов в среде должны присутствовать соединения, содержащие углерод, фосфор, азот в соотношении 100 : 1 : 5, а также кальций, магний, железо и другие элементы. Показатель кислотности среды рН поддерживается на уровне 6-8, концентрация кислорода - 0,5 - 1,0 мг/л. При этом в качестве источника углерода используются соединения, содержащиеся в ГВВ. Температура ведения процесса должна быть оптимальной для жизнедеятельности выбранного вида микроорганизмов.

Особенно широкое распространение получили биофильтры, снабженные носителем с фиксированными клетками микроорганизмов, в которых периодически производится увлажнение носителя и подпитка микроорганизмов.

Дезодорацию путем обычного биохимического окисления можно проводить в различных абсорберах. При биохимической дезодорации примесей в абсорбционной колонне суспензию аэробных бактерий помещают на тарелки либо на элементы насадки, над которыми расположены распылители, подающие питательный раствор и абсорбент.

Абсорбционно-окислительные методы дезодорации и обеззараживания основаны на поглощении газов водой или другими поглотителями. Они нашли самое широкое применение на предприятиях химической и микробиологической промышленности. Для этого может использоваться абсорбционное оборудование различных видов, рассмотренное ранее.

Для повышения эффективности абсорбционного метода в качестве абсорбента используют растворы многих окислителей (перманганата калия, оксида водорода, гипохлоритов натрия и кальция, галогенсодержащих соединений, кислот), а также кислород, озон и некоторые другие. Процесс обеззараживания и дезодорации перманганатом калия или гипохлоритом натрия проводится при рН < 6. Недостатками метода являются высокая стоимость окислителя, а также необходимость дополнительной обработки сточных вод для удаления диоксида марганца.

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. Процесс дезодорации в этом случае можно рассматривать как суммарный эффект окисления органических веществ и маскировки запаха НПВ.

Процесс дезодорации и обеззараживания ГВВ озоном осуществляют в газовой или жидкой фазах. Окисление НПВ (неприятнопахнущих веществ) в газовой фазе обычно проводят при низкой их концентрации в выбросах. В этом случае озон вводится во всасывающую линию газового тракта. При интенсивном перемешивании озона с ГВВ в вентиляторе (дымососе) эффективность дезодорации значительно повышается.

Газовоздушные выбросы вентилятором подаются во влагоотделитель и фильтр для удаления влаги, затем они поступают в один из двух многополочных адсорберов. В адсорберах попеременно происходит окисление НПВ с помощью озона, адсорбированного на силикагеле, и регенерация последнего озоном. Дезодорированный поток проходит санитарную обработку в реакторе каталитического окисления, где освобождается от остаточного содержания озона и выбрасывается в атмосферу. Для использования теплоты газовоздушного потока применяется теплообменник.

Недостатками метода газовой дезодорации являются низкая степень использования озона и необходимость в длительном времени контакта 15-25 с.

Абсорбционно-окислительный метод дезодорации и обеззараживания позволяет сократить время контакта ГВВ и окислителя от 30 до 3 с и снизить удельный расход озона. При этом для эффективной дезодорации и обеззараживания ГВВ необходима концентрация озона в жидкости 0,45 -1,0 г/м<sup>3</sup>.

В качестве примера на рисунке 6.1 представлена принципиальная схема установки дезодорации и обеззараживания ГВВ, разработанной в Белорусском государственном технологическом университете и внедренной на ряде предприятий республики и СНГ.

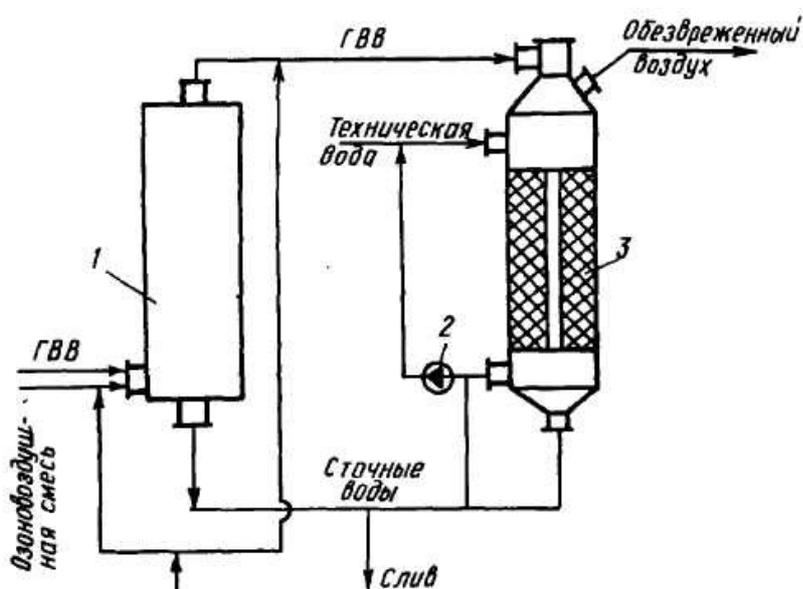


Рисунок 6.1 Принципиальная схема установки дезодорации и обеззараживания газовоздушных выбросов озоном

Данная установка включает газозфазный реактор 1, насос 2, абсорбер 3. Абсорбер представляет собой аппарат насадочного типа, в верхней части которого установлен центробежный распылитель. В качестве насадки используются керамические кольца Рашига размерами 50 x 50 x 5 мм с высотой слоя насадки 2000 мм. Насадка загружается на опорную решетку с диаметром отверстий 30 мм.

В центре аппарата имеется полое цилиндрическое пространство. На расстоянии 350 мм над насадкой расположены форсунки для распыливания жидкости.

Установка работает следующим образом. Газовоздушный поток и озон-воздушная смесь поступают из озонатора в газозход со встроенным завихрителем, где происходит их интенсивное перемешивание. Затем поток поступает в газозфазный реактор, представляющий собой вертикальный цилиндрический аппарат, в котором происходит окисление органических веществ в газозвой фазе. Время контакта - 5 - 6 с. Газовоздушный поток с частично окисленными НПВ и остаточным озоном после газозфазного реактора направляется по газозходу в абсорбер, орошаемый технической водой. В верхней части аппарата происходит перемешивание воздуха, содержащего озон, с тонкодиспергированными каплями жидкости. Затем газожидкостная смесь поступает прямококом на насадку, где происходит доулавливание НПВ и их окисление озоном в жидкой фазе. Кроме того, в жидкой фазе в зоне насадки происходит доулавливание непрореагировавшего озона. В установке предусмотрена подача озон-воздушной смеси в газозход перед абсорбером. Образующиеся сточные воды частично возвращаются в аппарат, а частично поступают на систему биологической очистки.

В некоторых случаях целесообразно использовать адсорбционно-окислительную дезодорацию ГВВ, которая проводится на твердых поглотителях с помощью озона. В качестве адсорбентов применяются активированный уголь, цеолиты, силикагели. Для повышения эффективности их пропитывают различными окислителями - перманганатами, гипохлоритами, пероксидами и др.

На рисунке 6.2 представлена схема адсорбционно-окислительной дезодорации.

Газовоздушные выбросы вентилятором 7 подаются во влагоотделитель 2 и фильтр 3 для удаления влаги, затем они поступают в один из двух многополочных адсорберов 4. В адсорберах попеременно происходит окисление НПВ с помощью озона, адсорбированного на силикагеле, и регенерация последнего озоном. Дезодорированный поток проходит санитарную обработку в реакторе каталитического окисления 5, где освобождается от остаточного содержания озона и выбрасывается в атмосферу. Для использования теплоты газовоздушного потока применяется теплообменник 6.

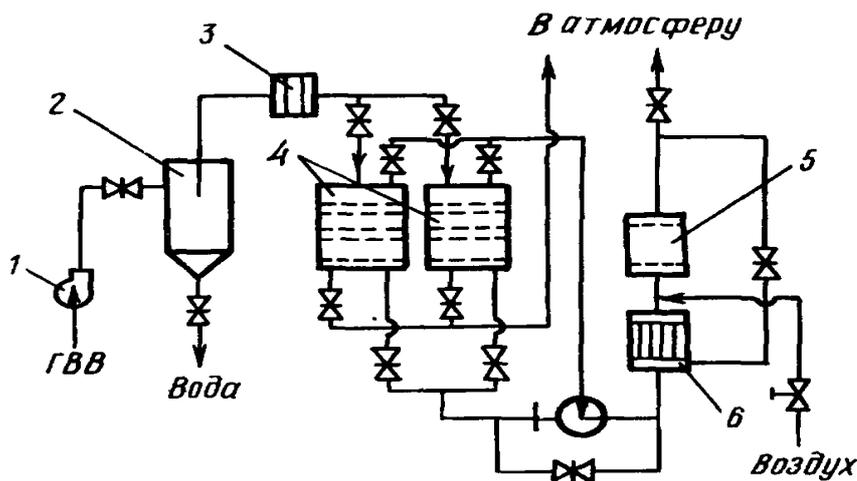


Рисунок 6.2 Принципиальная схема адсорбционно-окислительной дезодорации газовойоздушных выбросов

## 6.2 Контрольные вопросы

- 1 Что такое дезодорация и обеззараживание газовойоздушных выбросов?
- 2 В каких случаях возможно использование термических и термокаталитических методов?
- 3 В чем заключается биосорбционная дезодорация?
- 4 На чем основаны абсорбционно-окислительные методы дезодорации и обеззараживания газовойоздушных выбросов?
- 5 Как осуществляется процесс дезодорации и обеззараживания газовойоздушных выбросов озоном?

## 7 Эколого-экономическая эффективность мероприятий по защите воздушного бассейна

### 7.1 Экономический ущерб от загрязнения атмосферы

В силу своих естественных свойств атмосферный воздух в настоящее время не рассматривается в качестве объекта присвоения, поэтому отношения собственности по поводу атмосферного воздуха, а также процесс его экономического использования не регулируются законодательством.

Правовая охрана атмосферного воздуха представляет собой систему закрепленных законом мер, направленных на сохранение чистоты и улучшение состояния атмосферного воздуха, предотвращение и снижение вредных химических, физических, биологических и других воздействий на атмосферу, вызывающих неблагоприятные последствия для населения, народного хозяйства, растительного и животного мира.

Правовая охрана атмосферного воздуха включает в себя комплекс мер, основными из которых являются учет, контроль, установление нормативов в сфере охраны атмосферного воздуха, обеспечение выполнения экологических требований источниками вредного воздействия на атмосферный воздух, а также организация территории населенных пунктов, промышленных зон с учетом норм и правил охраны атмосферного воздуха.

Под **экономическим ущербом**, наносимым окружающей среде, понимаются выраженные в стоимостной форме фактические и возможные убытки, причиняемые народному хозяйству загрязнениями, или дополнительные затраты на компенсацию этих убытков. В настоящее время разработано 2 метода определения ущерба: метод прямого счёта и эмпирический метод укрупнённого счёта. Полный годовой экономический ущерб от загрязнения  $Y$  (р./год) определяется по формуле

$$Y = Y_3 \cdot v \cdot Q_m \quad (7.1)$$

где  $Y_3$  — удельный ущерб от загрязнения окружающей среды на единицу выбросов, р./т;

$v$  — масса выбросов на единицу продукции, т/т;

$Q_m$  — годовой выпуск продукции т/год.

Экономический ущерб может быть рассчитан по формуле

$$Y_{\text{Выб}} = Y_{\text{атм}} \cdot \alpha + Y_{\text{в}} \cdot \beta + Y_{\text{зем}} \cdot \gamma + Y_{\text{н}} \cdot \eta \quad (7.2)$$

где  $Y_{\text{Выб}}$  — экономический ущерб от массы всех видов выбросов, поступающих в природную среду от отдельного источника или предприятия в целом, р./год;

$Y_{\text{атм}}$  — экономический ущерб, причиняемый выбросом загрязнений в атмосферный воздух, р./год;

$Y_{\text{в}}$  — экономический ущерб, причиняемый годовым сбросом загрязняющих веществ в водные источники, р./год;

$Y_{\text{зем}}$  — экономический ущерб от годового нарушения и загрязнения земельных ресурсов, р./год;

$Y_{\text{н}}$  — экономический ущерб от годового нарушения и загрязнения недр, р./год;

$\alpha, \beta, \gamma, \eta$  — поправочные коэффициенты на степень достоверности укрупнённого метода определяются как соотношение между показателем ущерба, определённого методом укрупнённого счёта, и показателем ущерба, определённого методом прямого счёта.

Экономический ущерб, причиняемый выбросом загрязнений в атмосферный воздух для всякого источника, определяется методом укрупнённого счёта по формуле

$$Y_{\text{атм}} = K \cdot r \cdot f \cdot M \quad (7.3)$$

где  $K$  — константа, численное значение которой может меняться в зависимости от роста цен, р./усл. т;

$\gamma$  — коэффициент относительной опасности, зависящий от типа территории и равный для курортов и заповедников — 10, для пригородных зон и зон отдыха — 8, для лесов — 0,2-0,0025, для пашен — 0,25 и садов — 0,5;

$f$  — безразмерный коэффициент, учитывающий характер рассеивания примеси в атмосфере. Его величина зависит от скорости оседания частиц, высоты их выбросов от земли, температуры газа. В частности для частиц, оседающих со скоростью 1-20 см/с, она находится в пределах 0,89-4, для частиц, оседающих со скоростью менее 1 см/с, — 1-0,08;

$M$  — приведённая масса годового выброса загрязнений из источника усл. т/год.

Величина приведённой массы выброса загрязнений в атмосферу определяется по формуле

$$M = \sum_{I=1}^N A_I \cdot m_I \quad (7.4)$$

где  $N$  — общее число загрязнителей;

$A_i$  — безразмерный показатель относительной активности примеси  $i$ -го вида, который для окиси углерода принимается равным 1, для сернистого ангидрида — 22, сероводорода — 54,8, паров фтора — 980, коксовой и агломерационной пыли — 100 и т. п.;

$m_i$  — масса годового вредного выброса  $i$ -го вида загрязняющего вещества в атмосферу, т/год.

## 7.2 Платежи за выбросы загрязняющих веществ

При выбросах загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников платежи за выбросы загрязняющих веществ в размерах, не превышающих допустимые нормативы выбросов (ПДВ), определяют по формуле

$$\Pi_{\text{ПДВ}} = \sum_{i=1}^n K_{\gamma} \cdot H_{\text{ндр}} \cdot M_i \quad (7.5)$$

при  $M_i < M_{\text{ПДВ}}$

где  $\Pi_{\text{ПДВ}}$  - нормативные суммарные платежи за выбросы загрязняющих веществ в размерах не превышающих ПДВ;

$n$  - вид загрязняющего вещества;

$K_{\gamma}$  - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферы в данном районе;

$H_{\text{ПДВ}}$  - базовый норматив платы за выброс 1 тонны  $i$ -го загрязняющего вещества в размерах, не превышающих ПДВ, р./т;

$M_i$  - фактический выброс  $i$ -го загрязняющего вещества, т/год;

$M_{\text{пдв}}$  - предельно-допустимый выброс  $i$ -го загрязняющего вещества, т/год.

Платежи за выбросы загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов (ВСВ) определяют по формуле

$$P_{\text{всв}} = \sum_{I=1}^n K_{\text{э}} \cdot H_{\text{л}} \cdot (M_I - M_{\text{пдв}}) \quad (7.6)$$

при  $M_{\text{пдв}} < M_i < M_{\text{всв}}$

где  $P_{\text{всв}}$  - платежи за выбросы загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов (ВСВ), р./год;

$H_{\text{л}}$  - базовый норматив платы за выброс 1 тонны в год  $i$ -го загрязняющего вещества в пределах установленного лимита (ВСВ);

$M_{\text{всв}}$  выброс  $i$ -го загрязняющего вещества в пределах установленного лимита, т/год.

Платежи за сверхлимитный выброс  $P_{\text{сл}}$  определяют по формуле

$$P_{\text{сл}} = \sum_{I=1}^n 5 \cdot K_{\text{э}} \cdot H_{\text{л}} \cdot (M_I - M_{\text{пдв}}) \quad (7.7)$$

Общие платежи  $P_{\text{А}}$  за загрязнение атмосферного воздуха от стационарных источников определяются по формуле

$$P_{\text{А}} = P_{\text{пдв}} + P_{\text{всв}} + P_{\text{сл}}, \text{ р./год} \quad (7.8)$$

Платежи за допустимые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу технически исправного транспортного средства, отвечающего действующим стандартам и ТУ завода изготовителя определяется по формуле

$$P_{\text{тр}} = \sum_{I=1}^j Y_e * T_e * K_e * K_a \quad (7.9)$$

где  $P_{\text{тр}}$  - платежи за допустимые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от передвижных источников, р.;

$Y_e$  – удельные платежи за допустимые выбросы загрязняющих веществ, образующихся при использовании 1 т  $j$ -го вида топлива, р./т;

$T_e$  – количество  $i$ -го вида топлива, израсходованного передвижным источником за отчетный период, т;

$K_e$  – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферы в данном регионе;

$K_a$  – коэффициент индексации платы за загрязнение окружающей природной среды.

В качестве основных нормируемых загрязняющих веществ для передвижных источников рассматриваются: оксиды углерода и азота, углеводороды, сажа, соединения свинца, диоксид серы.

При отсутствии данных о количестве израсходованного топлива плату за выбросы загрязняющих веществ от передвижных источников определяют типом транспортного средства и рассчитывают по формуле

$$P_{\text{тр.н}} = \sum_{i=1}^j \frac{B}{12} * N_i * \Gamma_i \quad (7.10)$$

где  $B$  – период (месяц), за который взимается плата за выброс;

$N_j$  – количество единиц, шт. транспортного средства  $j$ -го вида;

$\Gamma_j$  – годовая плата за  $j$ -е транспортное средство, р./год.

Плата за превышение допустимых выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников определяется по формуле

$$P_{\text{снтр}} = \sum_{i=1}^n 5 \cdot P_{\text{нi}} \cdot d_i \quad (7.11)$$

где  $P_{\text{снтр}}$  — плата за превышение допустимых выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников, р.;

$i$  — тип транспортного средства;

$P_{\text{нi}}$  — плата за допустимые выбросы от  $i$ -го типа транспортного средства, р.;

$d_i$  — доля транспортных средств  $i$ -го типа, не соответствующих стандартам. Она определяется как соотношение количества транспортных средств, не соответствующих требованиям стандартов, к общему количеству проверенных транспортных средств.

Общая плата за выбросы загрязняющих веществ от передвижных источников определяется по формуле

$$P_{\text{об тр}} = P_{\text{снтр}} + P_{\text{тр}} \quad (7.12)$$

При использовании для обезвреживания отработавших газов двигателя передвижного источника устройств нейтрализации к платежам применяются понижающие коэффициенты:

- для автотранспорта, использующего неэтилированный бензин и газовое топливо — 0,05;

- для остальных транспортных средств — 0,1.

При проведении других мероприятий по снижению токсичности отработавших газов величина платы за выброс уменьшается в количество раз, соответствующее подтвержденной эффективности данного мероприятия.

### 7.3 Экономическая оценка эффективности природоохранных мероприятий

Расчёт экономического эффекта природоохранных мероприятий основывается на сопоставлении затрат на их осуществление с экономическим результатом, достигнутым благодаря этим мероприятиям. Этот результат выражается величиной ликвидированного или предотвращённого экономического ущерба от нарушения или потерь ресурса.

Превышение экономического результата над затратами на его достижение свидетельствует об экономической эффективности природоохранного мероприятия. Разность между результатом и затратами характеризует экономический эффект.

Общая (абсолютная) экономическая эффективность  $\mathcal{E}_s$  определяется как отношение годового полного экономического эффекта к приведённым затратам на осуществление мероприятия по следующей формуле

$$\mathcal{E}_s = \frac{\mathcal{E}}{C + E_n \cdot K} \quad (7.13)$$

где  $\mathcal{E}$  — эффект, полученный в течение года;

$C$  — текущие затраты в течение года;

$K$  — капитальные вложения, определившие эффект;

$E_n$  — норматив эффективности для приведения капитальных вложений к годовой размерности.

В общем случае капитальные затраты представляют собой совокупность затрат на создание новых и расширение, реконструкцию действующих основных производственных и непроизводственных фондов. Соответственно капитальные затраты (капитальные вложения) на природоохранные мероприятия — это совокупность затрат на создание новых и реконструкцию, расширение действующих основных производственных фондов (ОПФ) природоохранного назначения [9].

При этом в качестве природоохранных мероприятий (ПОМ) рассматриваются все виды хозяйственной деятельности, направленные на снижение и ликвидацию отрицательного антропогенного воздействия предприятия на ОС, сохранение, улучшение и рациональное использование природно-ресурсного потенциала и т.д. Перечень конкретных ПОМ определяется и согласуется отдельно в случае каждого предприятия (утверждается план природоохранных мероприятий).

К капитальным затратам природоохранного назначения (т.е. капитальным затратам, направляемым на предотвращение или ликвидацию последствий негативного воздействия на ОС) относятся единовременные затраты на:

— создание новых, реконструкцию и расширение действующих основных фондов по охране ОС;

— модификацию технологии производства, проводимую исключительно с целью снижения негативного воздействия на ОС;

— модификацию технологии производства в части, обеспечивающей снижение негативного воздействия.

Если рассматриваются многоцелевые мероприятия, то капитальные затраты средозащитного назначения выделяются из общей суммы на основе расчетов с использованием данных о проектах-аналогах. При расчете природоохранных капитальных вложений (затрат на проведение ПОМ) на перспективу необходимо учитывать следующие важные факторы:

— изменение состояния ОС в результате роста производства, введения комплекса ПОМ;

— изменение численности населения;

— повышение требований к качеству ОС;

— развитие науки и техники в данной отрасли.

В составе капитальных затрат природоохранного назначения выделяются пред- и постзатраты. Под предзатратами понимаются затраты, направленные на предотвращение негативных воздействий на ОС. К постзатратам относятся затраты на ликвидацию последствий негативных воздействий.

Капитальные затраты природоохранного назначения могут быть разделены на следующие направления:

- затраты на проведение НИОКР;

- затраты на монтаж природоохранной техники;

- затраты на природозащитные установки, аппараты, вспомогательное оборудование, оборудование для постоянного резерва;

- прочие расходы (налоги, стоимость транспортировки, расходы на отвод земельных участков).

Текущие затраты предприятия на охрану ОС. К текущим затратам относят затраты, связанные с использованием в процессе производства энергии, топлива, материалов, труда, а также затраты на реализацию продукции. Выраженные в денежной форме текущие затраты предприятия на производство и сбыт продукции представляют собой себестоимость.

Текущие затраты на природоохранную деятельность — это сумма затрат, связанных с выполнением ПОМ в производственной и непроизводственной сферах. Распределение текущих затрат по видам представлено на рисунке 7.1.

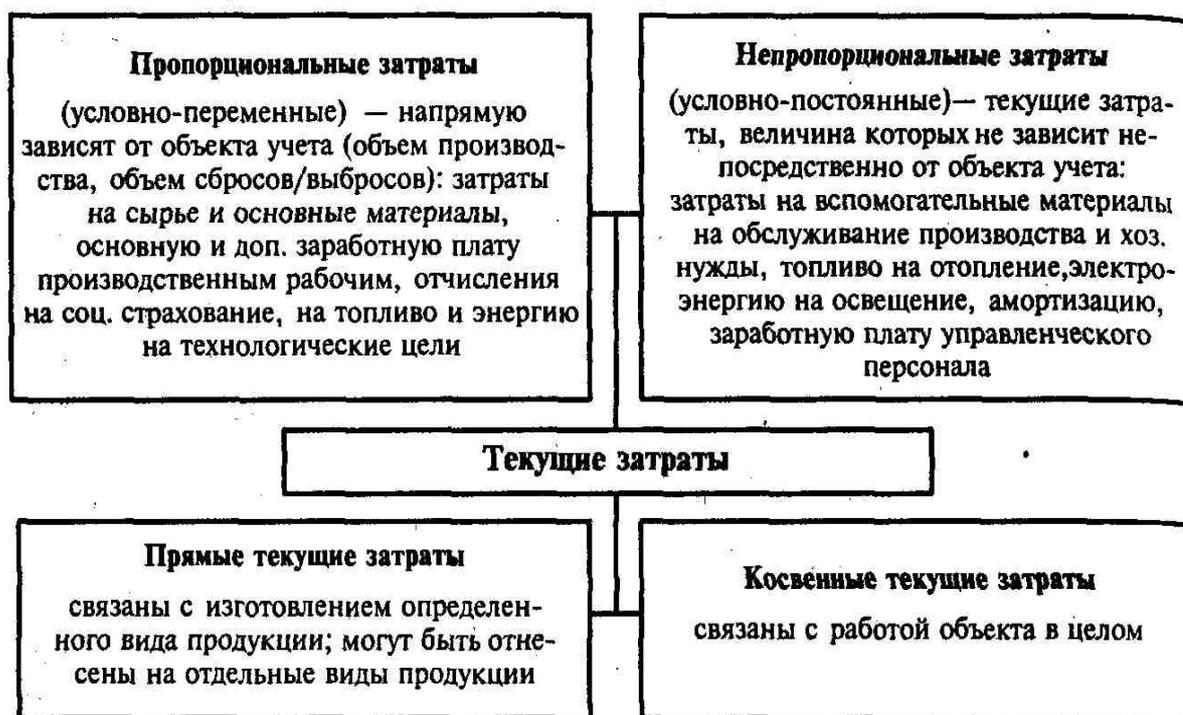


Рисунок 7.1. Виды текущих затрат на предприятии

В целом к текущим затратам природоохранного назначения отнесены следующие виды:

- на содержание и обслуживание основных фондов природоохранного назначения (основная и дополнительная заработная плата обслуживанию персонала, планово-предупредительный, текущий и капитальный ремонт, амортизационные отчисления на полное восстановление, энергетические расходы и др.);

- на осуществление мероприятий по улучшению качества элементов ОС, относимые за счет основной деятельности либо за счет финансирования из бюджета и других источников;

- дополнительные затраты на эксплуатацию ОПФ при совершенствовании производственных технологий в целях снижения нагрузки на ОС;

- затраты на оплату услуг по охране ОС.

Если эффект  $\mathcal{E}$  является результатом проведения долговременного мероприятия, растянувшегося на несколько лет, то можно рассчитать интегральный эффект  $E\mathcal{E}$  за период, превышающий срок окупаемости  $t = \frac{1}{E_n}$ . Тогда эффективность затрат определится по формуле

$$\mathcal{E}_3 = \frac{\sum \mathcal{E}}{\sum (C+K)} \quad (7.14)$$

Первичный эффект  $\mathcal{E}_{п.э}$ , т. е. эффект от снижения отрицательного воздействия на среду (например, от снижения загрязнения), рассчитывается по выражению

$$\mathcal{E}_{\text{э}} = \frac{\Delta B}{C + E_{\text{н}} \cdot K} \quad (7.15)$$

где  $\Delta B$  — снижение показателя отрицательного воздействия на среду (например, предельно допустимой концентрации вредных веществ в атмосфере или воде).

Этот же первичный эффект может быть выражен следующей формулой

$$\mathcal{E}_{\text{э}} = \frac{P}{C + E_{\text{н}} \cdot K} \quad (7.16)$$

где  $P$  — показатель, характеризующий улучшение состояния окружающей среды в данной местности.

Экономический эффект, получаемый от сокращения ущерба  $\Delta Y$  и увеличения прибыли предприятия  $\Delta \Pi$ , может быть определен по формуле

$$\mathcal{E} = \Delta Y + \Delta \Pi / (C + E_{\text{н}} \cdot K) \quad (7.17)$$

Количественная оценка уровня природопользования производится с помощью систем показателей, определяющих затраты ресурсов на присвоение продукта и затраты на его возврат природе. Отсюда эффективность природопользования определяется основными показателями, приведенными ниже:

- 1) ресурсоемкость;
- 2) землеемкость;
- 3) энергоемкость;
- 4) ущербоемкость;
- 5) отходоемкость.

Удельное потребление природных ресурсов (ресурсоемкость)

Показатель удельного потребления природных ресурсов (ресурсоемкость) рассчитывается по формуле

$$R_{\text{пр}} = \frac{B_{\text{п}}}{P} \quad (7.18)$$

где  $R_{\text{пр}}$  — удельное потребление данного вида природного ресурса на единицу готовой продукции для большинства видов готовой продукции имеет нормативный характер, т/т, т/шт, м<sup>3</sup>/т, м<sup>3</sup>/шт и т.д.;

$B_{\text{п}}$  — расход данного вида ресурсов на производство продукции, г, кг, т, м<sup>3</sup> и др.;

$P$  — объем валовой продукции, т, шт, м, м<sup>3</sup> и т.д.

Степень извлечения полезных компонентов из природного сырья, % определяется по формуле

$$C_u = \frac{K_u}{K_n} \quad (7.19)$$

где  $K_u$  и  $K_n$  — соответственно число компонентов, извлеченных из природного сырья и содержащихся в нем.

С учетом ценности извлекаемых компонентов приведенная формула преобразуется в следующий вид

$$C_u = \frac{\sum_{l=1}^m K_l \cdot P_l}{\sum_{l=1}^n K_l \cdot P_l} \quad (7.20)$$

где  $K_l$  — компоненты, извлекаемые из сырья;

$P_l$  — ценность полезного компонента в сырье;

$m$  и  $n$  — число полезных компонентов, соответственно содержащихся в сырье и извлекаемых из него.

Показатель выхода конечной продукции на единицу природного ресурса определяется по формуле

$$P_y = \frac{D_{\Pi}}{P_{\Pi}} \quad (7.21)$$

где  $D_{\Pi}$  — объем валовой продукции, т, м<sup>3</sup>, шт;

$P_{\Pi}$  — базовый природный ресурс, используемый для производства основного продукта.

Показатель степени восстановления (воспроизводства) природных ресурсов, которые изменены за счет антропогенного воздействия

$$C_{\varepsilon} = \frac{P_{\varepsilon}}{P_a} \quad (7.22)$$

где  $P_{\varepsilon}$  — число восстановленных ресурсов;

$P_a$  — общее число природных ресурсов, подвергающихся воздействию.

Показатель экономии первичных природных ресурсов на основе применения технологий

$$P_3 = P_1 - P_2 \quad (7.23)$$

где  $P_1$  — объем потребляемых ресурсов при базисной технологии и базисном уровне использования вторичных ресурсов;

$P_2$  — объем потребления ресурсов при использовании новой (малоотходной) технологии и дополнительном вовлечении вторичных ресурсов.

Показатель землеемкости производства в общем виде он определяется по следующему соотношению

$$z = \frac{S}{V_{пр}} \quad (7.24)$$

где  $S$  - земельная площадь, занимаемая производством, комплексом или отраслью;

$V_{пр}$  — объем продукции.

Аналогично показателю землеемкости рассчитывается энергоемкость как отношение объемов затрачиваемой энергии к объемам производства.

Кроме перечисленных показателей экологичности, используют оценки экономических ущербов компонентам ОС и результирующий, удельный экономический ущерб, приходящийся на 1 т конечной продукции (ущербоемкость)

$$y = \frac{Y_{общ}}{M \cdot T} \quad (7.25)$$

где  $M$  — производственная мощность предприятия, т/год;

$T$  — время существования предприятий, годы.

Иногда удельный ущерб оценивается по отношению к прибыли величине оборотных средств производства.

Отходоёмкость производства в общем случае определяется отношением объема образующихся отходов к существующему объему производств

$$Q = \frac{V_{отх}}{V_{пр}} \quad (7.26)$$

где  $V_{отх}$  — объем образующихся отходов;

$V_{пр}$  — существующий объем производства.

Дополнительными показателями экологичности производственных процессов могут явиться давно применяемые на практике коэффициент замкнутости ( $K_3$ ) и коэффициент оборота ( $K_0$ ) природных ресурсов. Первый из них определяется по формуле

$$K_3 = \frac{M_i}{M_{сi}} \quad (7.27)$$

где  $M_i$  и  $M_{сi}$  — массы  $i$ -го вида готовой продукции и сырья, используемые в технологическом процессе соответственно.

Коэффициент оборота природных ресурсов определяется по формуле

$$K_o = \frac{M_o}{M_c} + M_o \quad (7.28)$$

где  $M_o$  и  $M_c$  — массы сырья, находящегося в обороте и забираемого из природных комплексов соответственно. Коэффициент оборота должен стремиться к его возможному максимуму.

#### 7.4 Контрольные вопросы

- 1 Что такое экономический ущерб от загрязнения?
- 2 Как определяется экономический ущерб от загрязнения?
- 3 Как определяются размеры платежей за загрязнение атмосферы?
- 4 Отличается ли их размер для стационарных и передвижных источников?
- 5 Как соотносятся размеры платежей предприятия за загрязнение окружающей среды и размеры экономического ущерба от загрязнения?
- 6 Какие затраты относятся к капитальным затратам природоохранного назначения?
- 7 Приведите пример текущих природоохранных затрат.
- 8 Как осуществляется расчёт экономического эффекта природоохранных мероприятий?
- 9 По каким признакам может проводиться оценка экологической безопасности предприятия?
- 10 Приведите примеры таких характеристик и поясните их значение.
- 11 На основе, каких показателей проводится эколого-экономический анализ предприятия?

## Заключение

Достижения научно-технического прогресса, с одной стороны, способствуют удовлетворению всевозрастающих потребностей общества в целом и каждого индивида в отдельности, с другой стороны, заведомо отрицательно воздействуют на процессы, протекающие в биосфере, ведут к нарушению ее стабильности. Все технологические процессы и операции до недавнего времени разрабатывались безо всякой оглядки на их воздействие на окружающую среду. Поэтому потребовалось всего лишь несколько десятков лет промышленной революции, чтобы разрушить или дестабилизировать биосферные механизмы, привести к нарушению исторически сложившихся закономерностей в живой природе.

В целях сокращения выбросов загрязнений в биосферу и поддержания качества окружающей среды проектирование и эксплуатация промышленных процессов должны осуществляться на основе более чистого производства. Это такое производство, в котором технически достигнут возможный в настоящее время минимальный объем газообразных, жидких, твердых и тепловых отходов в процессах переработки природного сырья.

В общем виде это связано с:

- 1) модификацией процесса — изменение процесса для минимизации или прекращения образования отходов;
- 2) модификацией технологии — изменение технологии производства для минимизации или прекращения образования отходов;
- 3) организацией производства — изменение методов хозяйствования для минимизации или прекращения образования отходов;
- 4) заменой факторов — изменение материалов процесса для минимизации количества или потенциального риска образованных отходов;
- 5) повторным использованием на месте — рециклирование отходов в рамках предприятия;
- 6) повторным использованием вне — рециклирование отходов вдали от предприятия.

Таким образом, это способствует сокращению воздействия или риска воздействия на работников, местные сообщества и окружающую среду в целом путем предотвращения загрязнения там, где оно впервые возникает.

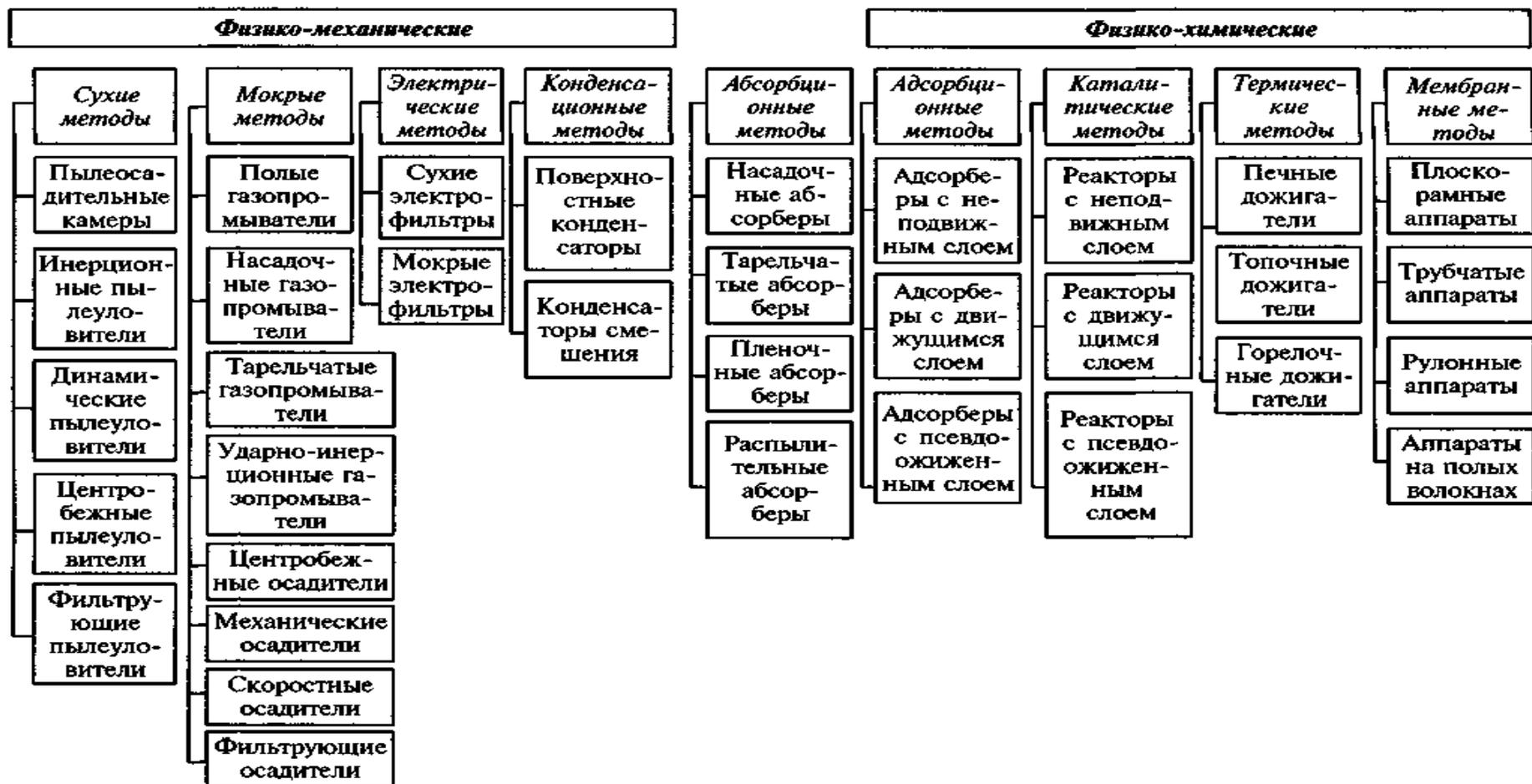
## Список использованных источников

1. Основы промышленной экологии [Текст]: учеб. пособие / А.А. Челноков, Л.Ф. Ющенко Мн: Выш. Шк., 2001. – 343 с.
2. Родионов А.И. Технологические процессы экологической безопасности [Текст] / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, В.Г. Систер - Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. - 800 с.
3. Зайцев В.А. Промышленная экология [Текст] / В.А. Зайцев М.: РХТУ, 2000.-131 с.
4. Калыгин В.Г. Промышленная экология [Текст] / В.Г. Калыгин М: МНЭПУ, 2000.- 40 с.
5. Дежкин В.В. Промышленная экология [Текст] / В.В. Дежкин М.: МНЭПУ, 2000 - 96 с.
6. Луканин В.Н. Промышленно-транспортная экология [Текст] / В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко М.: Выш. Шк., 2001. - 273 с.
7. Гридэл Т.Е. Промышленная экология [Текст]: учеб. пособие для вузов: пер. с англ. / под ред. проф. Э.В. Гирусова; Т.Е. Гридэл, Б.Р. Алленби М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2004.- 527 с.
8. Хван Т.А. Промышленная экология [Текст] / Т.А. Хван – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – 320 с.
9. Редина М.М. Экономика природопользования [Текст] / М.М. Редина, А.П. Хаустов М.: Выш. Шк., 2006. - 271 с.
10. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды [Текст] / А.Г. Ветошкин М.: Выш. Шк., 2008. - 397 с.
11. Зайцев В.А. Промышленная экология [Текст] / В.А. Зайцев, Н.А. Крылова М.: РХТУ, 2002.-175 с.
12. Зимон А.Д. Аутогезия сыпучих материалов [Текст] / А.Д. Зимон, Е.И. Андриянов М.: Metallurgy, 1978. – 288 с.
13. Голицын А.Н. Основы промышленной экологии [Текст] / А.Н. Голицын. М.: ИРПО, 2002. – 240 с.
14. Зайцев В.А. Введение в промышленную экологию [Текст] / В.А. Зайцев, С.В. Макаров М.: МХТИ, 1983.-68 с.
15. Борисова Л.Б. Исследование закономерностей формирования примесей в атмосфере промышленного города и разработка решений по управлению ее качеством (на примере Оренбургской области) автореф. дисс. к.т.н. / Л.Б. Борисова Оренбург, 2000. - 21 с.

# Приложение А

(обязательное)

Рисунок А.1 Классификация методов и оборудования для очистки газов от вредных примесей



## Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 Классификация антропогенных видов загрязнений окружающей среды

Загрязнение	Определение
1	2
Механическое	Засорение среды агентами, оказывающими лишь механическое воздействие без химико-физических последствий (например, мусором)
Химическое	Изменение химических свойств среды, оказывающих отрицательное воздействие на экосистемы и технологические устройства
Физическое	Изменение физических параметров среды: температурно-энергетических (тепловое или термальное), волновых (световое, шумовое, электромагнитное), радиационных (радиационное или радиоактивное) и т. п.
Тепловое (термальное)	Повышение температуры среды, главным образом в связи с промышленными выбросами нагретого воздуха, отходящих газов и воды; может возникать и как вторичный результат изменения химического состава среды
Световое	Нарушение естественной освещенности местности в результате действия искусственных источников света; может приводить к аномалиям в жизни растений и животных
Шумовое	Увеличение интенсивности шума сверх природного уровня; у человека приводит к повышению утомляемости, снижению умственной активности и при достижении 90... 100 дБ — к постепенной потере слуха
Электромагнитное	Изменение электромагнитных свойств среды (от линий электропередачи, радио и телевидения, работы некоторых промышленных установок и др.) приводит к глобальным и местным географическим аномалиям и изменениям в тонких биологических структурах
Радиационное	Превышение естественного уровня содержания в среде радиоактивных веществ
Биологическое	Проникание в экосистемы и технологические устройства видов животных и растений, чуждых данным сообществам и устройствам

Продолжение таблицы Б.1

1	2
Биотическое	Распространение определенных, как правило, нежелательных с точки зрения людей биогенных веществ (выделений, мертвых тел и др.) на территории, где они ранее не наблюдались
Микробиологическое	Появление необычайно большого количества микроорганизмов, связанное с их массовым размножением на антропогенных субстратах или в средах, измененных в ходе хозяйственной деятельности человека
	Приобретение ранее безвредной формой микроорганизмов патогенных свойств или способности подавлять другие организмы в сообществах

Все перечисленные виды загрязнений взаимосвязаны, и каждый из них может явиться исходным фактором для возникновения других видов загрязнения. В частности, химическое загрязнение атмосферы может способствовать повышению вирусной активности и, следовательно, биологическому загрязнению.

## Приложение В

(справочное)

Таблица В1 Значения ПДКсс и классов опасности загрязняющих веществ

Вещество	ПДКсс, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности
1	2	3
Аммиак	0.04	4
Ацетон	0.35	4
Аэрозоль краски	0.015	3
Бенз(а)пирен	0.000001	1
Бензин нефтяной	1.5	4
Бензол	0.1	2
Взвешенные вещества	0.15	3
Гексан	60.0	4
Диоксид азота	0.04	2
Диоксид серы	0.05	3
Зола	0.15	3
Кислота уксусная	0.2	3
Ксилол	0.2	3
Мазутная зола	0.002	4
Мазутная зола (на ванадий)	0.002	4
Марганец	0.001	2
Метан	0.5	3
Метанол	0.5	3
Оксид азота	0.06	3
Оксид ванадия	0.002	1
Оксид железа	0.04	3
Оксид марганца	0.001	2
Оксид углерода	3.0	4
Оксид хрома	0.0015	1
Пыль	0.15	3
Пыль (SiO <sub>2</sub> от 20 до 70%)	0.1	3
Пыль (сод. SiO <sub>2</sub> > 70%)	0.05	3
Пыль абразивная	0.05	3
Пыль древесная	0.1	4
Пыль зерновая	0.15	3
Пыль известковая	0.6	3
Пыль каменноугольная	0.15	3
Пыль коксовая	0.15	3
Пыль летучая (зола)	0.15	3
Пыль металлическая	0.04	3

Продолжение таблицы В.1

1	2	3
Пыль мучная	0.5	3
Пыль неорганическая	0.15	3
Пыль серы	0.1	3
Пыль формовочная	0.15	3
Ртуть (II) амидохлорид в пересчете на ртуть	0.0003	1
Сажа	0.05	3
Сварочный аэрозоль	0.15	3
Свинец	0.0003	1
Селен диоксид в пересчете на селен	$5 \cdot 10^{-5}$	1
Серная кислота	0.1	2
Сероводород	0.008	2
Серовуглерод	0,005	2
Смесь природных меркаптанов	$5 \cdot 10^{-5}$	3
Толуол	0.6	3
Углеводороды	50	4
Углеводороды (по метану)	50	4
Углеводороды C1-C5 пред.	1.0	4
Углеводороды C6-C10 пред.	1.0	4
Угольная зола	0.05	2
Уксусная кислота	0.06	3
Фенол	0.003	2
Формальдегид	0.003	2
Фтористые соединения	0.005	2
Фтористый водород	0.005	2
Хлор	0.03	2
Хром (VI)	0.0015	1
Цинк оксид (в пересчете на цинк)	0.05	3
Этанол	5.0	4
Этоксигэтан	0.6	4

## Приложение Г

(обязательное)

### Тестовые задания

- Г.1 Какие системы являются предметом изучения промышленной экологии?
- а) эколого-экономические;
  - б) экологические;
  - в) экономические.
- Г.2 Экологический кризис является противоречием между следующими системами
- а) экологией и экономикой;
  - б) экономикой и предприятием;
  - в) человеком и предприятием.
- Г.3 Назовите физико-химическое состояние загрязнителей воздуха:
- а) Эмульсия, растворы, суспензия;
  - б) Газы, аэрозоли, твердые частицы (пыль);
  - в) Растворы, эмульсии, твердые частицы (пыль).
- Г.4 Причины выпадения кислотных дождей:
- а) Из-за инверсии температуры в тропосфере;
  - б) Из-за загрязнения воздуха оксидами серы и азота;
  - в) Из-за образования осадков в зоне морских акваторий.
- Г.5 Инверсия температуры в атмосфере:
- а) улучшает рассеивание примесей;
  - б) ухудшает рассеивание примесей;
  - в) не влияет на рассеивание примесей.
- Г.6 Осадки в виде дождя:
- а) препятствуют удалению загрязнений из воздуха;
  - б) способствуют удалению загрязнений из воздуха;
  - в) не влияют на удаление загрязнений из воздуха.
- Г.7 Назовите факторы, способствующие удалению загрязнений из атмосферы?
- а) Инверсия и туман.
  - б) Осадки и их интенсивность.
  - в) Высокое давление и температура воздуха.
- Г.8 Предельно допустимая концентрация (ПДК) — это:
- 1) норма, устанавливающая допустимую нагрузку на экосистему;
  - 2) санитарно-гигиеническая норма, защищающая человека;
  - 3) максимально возможная концентрация вещества в окружающей среде.
- Г.9 Каким показателем нормируется среда по веществу?
- а) предельно-допустимым уровнем;
  - б) предельно-допустимыми выбросами;
  - в) предельно-допустимыми концентрациями.

Г.10 Какие компоненты промышленного предприятия интересуют инженера-эколога?

- а) продукция;
- б) отходы;
- в) здоровье рабочих

Г.11 Какие производства являются конечной целью промышленной экологии?

- а) отходные;
- б) малоотходные;
- в) безотходные.

Г.12 К какой группе относится пыль с размером меньше 0,1 мкм

- а) мелкая;
- б) тонкая;
- в) весьма тонкая.

Г.13 По величине ПДК определить категории опасности вредного вещества в воздухе

- а)  $\text{NO}_2$  (ПДК<sub>сс</sub>=0,04 мг/м<sup>3</sup>);
- б)  $\text{SO}_2$  (ПДК<sub>сс</sub>=0,05 мг/м<sup>3</sup>);
- в)  $\text{H}_2\text{S}$  ПДК<sub>сс</sub>=0,008 мг/м<sup>3</sup>).

Г.14 Предприятия третьего класса опасности имеют значения КОП

- а)  $31,7 \cdot 10^6 > \text{КОП} \geq 31,7 \cdot 10^4$ ;
- б)  $31,7 \cdot 10^4 > \text{КОП} \geq 31,7 \cdot 10^3$ ;
- в)  $\text{КОП} < 31,7 \cdot 10^3$ .

Г.15 Категория опасности предприятия учитывает

- а) метеоусловия;
- б) массу выбросов;
- в) рельеф местности;
- г) класс опасности вещества.

Г.16 Чему равно значение коэффициента безотходности ( $K_6$ ) для безоотходного производства?

- а) 75-80 %;
- б) 80-90 %;
- в) 90-98 %.

Г.17 Что такое отходы?

- а) вещества и смесь веществ;
- б) сырье или продукция, не находящая применение на практике;
- в) вещества и смесь веществ, которые не могут быть переработаны в продукцию современными технологиями.

Г.18 Какой из предлагаемых объектов может быть отнесен к природным ресурсам?

- а) глина;
- б) доменный скрап;
- в) стекло.

Г.19 Какой из предлагаемых объектов природной среды может быть отнесен к сырьевым ресурсам?

- а) нефть;
- б) сахар;
- в) лекарственные препараты.

Г.20 Какой из предлагаемых объектов может быть отнесен к готовому продукту?

- а) колошниковая пыль;
- б) нефть;
- в) бензин.

Г.21 Какой из предлагаемых объектов следует отнести к категории отходов?

- а) вода, загрязненная фенолом до 0,2 мг/л (ПДК=0,01 мг/м<sup>3</sup>);
- б) осадки;
- в) лекарственные препараты.

Г.22 Какой из предлагаемых объектов может быть отнесен к вторичным материальным ресурсам?

- а) графитовая пыль (спель);
- б) уголь;
- в) лекарственные препараты.

Г.23 Карбамидным способом осуществляют очистку газов от:

- а) SO<sub>2</sub>;
- б) NO<sub>x</sub>;
- в) CO;

Г.24 Выберите из предложенных методов очистки газовых выбросов методы очистки от CO:

- а) Известковый;
- б) Магnezитовый;
- в) Сжигание в пламени.

Г.25 Выберите оборудование для улавливания твердых частиц с эффективностью ниже 80 %

- а) пылесадительная камера;
- б) циклон;
- в) электрофильтр.