

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

---

*А.А. Ляпков, Е.И. Монова*

# **Техника защиты окружающей среды**

**Учебное пособие**

Издание 2-е, переработанное

Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим центром высшего профессионального образования для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 280201 – Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов

---

---

Издательство Томского политехнического университета  
**2008**

**УДК 628.5**

**ББК 20.1**

Л 90

**Ляпков А. А.**

Л 90      Техника защиты окружающей среды / А. А. Ляпков, Е. И. Ионова. Издание 2-е, переработанное. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 317 с.

Рассмотрены основные способы очистки газовых выбросов и сточных вод от химических загрязнений и взвешенных частиц, методы и приемы ограничения выбросов в биосферу, переработки и утилизации твердых отходов, детоксикации и рекультивации нарушенных техногенным воздействием земель. Приводятся основные методы обезвреживания и утилизации крупнотоннажных отходов основных промышленных производств.

Пособие подготовлено на кафедре технологии основного органического синтеза Томского политехнического университета для студентов специальности 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» всех форм обучения.

**УДК 628.5**

**ББК 20.1**

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом Томского политехнического университета

Рецензенты

Канд. техн. наук,  
начальник Томской СИГЭКиА, **Н. А. Цехановская;**

Начальник лаборатории промсанитарии  
ОАО ТНХЗ г. Томска, **Л. А. Чернова.**

© Ляпков А.А., 2008

© Ионова Е.И., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2008

# Оглавление

---

---

|  |     |
|--|-----|
| Введение.....  | 4   |
| Часть 1. Защита атмосферы от промышленных загрязнений<br>(очистка отходящих газов).....  | 10  |
| 1.1. Методы очистки и обезвреживания отходящих газов.....  | 10  |
| 1.2. Охрана атмосферы от загрязнений.....  | 16  |
| 1.3. Очистка атмосферных выбросов от пыли.....   | 19  |
| 1.4. Обработка газов методами абсорбции, адсорбции и конденсации.....  | 87  |
| 1.5. Очистка газов дожиганием.....   | 120 |
| 1.6. Химические методы очистки отходящих газов.....  | 132 |
| Часть 2. Защита гидросферы от промышленных загрязнений<br>(очистка сточных вод).....   | 164 |
| 2.1. Использование сточных вод в оборотных и замкнутых системах<br>водоснабжения.....  | 164 |
| 2.2. Методы очистки сточных вод.....   | 175 |
| 2.3. Осветление сточных вод.....   | 178 |
| 2.4. Физико-химические методы очистки сточных вод.....   | 200 |
| 2.5. Электрохимические методы очистки сточных вод.....   | 225 |
| 2.6. Химические методы очистки сточных вод.....  | 234 |
| 2.7. Биохимические методы очистки сточных вод.....   | 251 |
| 2.8. Термоокислительные методы обезвреживания сточных вод.....   | 259 |
| Часть 3. Защита литосферы от промышленных загрязнений<br>(переработка твердых отходов).....  | 266 |
| 3.1. Методы переработки твердых отходов.....   | 268 |
| 3.2. Утилизация и обезвреживание твердых отходов.....  | 283 |
| 3.3. Использование промышленных и коммунально-бытовых отходов в сельском<br>хозяйстве.....   | 290 |
| 3.4. Рекультивация земель, нарушенных промышленностью.....   | 301 |
| Заключение.....  | 307 |
| Приложение.....  | 309 |
| 1. Предельно допустимые концентрации некоторых вредных веществ в<br>атмосферном воздухе.....   | 309 |
| 2. Предельно допустимые концентрации некоторых технических композиций в<br>воздухе.....  | 310 |
| 3. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в водных объектах<br>хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования..... | 311 |
| 4. Предельно допустимые концентрации химических веществ в почве.....   | 312 |
| Литература.....  | 315 |

## **Введение**

---

---

В нашей стране защита окружающей среды регулируется рядом законов и общегосударственных постановлений. В 70-е годы были приняты многочисленные постановления, предусматривающие выполнение природоохранных мероприятий регионального уровня (об охране водных и биологических ресурсов уникального водоема – озера Байкал, о мерах по предотвращению загрязнения морей – Балтийского, Каспийского, Черного, Азовского и отдельных рек – Волги, Урала и др.).

В 80–90-е годы природоохранная деятельность в стране продолжала развиваться. Мероприятия по охране природы стали неотъемлемой частью планов социально-экономического развития страны, был установлен порядок проведения обязательной экологической экспертизы новой технологии, техники, материалов. В 1991 г. был принят Закон Российской Федерации «Об охране окружающей природной среды», дополненный в 1992 г. В дальнейшем принимаются постановления, регулирующие природоохранную деятельность: «О государственной стратегии Российской Федерации по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития» (1994), «О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (1995), Федеральный закон РФ «Об охране атмосферного воздуха» (1999) и т. д.

Проблема сохранения окружающей среды в каждой стране решается в соответствии с особенностями ее социального устройства и уровня развития производства. Даже в экономически развитых странах в подавляющем большинстве современных производственных процессов пока еще используют открытые технологические циклы, которые не исключают выбросов вредных веществ в окружающую среду. Если в стратегическом плане максимальное внимание отраслевой науки должно быть уделено разработке безотходных технологий с комплексной переработкой сырья в замкнутых производственных циклах, то сохранение качества окружающей среды при использовании технологий сегодняшнего дня требует разработки эффективных сооружений для очистки и обезвреживания промышленных стоков, выбросов и отходов и строгого нормирования поступления в биосферу тех или иных токсикантов.

Для предотвращения негативных последствий воздействия загрязняющих веществ на отдельные компоненты природной среды необходимо знать их предельные уровни, при которых возможна нормальная жизнедеятельность и функционирование организмов.

Основной величиной экологического нормирования содержания вредных химических соединений в компонентах природной среды является предельно допустимая концентрация (ПДК). ПДК – это такое содержание вредного вещества в окружающей среде, которое при постоянном контакте или при воздействии за определенный промежуток времени практически не влияет на здоровье человека и не вызывает неблагоприятных последствий у его потомства. При определении ПДК учитывается не только влияние загрязняющего вещества на здоровье человека, но и его воздействие на животных, растения, микроорганизмы, а также на природные сообщества в целом.

ПДК загрязняющих веществ для воздуха, воды, почвы, для пищевых продуктов и кормов устанавливаются в законодательном порядке или рекомендуются компетентными учреждениями. В настоящее время установлены ПДК большого количества вредных веществ для воздушной и водной среды и сравнительно недавно начаты исследования по разработке ПДК загрязняющих веществ для почвы.

Для санитарной оценки воздушной среды используется несколько видов предельно допустимых концентраций вредных веществ, в том числе ПДК для рабочей зоны (РЗ), максимально-разовая (МР) и среднесуточная (СС) ПДК, которые установлены на основе рефлекторных реакций организма человека на присутствие в воздухе токсикантов.

ПДК<sub>РЗ</sub> – предельно-допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны, мг/м<sup>3</sup>. Эта концентрация не должна вызывать у работающих при ежедневном вдыхании в течение 8 ч за все время рабочего стажа каких-либо заболеваний или отклонений от нормы в состоянии здоровья, которые могли бы быть обнаружены современными методами исследования непосредственно во время работы или в отдаленные сроки. При этом рабочей зоной считается пространство высотой до 2 м над уровнем пола или площадки, на которой расположены места постоянного или временного пребывания работающих.

ПДК<sub>МР</sub> – максимальная разовая концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, мг/м<sup>3</sup>, которая не должна вызывать рефлекторных реакций в организме человека.

ПДК<sub>СС</sub> – среднесуточная предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, мг/м<sup>3</sup>. Эта концентрация вредного вещества не должна оказывать прямого или косвенного вредного воздействия на организм человека в условиях неопределенно долгого круглосуточного вдыхания.

В настоящее время действуют ПДК вредных газов, паров и аэрозолей в воздухе рабочей зоны, установленные для

445 загрязняющих веществ, и ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе населенных мест, включающие 109 загрязняющих веществ.

Для обеспечения охраны воздушной среды установлена еще одна нормативная величина, характеризующая объем вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу отдельными источниками загрязнения – предельно допустимый выброс (ПДВ). ПДВ – это объем (количество) загрязняющего вещества, выбрасываемого отдельным источником за единицу времени, превышение которого ведет к превышению ПДК в среде, окружающей источник загрязнения, и, как следствие, к неблагоприятным последствиям в окружающей среде и риску для здоровья людей.

В нашей стране нет единых общегосударственных норм качества воды, поскольку ее пригодность определяется конкретными требованиями отдельных видов водопользования.

Качество поверхностных вод нормировано для хозяйственно-питьевого, культурно-бытового и рыбохозяйственного водопользования. Для первых двух категорий определяющими являются санитарно-гигиенические нормы.

Самые высокие требования предъявляются к питьевой воде. Государственный стандарт на воду, используемую для питья и в пищевой промышленности (ГОСТ Р 51232-98), определяет благоприятные для человека органолептические показатели воды: вкус, запах, цвет, прозрачность, а также безвредность ее химического состава и эпидемиологическую безопасность. Одни и те же требования предъявляются к воде из любого источника водоснабжения независимо от способа ее обработки и конструкции водозабора и водопровода. Для воды установлены предельно допустимые концентрации более чем 960 химических соединений, которые объединены в три группы по следующим лимитирующим показателям вредности (ЛПВ):

- санитарно-токсикологическому (СТ);
- общесанитарному (ОБЩ);
- органолептическому (ОРГ).

Для водных объектов, используемых в рыбохозяйственных целях, также установлены нормативы качества воды применительно к двум категориям:

I. использование водных объектов для сохранения и воспроизводства ценных видов рыб, обладающих высокой чувствительностью к содержанию кислорода;

II. использование водных объектов для других рыбохозяйственных целей.

ПДК вредных веществ для рыбохозяйственных водоемов и водотоков установлены для 521 ингредиента, объединенного в группы

по следующим ЛПВ: токсикологическому, органолептическому, рыбохозяйственному и общесанитарному. Вода для поения животных, согласно нормативам, не должна уступать качеству питьевой воды, однако требования, предъявляемые к органолептическим свойствам, могут быть несколько снижены. Лишь в исключительных случаях в районах с дефицитом пресной воды, по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы и ветеринарного надзора, для мытья и поения животных, приготовления кормов и уборки помещений допускается использование воды повышенной минерализации. Самые жесткие требования необходимо предъявлять к санитарному состоянию воды, используемой в животноводстве, поскольку заражение животных через воду и развитие эпизоотии причиняет огромный ущерб народному хозяйству.

Условия, при которых возможен сброс коммунально-бытовых и производственных сточных вод в водоемы и водотоки, определяют «Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения» СанПиН 4630-88, утвержденные в 1988 г. и «Правила охраны поверхностных вод», утвержденные Госкомприроды СССР 21 февраля 1991 г. Сброс сточных вод в прибрежных районах морей регламентируется также этими правилами. Согласно этому нормативному документу спуск сточных вод в прибрежных районах морей, отведенных для оздоровительных и рекреационных целей, запрещается.

Все современные очистные сооружения построены с использованием деструктивных методов очистки, которые сводятся к разрушению загрязняющих воду веществ путем их окисления, восстановления, гидролиза, разложения, причем продукты распада частично удаляются из воды в виде газов или осадков, а частично остаются в ней в виде растворимых минеральных солей. В результате так называемые нетоксичные минеральные соли поступают в природные воды в количествах, соответствующих ПДК, но во много раз превышающих их естественные концентрации в водной среде. Поэтому сброс в реки и водоемы сточных вод, прошедших глубокую очистку от органических соединений азота, фосфора, серы и других элементов, тем не менее повышает содержание в воде растворимых сульфатов, нитратов, фосфатов и других минеральных солей, вызывающих эвтрофикацию водоемов, их «цветение», за счет бурного развития синезеленых водорослей; последние, отмирая, поглощают массу кислорода и лишают воду способности к самоочищению.

Вопрос установления ПДК загрязняющих веществ в почвах весьма сложен. С одной стороны, почвенный покров – среда, гораздо менее подвижная, чем поверхностные воды и атмосфера, и аккумуляция

поступающих в почву химических соединений может происходить в течение долгого времени, постепенно приближаясь к ПДК. Поэтому основным фактором определения ПДВ для какого-либо предприятия или группы предприятий должно быть предполагаемое время работы, в течение которого в почве прилегающих территорий накопится количество выбрасываемого загрязняющего вещества, достигающее ПДК. С другой стороны, активная микробиологическая жизнь почвы и протекающие в ней физико-химические процессы способствуют трансформации посторонних веществ, поступающих в почву, причем направление и глубина этого процесса определяются многими факторами. В ряде случаев разрушение загрязняющих веществ и их миграция так малы, что ими можно пренебречь; в других случаях результаты протекания процессов деградации и миграции посторонних химических соединений в почве сопоставимы с темпами их поступления, и предел их накопления в почве обуславливается равновесием между процессом поступления загрязняющих веществ и их удалением в результате разрушения или миграции. Таким образом, ПДК загрязняющих веществ в почвах определяются не только их химической природой и токсичностью, но и особенностями самих почв. В отличие от воздуха и воды почвы зонально-генетического ряда настолько разнятся друг от друга по химическому составу и свойствам, что для них не могут быть установлены унифицированные уровни ПДК. Эти уровни неизбежно должны варьировать в зависимости от конкретной обстановки: биоклиматических особенностей природной зоны, свойств почвы, возделываемых культур, системы удобрений, агротехники и т. п.

От других компонентов биосферы почва отличается еще и тем, что загрязняющие вещества поступают в нее не только с атмосферными выпадениями, поливными водами, в составе балластных веществ и различных отходов, но и вносятся преднамеренно, как удобрения и ядохимикаты. При этом в почвах сложно проследить тенденции изменения уровней загрязнения, так как для этого требуются длительные наблюдения. Исключение составляют лишь некоторые виды пестицидов, способные быстро разлагаться под воздействием внешних факторов.

Много внимания уделяется разработке нормативов содержания в почве тяжелых металлов, негативно влияющих на почвенные процессы, плодородие почв и качество сельскохозяйственной продукции. Восстановление биологической продуктивности почв, загрязненных тяжелыми металлами, – одна из наиболее сложных проблем охраны биоценозов.

Обеспечение регламентируемых значений ПДК может быть достигнуто двумя путями – рассеиванием химических веществ



в воздушной или водной среде и строгим контролем за их выбросами. Первый путь упрощает задачи производителей, так как не требует совершенствования технологии производства и строительства дорогостоящих очистных сооружений, а сводится к строительству высотных труб и разбавлению сбрасываемых стоков поверхностными водами. Современное состояние окружающей среды требует полностью отказаться от подобных методов «защиты» биосферы от химических загрязнений и перейти к ограничению выбросов, а в дальнейшем для многих объектов – их полному прекращению.

# **Часть 1. Защита атмосферы от промышленных загрязнений (очистка отходящих газов)**

---

---

## **1.1. Методы очистки и обезвреживания отходящих газов**

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются промышленные предприятия, транспорт, тепловые электростанции, животноводческие комплексы. Каждый из этих источников связан с выделением большого количества специфических токсичных веществ, иногда не поддающихся сразу идентификации, хотя номенклатура многотоннажных загрязнений сравнительно мала.

Например, предприятия черной металлургии выбрасывают газы, содержащие пыль, оксиды серы и металлов. На 1 т перерабатываемого чугуна выбрасывается 4,5 кг пыли, 2,7 кг  $\text{SO}_2$ , 0,1...0,5 кг Mn, а также соединения мышьяка, фосфора, сурьмы, свинца, ртути, редких металлов, смолистые вещества. Агломерационные фабрики выбрасывают пыль и диоксид серы (190 кг  $\text{SO}_2$  на 1 т руды). Мартеновские и конверторные цехи выделяют большие массы пыли. На 1 т мартеновской стали выделяется 3000...4000 м<sup>3</sup> газов с концентрацией пыли в среднем 0,5 г/м<sup>3</sup>, 60 кг CO и 3 кг  $\text{SO}_2$ . Коксохимические цехи загрязняют атмосферу пылью и смесью летучих соединений. Предприятия цветной металлургии выбрасывают запыленные газы, содержащие диоксид серы, фтористые газы и металлы. Из тонны пыли, поступающей в атмосферу при плавке медных руд, можно извлечь до 100 кг меди и немного меньше свинца и цинка. Выбросы металлургических предприятий характеризуются высокой температурой, достигающей 800 °С и более.

Предприятиями химической промышленности выбрасываются пыль, содержащая неорганические и органические вещества и газы:  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , HF, HCl,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и др. Воздушные выбросы нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности содержат углеводороды, сероводород и дурнопахнущие газы. Заводы промышленности строительных материалов выбрасывают пыль, фториды, диоксиды серы и азота.

Выхлопные газы автомобилей содержат примерно 200 веществ, в том числе канцерогенные углеводороды и тетраэтилсвинец. Тепловые электростанции выделяют в атмосферу газы, содержащие оксиды серы, азота и углерода, золу, металлы.

Загрязнения в атмосферу могут поступать из источников непрерывно или периодически, залпами или мгновенно. В случае залповых выбросов за короткий промежуток времени в воздух выделяется большое количество вредных веществ. Залповые выбросы возможны при авариях, при сжигании быстрогорящих отходов производства на специальных площадках уничтожения. При мгновенных выбросах загрязнения выбрасываются в доли секунды иногда на значительную высоту. Они происходят при взрывных работах и авариях. Количество наиболее распространенных видов вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу от стационарных источников по ряду городов России, дано в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Выбросы вредных веществ в атмосферный воздух от стационарных источников в ряде городов России, тыс. т/год

| Город            | Вредные вещества |         |                          |                 |                   |     |
|------------------|------------------|---------|--------------------------|-----------------|-------------------|-----|
|                  | Всего            | твердые | Газообразные<br>и жидкие | из них          |                   |     |
| оксиды<br>серы   |                  |         |                          | оксиды<br>азота | оксид<br>углерода |     |
| Архангельск      | 85               | 20      | 65                       | 45              | 5                 | 13  |
| Братск           | 158              | 41      | 117                      | 21              | 6                 | 85  |
| Волгоград        | 228              | 42      | 186                      | 38              | 19                | 60  |
| Иркутск          | 94               | 29      | 65                       | 29              | 8                 | 26  |
| Кемерово         | 122              | 37      | 85                       | 26              | 28                | 21  |
| Красноярск       | 259              | 78      | 181                      | 39              | 13                | 115 |
| Магнитогорск     | 849              | 170     | 679                      | 84              | 34                | 548 |
| Москва           | 312              | 30      | 282                      | 70              | 99                | 28  |
| Новокузнецк      | 833              | 136     | 697                      | 90              | 34                | 562 |
| Санкт-Петербург  | 236              | 46      | 190                      | 74              | 47                | 41  |
| Усть-Каменогорск | 143              | 24      | 119                      | 69              | 12                | 36  |
| Уфа              | 304              | 9       | 295                      | 72              | 25                | 36  |
| Челябинск        | 427              | 94      | 333                      | 60              | 29                | 210 |

Таким образом, с отходящими газами в атмосферу поступают твердые, жидкие, паро- и газообразные неорганические и органические вещества, поэтому по агрегатному состоянию загрязнения подразделяют на твердые, жидкие, газообразные и смешанные.

Отходящие газы промышленности, содержащие взвешенные твердые или жидкие частицы, представляют собой двухфазные системы. Сплошной фазой в системе являются газы, а дисперсной – твердые частицы или капельки жидкости. Такие аэродисперсные системы называют аэрозолями, которые разделяют на пыли, дымы и туманы. Пыли содержат твердые частицы размером от 5 до 50 мкм, а дымы – от 0,1 до 5 мкм. Туманы состоят из капелек жидкости

размером 0,3...5 мкм и образуются в результате конденсации паров или при распылении жидкости в газе. Газовые выбросы классифицируют по организации отвода и контроля – на организованные и неорганизованные; по температуре – на нагретые (температура газопылевой смеси выше температуры воздуха) и холодные; по признакам очистки – на выбрасываемые без очистки (организованные и неорганизованные) и после очистки (организованные).

*Организованный промышленный выброс* – это выброс, поступающий в атмосферу через специально сооруженные газоходы, воздухопроводы, трубы, а *неорганизованным выбросом* называют промышленный выброс, поступающий в атмосферу в виде ненаправленных потоков газа в результате нарушения герметичности оборудования, отсутствия или неудовлетворительной работы оборудования по отсосу газа в местах загрузки, выгрузки и хранения продукта.

Для снижения загрязнения атмосферы от промышленных выбросов совершенствуют технологические процессы, осуществляют герметизацию технологического оборудования, применяют пневмотранспорт, строят различные очистные сооружения.

Наиболее эффективным направлением снижения выбросов является создание безотходных технологических процессов, предусматривающих, например, внедрение замкнутых газообразных потоков, однако до настоящего времени основным средством предотвращения вредных выбросов остается разработка и внедрение эффективных систем очистки газов. При этом под очисткой газа понимают отделение от газа или превращение в безвредное состояние загрязняющего вещества, поступающего от промышленного источника.

Классификация методов и аппаратов для обезвреживания газовых выбросов от различных примесей приведена на рис. 1.1. Эта классификация является приближенной. Она не охватывает всех существующих методов и тем более аппаратов для газоочистки.

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



Рис. 1.1. Классификация методов и аппаратов для обезвреживания газовых выбросов

Выбор метода и аппарата для улавливания аэрозолей в первую очередь зависит от их дисперсного состава:

| <i>Аппараты</i>         | <i>Размер частиц, мкм</i> |
|-------------------------|---------------------------|
| Пылеосадительные камеры | 40...1000                 |
| Скрубберы               | 20...100                  |
| Тканевые фильтры        | 0,9...100                 |
| Циклоны:                |                           |
| – диаметром 1...2 м     | 20...1000                 |
| – диаметром до 1 м      | 5...1000                  |
| Волокнистые фильтры.    | 0,05...100                |
| Электрофильтры          | 0,01...10                 |

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

*Абсорбционные методы* очистки отходящих газов подразделяют по следующим признакам:

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

Для физической абсорбции на практике применяют воду, органические растворители, не вступающие в реакцию с извлекаемым газом, и водные растворы этих веществ. При хемосорбции в качестве абсорбента используют водные растворы солей и щелочей, органические вещества и водные суспензии различных веществ.

Выбор метода очистки зависит от многих факторов: концентрации извлекаемого компонента в отходящих газах, объема и температуры газа, содержания примесей, наличия хемосорбентов, возможности использования продуктов рекуперации, требуемой степени очистки. Выбор производят на основании результатов технико-экономических расчетов.

*Адсорбционные методы* очистки газов используют для удаления из них газообразных и парообразных примесей. Методы основаны на поглощении примесей пористыми телами – адсорбентами. Процессы

очистки проводят в периодических или непрерывных адсорберах. Достоинством методов является высокая степень очистки, а недостатком – невозможность очистки запыленных газов.

*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  $\approx 100 \text{ г/м}^3$ , 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.

## 1.2. Охрана атмосферы от загрязнений

В настоящее время в большинстве производственных процессов используются открытые технологические циклы, связанные с выбросом в атмосферу твердых частиц и отходящих газов, химический состав и концентрация которых определяются особенностями производства.

### Рассеяние химических соединений в атмосфере

Как правило, на каждом предприятии для отвода газов и пылеудаления используют высокие (200...350 м) трубы. Их применение позволяет распределять загрязняющие вещества на большие площади, снижая тем самым их общую концентрацию в атмосфере. Так, из трубы высотой 200 м пылегазовые потоки расходятся на 20 км, а из трубы высотой 250 м – на 75 км. Расчеты рассеивания атмосферных выбросов предприятий основаны на определении концентраций загрязняющих веществ в приземном слое воздуха  $C$  (мг/м<sup>3</sup>). Максимальная концентрация каждого токсичного соединения  $C_M$  в приземном слое атмосферы не должна превышать максимально-разовой предельно допустимой концентрации данного вещества ПДК<sub>МР</sub> в атмосферном воздухе  $C_M \leq \text{ПДК}_{\text{МР}}$ .

Действующие на территории России ПДК в воздухе ряда токсичных веществ характеризуются величинами, приведенными в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения ПДК (в мг/м<sup>3</sup>) в воздухе ряда токсичных веществ

| Вещество         | ПДК <sub>РЗ</sub> | ПДК <sub>МР</sub> | ПДК <sub>СС</sub> | Вещество         | ПДК <sub>РЗ</sub> | ПДК <sub>МР</sub> | ПДК <sub>СС</sub> |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| HF               | 0,5               | 0,02              | 0,005             | CO               | 20,0              | 3,0               | 1,0               |
| Cl <sub>2</sub>  | 1,0               | 0,1               | 0,03              | HCl              | 5,0               | 0,015             | 0,015             |
| NH <sub>3</sub>  | 20,0              | 0,2               | 0,2               | Hg               | 0,01              | –                 | 0,0003            |
| CS <sub>2</sub>  | 10,0              | 0,03              | 0,005             | SiF <sub>4</sub> | –                 | 0,02              | 0,005             |
| H <sub>2</sub> S | 10,0              | 0,008             | 0,008             | HCN              | 0,3               | –                 | 0,01              |
| SO <sub>2</sub>  | 10,0              | 0,03              | 0,005             | O <sub>3</sub>   | 0,1               | –                 | –                 |
| NO <sub>x</sub>  | 5,0               | 0,085             | 0,085             | C (сажа)         | 3,5               | 0,15              | 0,05              |

Величина  $C_M$  при выбросе нагретой газовой смеси из одиночного источника с круглым устьем (трубы), при неблагоприятных



метеорологических условиях, на расстоянии  $x_M$  (м) от источника определяется по формуле

$$C_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta t}},$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от условий вертикального и горизонтального рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе (для Центральной части России он составляет 120);  $M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, г/с;  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания части загрязняющих веществ в атмосферном воздухе (для газообразных соединений и мелкодисперсных аэрозолей он равен 1; для пыли зола  $F$  зависит от степени очистки  $\eta$ : при  $\eta > 90\%$   $F = 2$ , при  $\eta < 75\%$  – до 3);  $m, n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из источника (трубы): обычно  $m \approx 1$ , но может варьировать от 0,8 до 1,5;  $n$  изменяется от 1 до 3;  $H$  – высота трубы над уровнем земли, м;  $\Delta t$  – разность температур выбрасываемой газовой смеси  $t_{\Gamma}$  и воздуха  $t_B$ , °С ( $\Delta t = t_{\Gamma} - t_B$ );  $V_1$  – объем выбрасываемой газовой смеси, м<sup>3</sup>/с.

Распространение в атмосфере выбрасываемых из высоких источников (труб) загрязняющих веществ подчиняется законам турбулентной диффузии.

На процесс рассеивания выбросов существенное влияние оказывает состояние атмосферы, расположение предприятий, характер местности, физические свойства выбросов, высота трубы, диаметр ее устья и др. Горизонтальное перемещение примесей определяется в основном скоростью ветра, а вертикальное – распределением температур в вертикальном направлении.

На рис. 1.2 показано распределение концентрации вредных

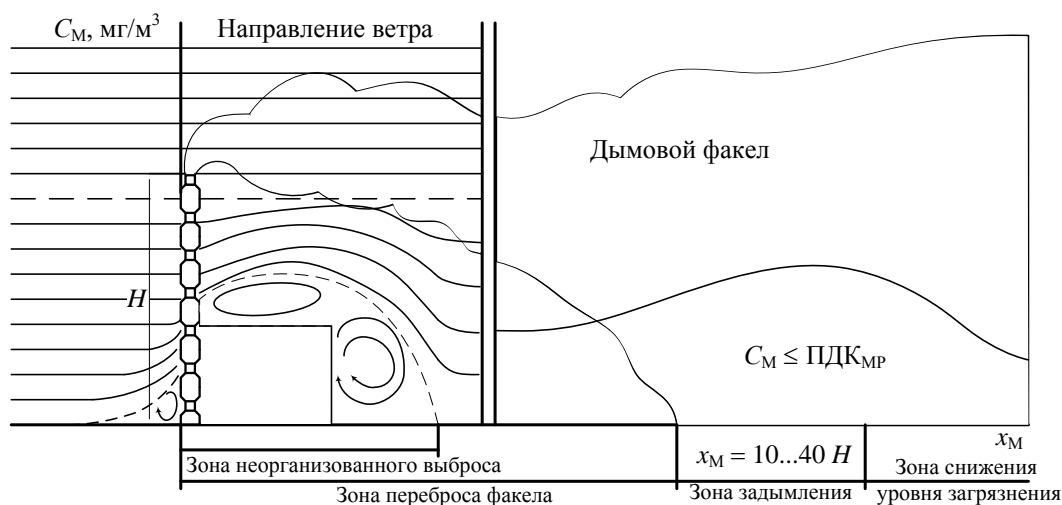


Рис. 1.2. Изменение концентрации примесей в атмосфере

веществ в атмосфере от организованного высокого источника выбросов. По мере удаления от трубы в направлении, совпадающим с направлением ветра, концентрация вредных примесей в приземном слое атмосферы сначала нарастает, достигает максимума на расстоянии 10...40 высот трубы и затем медленно убывает, что позволяет говорить о наличии трех зон неодинакового загрязнения атмосферы:

- зоны переброса факела выбросов, характеризующейся относительно невысоким содержанием вредных веществ в приземном слое атмосферы;
- зоны задымления с максимальным содержанием вредных веществ;
- зоны постепенного снижения уровня загрязнения.

Предельно допустимый выброс ПДВ (г/с) вредного вещества в атмосферу, при повышенной температуре, из одиночного источника, при котором обеспечивается его концентрация в приземном слое воздуха, не превышающая ПДК, определяется по формуле

$$\text{ПДВ} = \frac{\text{ПДК} \cdot H^2 \cdot \sqrt[3]{\Delta t}}{A \cdot F \cdot m \cdot n}.$$

При этом концентрация вредного вещества в отходящих газах возле устья трубы не должна превышать величины  $C_{\text{MT}}$  (г/м<sup>3</sup>), определяемой по формуле

$$C_{\text{MT}} = \frac{\text{ПДВ}}{V_1} = \frac{\text{ПДК} \cdot H^2 \cdot \sqrt[3]{\Delta t}}{A \cdot F \cdot m \cdot n \cdot V_1^2}.$$

Минимальная высота трубы  $H$  (м) в первом приближении может быть найдена по формуле

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n}{\text{ПДК} \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta t}}}.$$

Максимальная концентрация вредных веществ  $C_M$  вблизи от земной поверхности при неблагоприятных метеорологических условиях, достигается на расстоянии  $x_M$  (м) от источника выброса, в зависимости от высоты трубы:

$$x_M = k \cdot H,$$

где  $k$  – безразмерный коэффициент, среднее значение которого  $\approx 20$ .

Рассеяние вредных веществ в атмосфере не является эффективным средством ее защиты от загрязнений, однако к нему до сих пор прибегают, чтобы снизить концентрации токсичных соединений, например, диоксида серы и оксидов азота в районе их выбросов. Основное внимание при проектировании промышленных предприятий или реконструкции действующих должно уделяться возможно более полной очистке атмосферных выбросов от токсичных

компонентов. Практически полная очистка достигается редко, так как затраты на очистные сооружения обычно достигают 15...20 % от капиталовложений на технологическую установку, причем выделение каждой примеси тем сложнее, чем ниже ее содержание в смеси.

---

---

### Вопросы для самоконтроля

---

---

1. Каковы источники загрязнения атмосферы?
2. Охарактеризуйте атмосферные загрязнения.
3. Приведите классификацию методов и аппаратов для очистки и обезвреживания тазовых выбросов.
4. Как происходит рассеяние загрязняющих веществ в воздухе?
5. Какие параметры влияют на эффективность рассеяния?



### 1.3. Очистка атмосферных выбросов от пыли

Запыленность атмосферы является не только следствием техногенной деятельности, но возникает и в результате многих природных явлений (извержения вулканов, выбросов пыли лесных и степных пожаров, морской пыли, космической пыли). Этот природный фон существенно усиливается за счет промышленной пыли, выбросы которой распределяются между отдельными отраслями хозяйства следующим образом.

| Отрасль промышленности                 | Выбросы, % |
|--|------------|
| Промышленность строительных материалов | 34,7       |
| Тепловые электростанции                | 29,5       |
| Автотранспорт                          | 15,8       |
| Черная металлургия                     | 12,4       |
| Химическая промышленность              | 4,6        |
| Цветная металлургия                    | 2,2        |
| Нефтеперерабатывающая промышленность   | 0,5        |
| Прочие                                 | 0,3        |

Дисперсность пыли в значительной мере определяет ее свойства. В результате измельчения изменяются некоторые свойства вещества и приобретаются новые. Это вызвано, в основном, тем, что при диспергировании вещества многократно увеличивается его суммарная поверхность. Например, при измельчении тела, имеющего форму куба и размеры 20×10×10 мм, и превращении его в частицы кубической формы с размером 1 мкм, суммарная поверхность материала возрастет в

10000 раз и станет равной  $6 \text{ м}^2$  (вместо  $600 \text{ мм}^2$ ).

В результате резкого увеличения суммарной поверхности вещества повышается поверхностная энергия, что влечет за собой увеличение физической и химической активности. Очень быстро и интенсивно протекают реакции окисления этих веществ. О повышении физической активности говорит, например, то, что измельченные вещества растворяются во много раз быстрее, чем исходный материал.

Во взвешивающей газообразной среде присутствует влага, пары кислот, щелочей. В результате их поглощения свойства частиц отличаются от свойств исходного материала.

Дисперсный состав характеризует пыль с различных сторон. Кроме физических и химических свойств, дисперсный состав определяет в значительной мере характер и условия распространения пыли в воздушной среде. Мелкодисперсная пыль осаждается значительно медленнее, а особо мелкодисперсная пыль практически не осаждается. Таким образом, рассеивание пылевых частиц в воздухе в значительной мере определяется дисперсным составом пыли. Важнейший вопрос пылеулавливания – выбор пылеулавливающего оборудования – решается главным образом на основании дисперсного состава пыли.

Современные аппараты для обеспыливания отходящих газов можно подразделить на четыре группы:

1. механические обеспыливающие устройства, в которых пыль отделяется под действием гравитационных, инерционных или центробежных сил;
2. мокрые или гидравлические аппараты, в которых твердые частицы улавливаются жидкостью;
3. пористые фильтры, удерживающие тонкую пыль;
4. электрофильтры, в которых осаждение пыли осуществляется за счет ионизации газа и содержащихся в нем пылинок.

Пылеуловители, применяемые для очистки воздуха делятся на пять классов в зависимости от размеров эффективно улавливаемых частиц пыли, отнесенной к соответствующей группе по дисперсности (табл. 1.3).

Таблица 1.3

#### Классификация пылеуловителей

| Класс пылеуловителей | Размеры эффективно улавливаемых частиц, мкм | Эффективность, % по массе пыли при классификационной группе пыли по дисперсности |    |     |           |      |
|----------------------|---|--|----|-----|-----------|------|
|                      |   | I  | II | III | IV        | V    |
| 1                    | 2   | 3  | 4  | 5   | 6         | 7    |
| I                    | Более 0,3...0,5                             | –  | –  | –   | 99,9...80 | < 80 |

| 1   | 2        | 3      | 4         | 5         | 6       | 7 |
|-----|----------|--------|-----------|-----------|---------|---|
| II  | Более 2  | –      | –         | 99,9...92 | 92...45 | – |
| III | Более 4  | –      | 99,9...99 | 99...80   | –       | – |
| IV  | Более 8  | > 99,9 | 99,9...95 | –         | –       | – |
| V   | Более 20 | > 99   | –         | –         | –       | – |

В зависимости от особенностей отделения твердых частиц от газовой фазы все пылеулавливающее оборудование делится на классы (рис. 1.2).

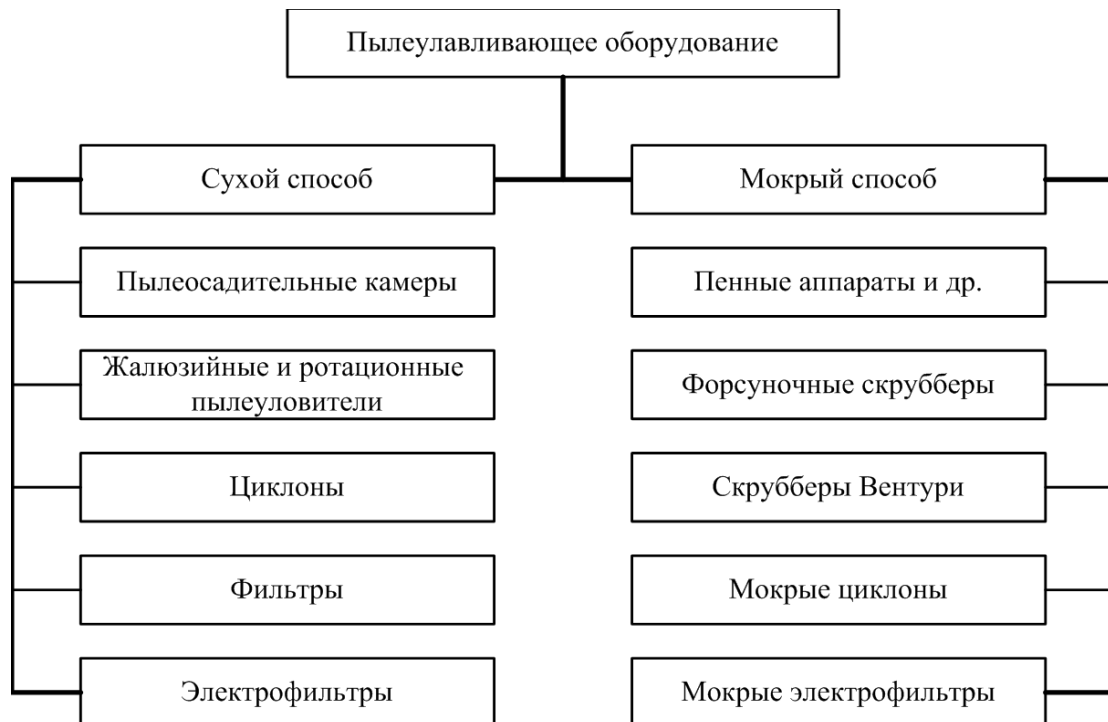


Рис. 1.2. Классификация пылеулавливающего оборудования

К основным характеристикам оборудования для очистки аэрозолей от взвешенных частиц относятся эффективность (степень) очистки воздуха от пыли, которую также иногда называют коэффициентом полезного действия аппарата, хотя это не отражает ее физический смысл; гидравлическое сопротивление; стоимость очистки. К общим параметрам пылеуловителей относят их производительность по очищаемому газу и энергоемкость, определяемую величиной затрат энергии на очистку  $1000 \text{ м}^3$  газа. При оценке эффективности работы пылеуловителей принимают во внимание:

- общую эффективность обеспыливания, или количество пыли, задержанной в пылеуловителе, по отношению к количеству пыли, содержащейся в обеспыливаемом газе;
- фракционную эффективность, определяющую полноту

улавливания частиц определенных размеров; ее выражают процентом отделенных в пылеуловителе частиц пыли определенных размеров;

- остаточное содержание пыли в газе при выходе его из пылеуловителя;
- распределение остатка пыли в газе по размеру частиц или скорости витания.

Под эффективным улавливанием понимают улавливание с эффективностью более 95 %. Однако эффективность улавливания частиц данной группы пыли, приведенная в табл. 1.3, является в основном ориентировочной, поскольку зависит от концентрации пыли в очищаемом воздухе, от ее слипаемости, волокнистости, которые в значительной мере влияют на коагуляцию пыли. Кроме того, существенным фактором для оценки эффективности пылеуловителей является расход потребляемой энергии, а при подборе того или иного типа пылеуловителя – частота распределения дисперсности фракций.

### **1.3.1. Улавливание пыли механическими осадителями**

#### **Природа сил, используемых для улавливания**

Термин «механические осадители» обычно используют для обозначения устройств, в которых частицы осаждаются под действием либо сил тяжести или инерции, либо и тех и других. В гравитационных осадителях частицы осаждаются из потока газа под действием собственного веса. В инерционных осадителях поток частиц, взвешенных в газе, внезапно подвергается изменению направления движения. Возникающие инерционные силы стремятся выбросить частицы из потока. Циклонные осадители, в которых используется инерция центробежной силы, являются важным частным случаем инерционных осадителей.

Скорость удаления частиц пропорциональна осаждающей силе. Из-за очень малого веса мелких частиц гравитационное осаждение оказывается слишком медленным и малоэффективным процессом для частиц размером менее 100 мкм. При использовании инерционного эффекта скорость улавливания резко повышается. Благодаря этому можно уменьшить размер оборудования и расширить диапазон эффективного улавливания до частиц размером около 20 мкм. Для некоторых циклонов предельный размер улавливаемых частиц составляет 5...10 мкм.

#### **Сила тяжести и сила сопротивления**

Конструирование осадительных камер основано на подсчете сил, действующих на частицу, и скорости вертикального движения вниз под

действием результирующей силы. В соответствии с законом Ньютона чистое ускорение вертикального движения частиц определяется результирующим действием силы тяжести, плавучести и сопротивления среды. В случае газов эффектом плавучести можно пренебречь. Силу сопротивления выражают через коэффициент сопротивления  $C_D$ , зависящий от числа Рейнольдса  $Re$  для движения частицы:

$$m \cdot \frac{dw_{\text{ч}}}{d\tau} = g \cdot m - C_D \cdot \left( \frac{\rho_{\Gamma} \cdot w_{\text{ч}}^2}{2} \right) \cdot \pi \cdot r_{\text{ч}}^2. \quad (1.1)$$

Функциональную зависимость между  $C_D$  и  $Re$  берут из стандартных графиков или уравнений, описывающих движение индивидуальной сферической частицы. При  $Re < 0,5$  эта зависимость характеризуется законом Стокса  $C_D = \frac{24}{Re}$ . Для больших  $Re$  можно использовать эмпирическое уравнение Клячко

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0,5}},$$

которое применимо в диапазоне  $0,5 < Re < 800$ . Для маленьких частиц в выражение для силы сопротивления следует вводить поправку Каннингхема на скольжение, но в этом случае гравитационное осаждение уже не играет роли.

### **Стационарная скорость осаждения**

Из уравнения (1.1) ясно, что вертикальное ускорение частицы продолжается до тех пор, пока сила веса не станет равной силе сопротивления; после этого частица движется с постоянной скоростью. Эта скорость называется стационарной скоростью осаждения частицы. Время, которое необходимо для достижения этой скорости, очень мало. Стационарная скорость может быть найдена приравниванием левой

части уравнения (1.1) нулю, заменой  $m$  на  $\frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\Gamma}) \cdot d_{\text{ч}}^3}{6}$  и

представлением в безразмерной форме

$$\frac{4 \cdot g \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\Gamma})}{3 \cdot \mu} = C_D \cdot Re^2 = 0.$$

Это выражение определяет число Галилея

$$Ga = \frac{4 \cdot g \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\Gamma})}{3 \cdot \mu^2}.$$

Число Галилея пропорционально  $d_{\text{ч}}^3$  и независимо от  $w_{\text{ч}}$ . Условием достижения стационарной скорости является  $Ga = C_D \cdot Re^2$ .

Можно определить другое безразмерное число, которое пропорционально  $w_{\text{ч}}^3$  и независимо от  $d_{\text{ч}}$ :

$$\frac{\text{Re}}{C_D} = \frac{\text{Re}^2}{\text{Ga}} = \frac{3 \cdot \rho_{\text{с}}^2 \cdot w_{\text{ч}}}{4 \cdot g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) \cdot \mu}$$

Прямое соотношение между  $d_{\text{ч}}$  и  $w_{\text{ч}}$ , можно дать через комбинацию  $\left(\frac{\text{Re}}{C_D}\right)^{1/3}$  в функции  $\text{Ga}^{1/3}$ . Эта зависимость хорошо выражается эмпирическим соотношением Коха

$$\lg\left(\frac{\text{Re}}{C_D}\right)^{1/3} = -1,387 + 2,153 \cdot \lg \text{Ga}^{1/3} + 0,548 \cdot \lg^2 \text{Ga}^{1/3} + 0,05665 \cdot \lg^3 \text{Ga}^{1/3}. \quad (1.2)$$

Таким образом, чтобы рассчитать стационарную скорость осаждения для частиц любого размера  $d_{\text{ч}}$  сначала надо найти критерий  $\text{Ga}$ , как описано выше. По уравнению (1.2) рассчитывают  $\frac{\text{Re}}{C_D}$ , а затем получают  $w_{\text{ч}}$ , используя данное выше определение  $\frac{\text{Re}}{C_D}$ . В диапазоне применимости закона Стокса скорость находится просто:

$$w_{\text{ч}} = \frac{g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) \cdot d_{\text{ч}}^2}{18 \cdot \mu}$$

Соотношение между размером частицы и стационарной скоростью осаждения показано на рис. 1.2.

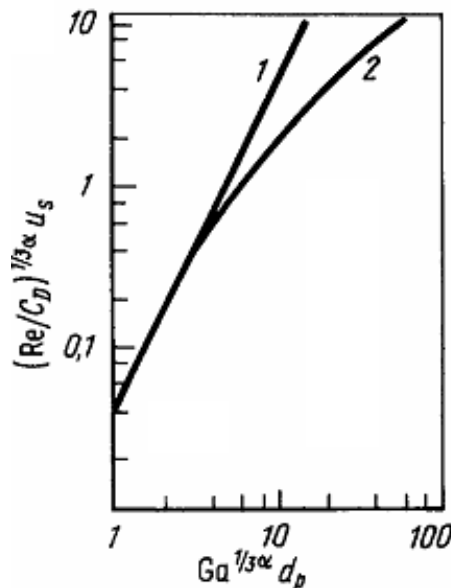


Рис. 1.2. Стационарная скорость седиментации в функции размера частиц:  
1 – по закону Стокса; 2 – по уравнению Клячко



## **Типы оборудования**

Для осаждения под действием гравитации газ обычно просто медленно пропускают через большую камеру, причем частицы имеют возможность осесть в бункер на дне. Расстояние, требуемое для осаждения частиц, можно уменьшить путем деления пространства камеры несколькими горизонтальными параллельными поддонами.

Гравитационные камеры можно снабжать отражательными перегородками для изменения направления движения газа и привлечения сил инерции для увеличения осадительного действия. В других конструкциях для создания инерционного эффекта используют люверсы, заслонки, отбойники.

В циклонных осадителях газу сообщают вращательное или вихревое движение, чтобы подвергнуть частицы воздействию центробежной силы. Это достигается или тангенциальным вводом потока в круглую камеру, или пропусканием газа мимо лопастей, радиально ориентированных по отношению к оси потока.

Устройства всех этих типов характеризуются простотой конструкции и работы. Они относительно дешевы по сравнению с другими типами осадителей. В общем, они не имеют движущихся частей, а для обеспечения рабочих условий можно использовать любой материал. Затраты энергии на работу также относительно малы, что обусловлено малым перепадом давления при течении газа через устройство.

## **Области применения**

Механические обеспыливающие устройства используются, как правило, для предварительной очистки отходящих газов; выбор оптимального типа аппаратуры определяется в первую очередь гранулометрическим составом пыли.

Осадители рассматриваемого типа используются для первичного удаления грубых частиц газового потока. В большинстве случаев защиты воздуха от загрязнения требуется улавливание гораздо более мелких частиц (размером около 1 мкм), поэтому обычно необходимо применять осадители других типов. Однако механические осадители можно использовать как предварительные, располагая их последовательно с устройствами других типов, чтобы уменьшить нагрузку на последние. Это особенно необходимо при сильно запыленных газовых потоках. Механические осадители могут работать долгое время без обслуживания с малыми энергетическими затратами.

### 1.3.2. Осадительные камеры

Простейшими аппаратами такого типа являются осадительные камеры (рис. 1.3, *а*), среди которых лучшее качество очистки достигается в осадительных камерах Говарда (рис. 1.3, *б*). Осадительные камеры применяются для освобождения газов от грубодисперсной пыли (размер частиц 50...500 мкм) и обеспечивают степень очистки 40...50 %.

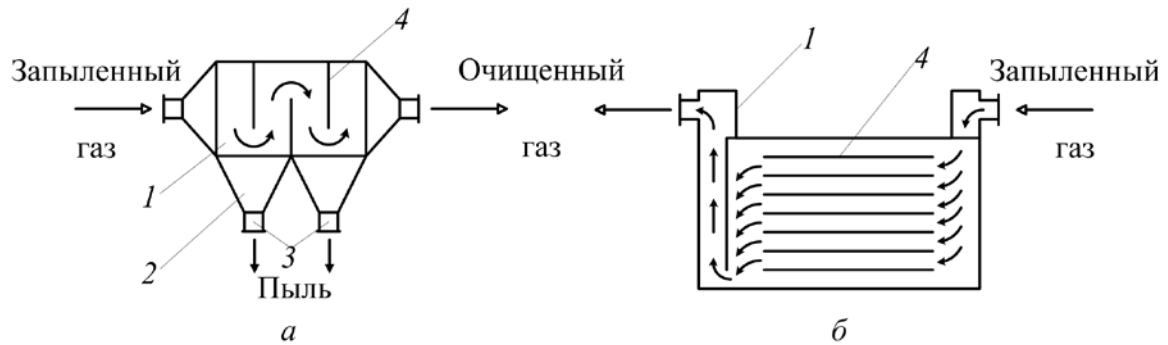


Рис. 1.3. Пылеосадительные камеры

*а* — с вертикальными перегородками, *б* — Осадительная камера Говарда:  
1 — корпус, 2 — бункер, 3 — штуцер для удаления пыли, 4 — перегородки

Более высокую степень очистки газов обеспечивают инерционные пылеуловители, действие которых основано на резком изменении направления потока газа, при котором частицы пыли ударяются о перегородки внутри аппарата, выпадают вниз и выводятся из аппарата (рис. 1.4, *а*). К аппаратам этого типа относятся жалюзийные (рис. 1.4, *б*) с производительностью по газу от 100 до 15000 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>, в которых отделяются частицы размером 50...20 мкм.

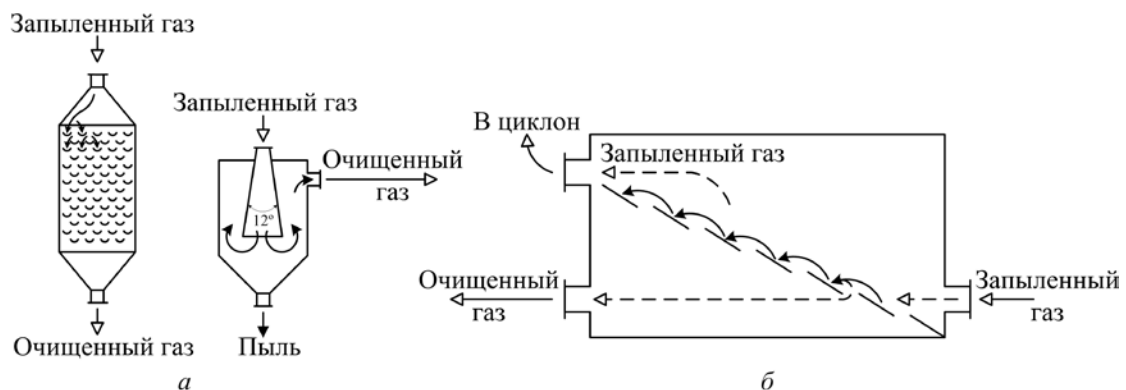


Рис. 1.4. Пылеуловители:  
*а* — инерционные; *б* — жалюзийный

Из инерционных аппаратов центробежного действия наибольшее распространение получили циклоны, в которых частицы пыли выделяются под действием центробежной силы в процессе вращения газового потока в корпусе аппарата. В отечественной практике

используются циклоны различного типа с производительностью по газу от 1450 до 6780 м<sup>3</sup>/ч. Их применяют как в одиночном, так и групповом исполнении; группы циклонов имеют общий коллектор запыленного газа, общий сборник очищенного газа и общий пылевой бункер.

### 1.3.3. Циклонные осадители

#### Использование центробежной силы

Частица массой  $m$ , двигающаяся по круговой траектории радиуса  $r$  с тангенциальной скоростью  $w_T$ , подвержена действию центробежной силы  $\frac{m \cdot w_T^2}{r}$ . Для типичных условий ( $w_T = 15$  м/с,  $r = 0,6$  м) эта сила примерно в 39 раз превышает силу тяжести. Поэтому указанная сила может резко увеличить осаждение в камере. На практике система улавливания частиц создается путем придания запыленному потоку закрученного или вращательного движения, ограниченного цилиндрическими стенками. Частицы осаждаются при отбрасывании на стенки. Такое устройство называется циклоном (рис. 1.5).

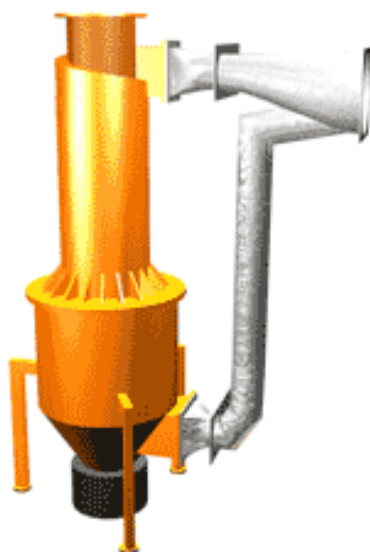


Рис. 1.5. Осадитель циклонного типа

Фракционная эффективность улавливания его может составлять > 80 % даже для частиц диаметром 10 мкм.

#### Типы циклонов

Существуют циклоны двух основных типов с тангенциальным входом и с осевым входом. На рис. 1.6 показана геометрия циклона обычного типа с тангенциальным входом и противотоком. Такой циклон устанавливается вертикально. Частицы, отброшенные на стенки, скапливаются, соскальзывая в бункер. В своем вихреобразном

движении газ изменяет направление вращения в нижней части конуса и после очистки покидает циклон через канал  $D_1$ .

В циклонах с осевым входом газ поступает через центральный штуцер вблизи одного из оснований цилиндра. Он обтекает лопасти, которые сообщают потоку вращательное движение. Уловленные частицы выносятся периферическим потоком, а чистый газ выходит в центре противоположного основания цилиндра. Имеется ряд авторских разработок, представляющих собой вариации основной схемы.

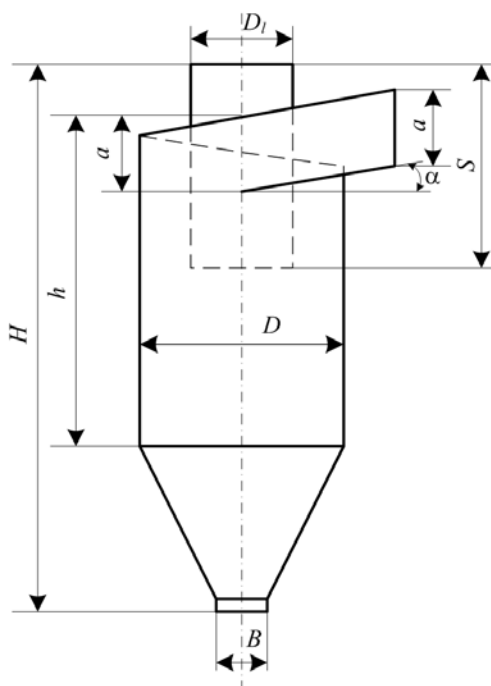


Рис. 1.6. Размеры и геометрия циклона

Циклоны изготавливают из обычной углеродистой стали, однако, если необходимо обеспечить работу при высоких температурах в агрессивной атмосфере или улавливать абразивные частицы, можно использовать любой другой металл или керамический материал. Важно, чтобы внутренние поверхности были гладкими. Устройство не содержит движущихся частей, поэтому его эксплуатация проста и относительно легка в обслуживании.

Циклонные аппараты наиболее распространены в промышленности. Они имеют следующие достоинства:

- отсутствие движущихся частей в аппарате;
- надежность работы при температурах газов вплоть до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для работы при более высоких температурах циклоны изготавливают из специальных материалов);
- возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями;
- улавливание пыли в сухом виде;

- почти постоянное гидравлическое сопротивление аппарата;
- успешная работа при высоких давлениях газов;
- простота изготовления;
- сохранение высокой фракционной эффективности очистки при увеличении запыленности газов.
- Недостатки:
  - высокое гидравлическое сопротивление: 1250...1500 Па;
  - плохое улавливание частиц размером <5 мкм;
  - невозможность использования для очистки газов от липких загрязнений.

Основные конструкции циклонов (по подводу газов) показаны на рис. 1.7. По способу подвода газов в аппарат их подразделяют на циклоны со спиральными, тангенциальным и винтообразным, а также

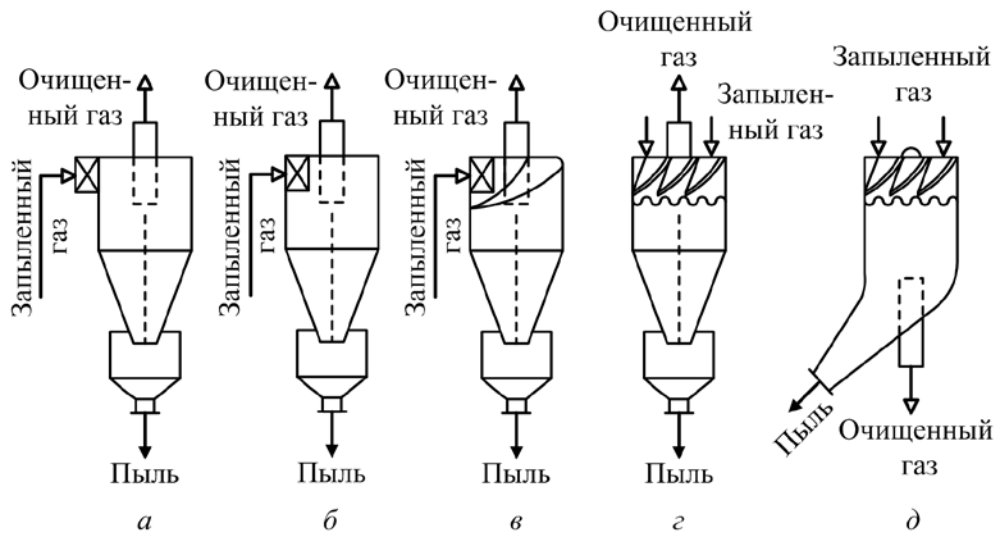


Рис. 1.7. Основные виды циклонов (по подводу газов):  
*а* – спиральный; *б* – тангенциальный; *в* – винтообразный; *г, д* – осевые (розеточные)

осевым подводом. Циклоны с осевым (розеточным) подводом газов работают как с возвратом газов в верхнюю часть аппарата, так и без него (вид *д*). Последний является прямоточным и отличается низким гидравлическим сопротивлением и меньшей по сравнению с другими циклонами эффективностью. Наиболее предпочтительным по форме с точки зрения аэродинамики является подвод газов по спирали. Однако на практике все способы подвода газа могут использоваться в равной степени.

Принцип работы циклона показан на рис. 1.8 *а*. Газ вращается внутри циклона, двигаясь сверху вниз, а затем движется вверх. Частицы пыли отбрасываются центробежной силой к стенке. 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.

Эффективность улавливания частиц пыли в циклоне  $\eta$  прямо пропорциональна скорости газов в степени  $\frac{1}{2}$  и обратно пропорциональна диаметру аппарата также в степени  $\frac{1}{2}$ .

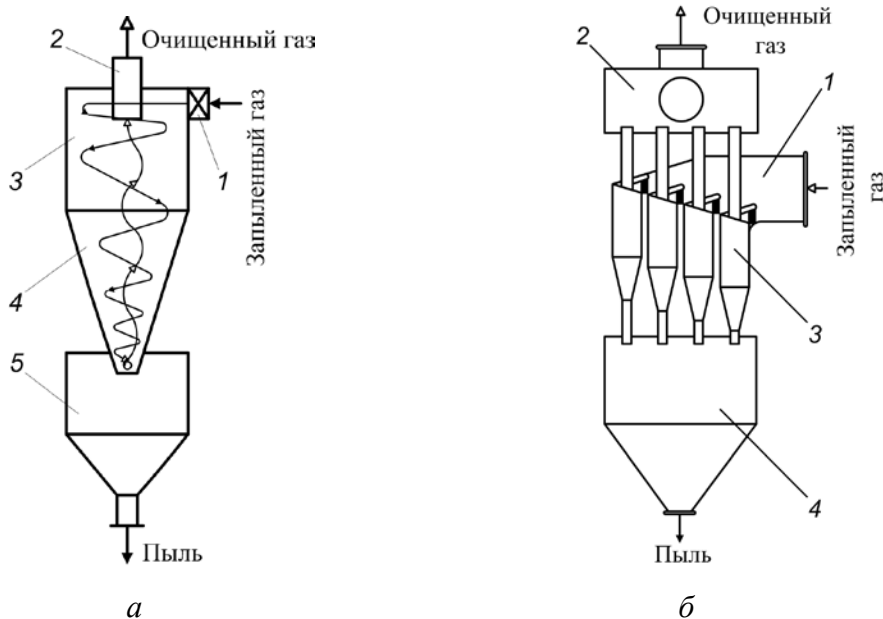


Рис. 1.8. Циклоны:

- а* - одинарный: 1 - входной патрубок, 2 - выхлопная труба, 3 - цилиндрическая камера, 4 - коническая камера; 5 - пылеосадительная камера;  
*б* - групповой: 1 - входной патрубок, 2 - камера обеспыленных газов, 3 - циклонный элемент, 4 - бункер

Процесс целесообразно вести при больших скоростях  $w_T$  и небольших  $D$ . Однако увеличение  $w_T$  может привести к уносу пыли из циклона и резкому увеличению гидравлического сопротивления. Поэтому целесообразно увеличивать эффективность циклона за счет уменьшения диаметра аппарата, а не за счет роста скорости газов.

Оптимальное соотношение  $\frac{H}{D} = 2 \dots 3$ .

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

На практике широко используют циклоны НИИОгаза – цилиндрические (с удлиненной цилиндрической частью) и конические

(с удлиненной конической частью). Цилиндрические относятся к высокопроизводительным аппаратам, а конические – к высокоэффективным. Диаметр цилиндрических циклонов не более 2000 мм, а конических – не более 3000 мм.

Гидравлическое сопротивление циклонов определяют по формуле

$$\Delta P_{\text{ц}} = \frac{\xi_{\text{ц}} \cdot w_{\text{г}}^2 \cdot \rho_{\text{г}}}{2},$$

где  $w_{\text{г}}$  – скорость газов в произвольном сечении аппарата, относительно которого рассчитана величина  $\xi_{\text{ц}}$ , м/с.

Коэффициент сопротивления

$$\xi_{\text{ц}} = \frac{0,00513 \cdot K_l \cdot a \cdot b}{D_l^2},$$

где  $K_l$  – коэффициент, соответственно равный 16 для циклонов с тангенциальным входом газа и 7,5 – для циклонов с розеточным входом;  $a$  и  $b$  – размеры входного патрубка (рис. 1.6);  $D_l$  – диаметр выхлопной трубы.

Циклоны широко используются в цементной, угольной, химической, металлургической промышленности для очистки газов от пыли с размером частиц больше 10 мкм или в качестве первой ступени очистки перед пылеуловителями более интенсивного действия.

Наряду с одиночными находят применение батарейные циклоны, или мультициклоны, представляющие собой аппараты, состоящие из большого числа параллельно установленных циклонных элементов в одном корпусе, а также групповые циклоны (рис. 1.8 б).

К пылеуловителям центробежного типа относятся ротационные, в которых пылегазовая смесь приводится во вращательное движение и пыль выделяется из очищаемого газа под действием центробежных сил. Их производительность по газу лежит в пределах от 870 до 2000 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>, а степень очистки – от 80 до 99 %.

### **Групповые циклоны**

При больших расходах очищаемых газов применяют групповую компоновку аппаратов. Это позволяет не увеличивать диаметр циклона, что положительно сказывается на эффективности очистки. Схема групповых циклонов дана на рис. 1.8, б. Запыленный газ входит через общий коллектор, а затем распределяется между циклонными элементами.

Коэффициент гидравлического сопротивления группы циклонов определяют по формуле

$$\xi = \xi_{\text{ц}} + K_3,$$

где  $\xi_{\text{ц}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Поправочный коэффициент  $K_3$  для групп циклонов

| Характеристика группового циклона                 | $K_3$ |
|---|-------|
| Круговая компоновка, нижний организованный подвод | 60    |

Окончание табл. 1.4

|  |    |
|--|----|
| Прямоугольная компоновка, циклонные элементы расположены в одной плоскости. Отвод из общей камеры чистого газа | 35 |
| То же, но улиточный отвод из циклонных элементов   | 28 |
| Прямоугольная компоновка. Свободный подвод потока в общую камеру   | 60 |

### Батарейные циклоны

Батарейные циклоны – объединение большого числа малых циклонов (мультициклонов) в группу. Снижение диаметра циклонного элемента преследует цель увеличения эффективности очистки. Схема батарейного циклона приведена на рис. 1.8, *а*. Элементы батарейных циклонов (рис. 1.8, *б* и *в*) имеют диаметр 100, 150 или 250 мм. Оптимальная скорость газов в элементе лежит в пределах от 3,5 до 4,75 м/с, а для прямоточных циклонных элементов от 11 до 13 м/с.

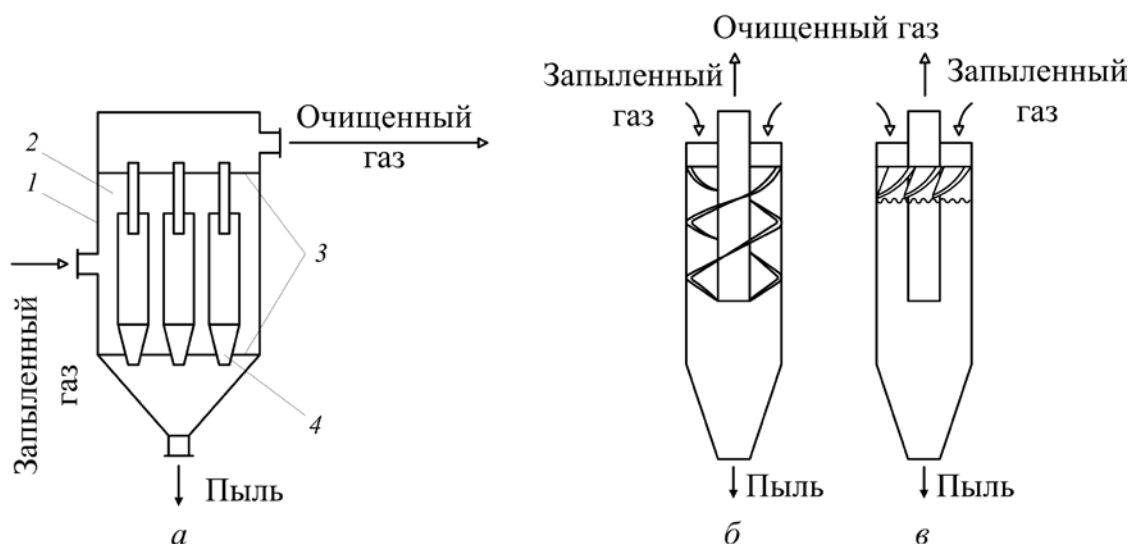


Рис. 1.8. Батарейный циклон:

*а* - схема: 1 - корпус, 2 - распределительная камера, 3 - решетки, 4 - циклонный элемент; *б* - элемент с направляющим аппаратом типа «винт»; *в* - элемент с направляющим аппаратом типа «розетка»

Допускаемая запыленность газов при их очистке от слабо-



слипающихся пылей в мультициклонах может быть определена по приведенным ниже данным:

|   |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|
| Диаметр элемента, мм  | 100 | 150 | 250 |
| Допускаемая концентрация<br>частицы при различных типах<br>завихрения, г/м <sup>3</sup> : |     |     |     |
| – «винт»,   | 35  | 50  | 100 |
| – «розетка»   | 15  | 35  | 75  |

#### **1.3.4. Улавливание аэрозолей мокрыми скрубберами**

В последние годы в нашей стране и за рубежом получил значительное распространение мокрый (гидравлический) способ очистки промышленных газов от пыли, отличающийся высокой эффективностью и требующий значительно меньших затрат по сравнению с методом сухой очистки.

Мокрым скруббером называют любой прибор, в котором используется жидкость для отделения дисперсной или газообразной примеси от газа. Это определение носит очень общий характер. Скрубберы отличаются большим разнообразием конструкций, поскольку существует много способов осуществления контакта между газом и жидкостью. Изготовители скрубберов предлагают широкий набор аппаратов, различающихся по конструктивному решению, размерам, техническим характеристикам, стоимости изделия и его функциональности.

По принципу работы аппараты мокрой очистки газов подразделяются на несколько групп: полые и насадочные аппараты, барботажные и пенные аппараты, аппараты ударно-инерционного типа, центробежного типа, динамические и турбулентные промыватели.

#### **Мокрые скрубберы**

Мокрые скрубберы – это устройство, где используется жидкость для газоочистки. В некоторых скрубберах первичный захват происходит на водной поверхности, в других – водой смывают частицы, осажденные на твердой поверхности. В последнем случае для первичного улавливания частиц используют один из типов сухих коллекторов, например, фильтр или циклонный сепаратор.

#### **Описание системы**

Мокрый скруббер представляет лишь один из компонентов целой системы, которая забирает газовый поток в источнике и направляет его в атмосферу. Из схемы обобщенной скрубберной системы (рис. 1.9) видно, что некоторые компоненты этой системы являются общими для

всех систем улавливания, а другие – специфичны для систем скрубберного орошения. Поскольку свойства частиц весьма изменчивы, чрезвычайно важна судьба газового потока до его поступления в зону улавливания.

В мокрых скрубберах реализуется тесный, бурный контакт газа и жидкости, сопровождающийся генерацией жидких капель. Захват капель газом может привести к уносу жидкости из скруббера в перегреватель, канал, вентилятор, дымовую трубу, а затем в атмосферу. Если не принять мер к отделению захваченной потоком жидкости, то это может вызвать коррозию, эрозию, забивание, повреждение вентиляторов и выбросы загрязнителя.

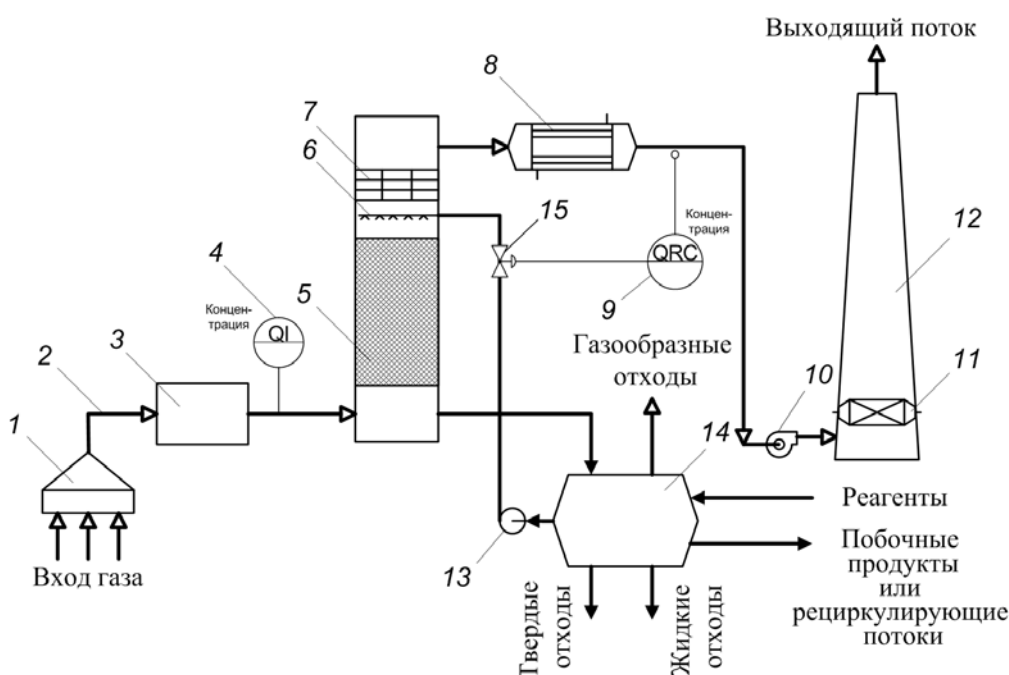


Рис. 1.9. Скрубберная система:

- 1 - всасывающий колпак; 2 - газоходы; 3 - система предварительной обработки; 4 - анализатор; 5 - скруббер; 6 – оросительный механизм; 7 - сепаратор уноса; 8 - теплообменник; 9 - регулятор; 10 - вентилятор; 11 - подогреватель; 12 - труба; 13 - насос; 14 - устройство для подготовки жидкости; 15 - управляющий клапан

Загрязнитель, накапливающийся в жидкости, используемой для орошения скрубберов, следует удалять из системы. В зависимости от конкретной ситуации для отделения твердой фазы от жидкости можно использовать различные методы, которые не рассматриваются в этой главе. Изменения жидкости, в том числе вследствие суспензирования твердых частиц, могут приводить к накоплению осадка, эрозии, коррозии и другим серьезным проблемам в эксплуатации скруббера. Поэтому вопросам обработки жидкости и захоронению отходов необходимо уделять серьезное внимание.

## Поведение частиц

В скрубберах любого типа частицы удаляют по одному или нескольким основным механизмам.

1. *Гравитационная седиментация.* Этот механизм не имеет большого значения применительно к скрубберам.

2. *Центробежное осаждение.* Частицы могут быть выброшены из газового потока центробежной силой, обусловленной изменением направления течения. Крупномасштабные изменения направления течения, какие наблюдаются в циклонах, малоэффективны для удаления частиц диаметром менее 5 мкм.

3. *Инерционный захват и касание.* При обтекании малого объекта газовым потоком инерция вынуждает частицы продолжать перемещаться по направлению к объекту, причем некоторые из них осаждаются на нем. Фактически это то же самое, что центробежное осаждение, и различие в определениях дается по традиции. Инерционный захват обусловлен изменениями направления течения в малом масштабе.

Поскольку инерционное осаждение эффективно для улавливания частиц диаметром порядка всего несколько десятых микрометра, это наиболее важный механизм захвата частиц в обычных скрубберах. Все основные свойства частицы могут быть сведены к одному параметру – аэродинамическому диаметру, определяемому как

$$d_{\text{чА}} = d_{\text{ч}} \cdot (\rho_{\text{ч}} \cdot C')^{\frac{1}{2}},$$

где  $d_{\text{чА}}$  – аэродинамический диаметр частиц, мкм;  $d_{\text{ч}}$  – физический диаметр частицы, мкм;  $C'$  – безразмерная поправка Каннингема.

Большинство методов измерения размера частиц, например с помощью каскадного импактора, позволяют определять именно аэродинамический диаметр. Поскольку это наиболее важный параметр, характеризующий инерционное осаждение частиц, нет необходимости знать истинный физический размер или плотность частицы  $\rho_{\text{ч}}$ .

4. *Броуновская диффузия.* Когда частицы достаточно малы, например, имеют диаметр менее 0,1 мкм, они смещаются под ударами газовых молекул подобно самим молекулам. Поэтому эти частицы диффундируют случайным образом через газ вследствие броуновского движения. В общем инерционное осаждение и броуновская диффузия являются главными механизмами улавливания частиц скрубберами. Для частиц диаметром свыше 0,3 мкм более важно инерционное осаждение, его эффективность растет с увеличением размера частиц. При диаметре частиц, меньшем 0,3 мкм, начинает преобладать диффузия, эффективность которой растет с уменьшением размера.

5. *Термофорез*. При наличии теплопередачи от газа к жидкости должен существовать соответствующий градиент температуры, тогда частицы смещаются к более холодной поверхности из-за разности интенсивности бомбардировки газовыми молекулами с разных направлений. Этот эффект редко имеет большое значение в скрубберах.

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

7. *Электростатическое осаждение*. Если частицы несут электростатический заряд, то они могут быть осаждены из газового потока под действием градиента заряда. Этот механизм обеспечивает высокую эффективность улавливания частиц всех размеров.

8. *Конденсация на частицах*. Хотя этот процесс сам по себе не является механизмом улавливания, увеличение массы частиц вследствие пленочной конденсации водяного пара на них повышает эффективность инерционного осаждения. Это явление может происходить одновременно с диффузиофорезом и термофорезом при конденсации в скрубберах. Комбинацию этих механизмов обозначают как градиентно-силовое / конденсационное (ГСК) улавливание.

9. *Коагуляция*. Частицы могут слипаться при столкновениях вследствие броуновского движения или турбулентности. Коагуляция или агломерация может приводить к увеличению размера частиц и повышению эффективности осаждения, но не по диффузионному механизму.

### **Классификация скрубберов**

Приводимая здесь классификация подразделяет скрубберы на группы по общим признакам, в основном по главным механизмам улавливания частиц. Чтобы определить, к какой группе относится конкретный скруббер, необходимо исходить из собственной точки зрения на конструкцию и принцип действия устройства.

В полых и насадочных аппаратах (рис. 1.10, *а, б*) запыленные газы пропускают через поток распыляемой, разбрызгиваемой или стекающей по насадке жидкости. Частицы пыли захватываются потоками промывной жидкости и осаждаются в аппарате, а очищенные газы выбрасываются в атмосферу. Полые и насадочные пылеуловители наиболее полно задерживают частицы пыли размером более 10 мкм.

В барботажных и пенных аппаратах запыленные газы пропускаются сквозь слой жидкости или пены (рис. 1.11, *а*); большая

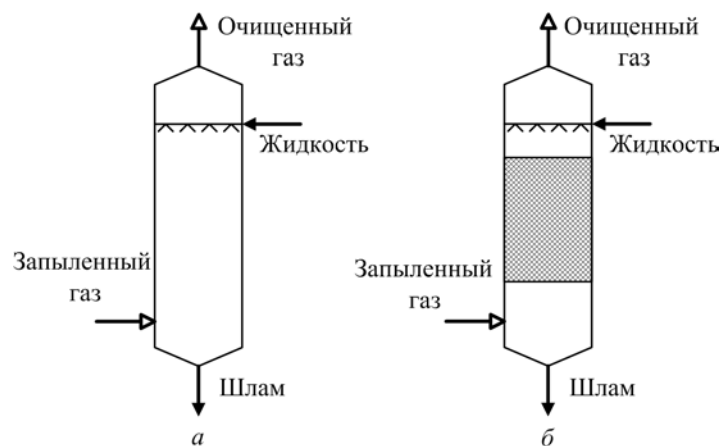


Рис. 1.10. Конструкции скрубберов:

*a* - полый скруббер-газопромыватель; *б* - противоточный насадочный скруббер  
 поверхность соприкосновения газа с жидкостью (пенной) обеспечивает высокую степень его очистки от взвешенных частиц. Так, в аппаратах с псевдооживленной шаровой насадкой улавливается до 99 % частиц размером от 2 мкм и более.

Мокрые газоочистные аппараты ударно-инерционного типа работают по принципу инерционного осаждения частиц во время преодоления очищаемыми газами препятствия или при резком изменении направления движения газового потока над поверхностью жидкости (рис. 1.11, *б*). Их производительность по газу составляет от 2500 до 90000 м<sup>3</sup>/ч, а эффективность очистки составляет 98...99,6 %.

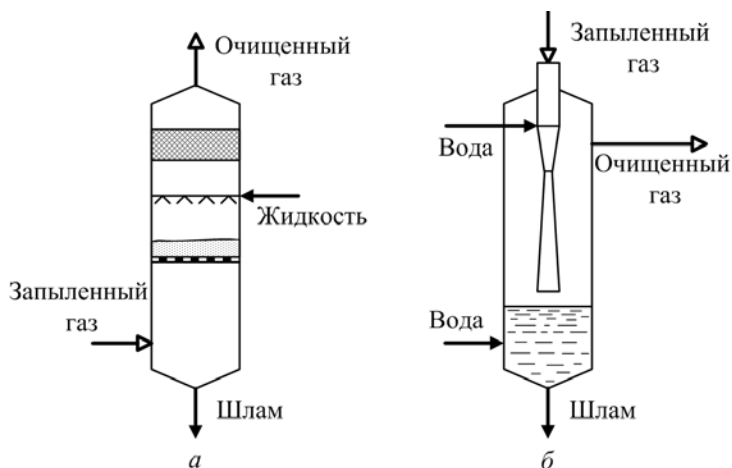


Рис. 1.11. Конструкции пылеуловителей: *a* - пенный пылеуловитель; *б* - ударно-инерционный пылеуловитель

При мокром способе пылеулавливания используют центробежную силу, причем вращение газового потока в аппарате достигается с помощью специальных направляющих лопаток или путем тангенциального подвода газа. Внутренние стенки такого «мокрого» циклона орошаются водой, стекающей вниз в виде пленки, которая

увлекает за собой частицы пыли. Максимальная производительность аппаратов по газу в зависимости от внутреннего диаметра колеблется от 50000 до 500000 м<sup>3</sup>/ч, а степень очистки газов достигает 90 %.

К пылеуловителям гидравлического типа относят динамические промыватели, в которых очищаемые газы контактируют с жидкостью, которую разбрызгивает вращающийся элемент (вал с лопастями, перфорированные диски и т. п.). Для очистки газов в промышленности используют механические скрубберы с вращающимся ротором, частично погруженным в жидкость: высокая скорость вращения ротора обеспечивает интенсивное дробление жидкости и значительную радиальную скорость движения образующихся капель. Запыленный газовый поток движется перпендикулярно жидкостным завесам, в результате чего достигается эффективная очистка газов.

Для очистки от пыли воздуха используют мокрые пылеуловители – вентиляторы, или дезинтеграторы, состоящие из корпуса и ротора с направляющими лопатками. Газовый поток движется в аппарате со скоростью 60...90 м/с, а направляющие лопатки обеспечивают интенсивное дробление жидкости, поступающей в ротор, и, следовательно, хороший контакт газа с жидкостью. Степень очистки газа достигает 70 % для частиц размером 0,5 мкм и 90...95 % при улавливании частиц размером 1 мкм.

Для очистки газов от мелкодисперсной (с размером частиц менее 1 мкм) пыли используют турбулентные промыватели, среди которых наиболее распространенным является скруббер Вентури (рис. 1.12). Он представляет собой трубу с плавным сужением на входе газа и плавным расширением на выходе.

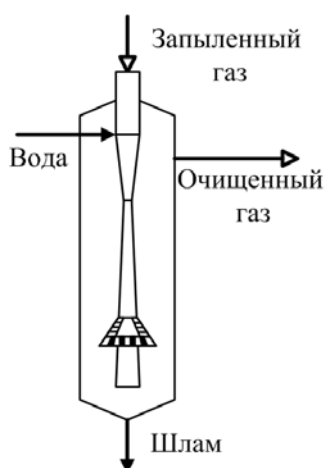


Рис. 1.12. Скруббер Вентури со встроенным пылеуловителем.

В наиболее узкую часть трубы Вентури – горловину – с помощью форсунок подводится жидкость, а запыленный газ проходит сквозь горловину с большой скоростью, вступая в тесный контакт

с жидкостью, мельчайшие капельки которой образуют своего рода водяной фильтр. При улавливании частиц, размер которых меньше 0,1 мкм, требуется более продолжительный контакт запыленных газов с поверхностью диспергированной жидкости, что достигается снижением скорости газов до 50 м/с и увеличением плотности орошения до 3,5 л/м<sup>3</sup> газа. При улавливании частиц больше 0,1 мкм скорость газа в горловине может быть повышена до 120 м/с. Средняя эффективность очистки газов в скруббере Вентури достигает 95...99 %.

### **Тарелочные скрубберы**

Тарелочный скруббер представляет собой колонну с одной или более тарелками внутри. Газ поступает в нижнюю часть колонны и должен пройти через перфорацию, клапаны, щели или другие отверстия в каждой тарелке, прежде чем покинуть колонну. Жидкость обычно вводится на верхнюю тарелку и проливается последовательно через каждую тарелку в процессе движения вниз к сливу на дне. При прохождении через отверстия газ перемешивается с жидкостью, текущей по каждой тарелке. При контактах газа с жидкостью происходит массоперенос, т. е. удаление частиц из газа, для которого и предназначен скруббер.

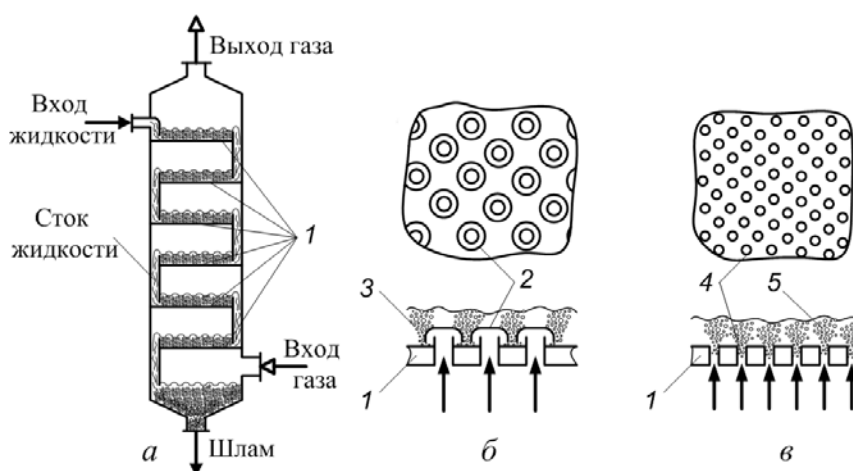


Рис. 1.13. Тарелки:

*a* - тарельчатая колонна, *б* - тарелка с барботажными колпачками, *в* - ситовая тарелка; 1 - тарелки, 2 - барботажные колпачки, 3 - жидкость, 4 - перфорационные отверстия, 5 - пена

На рис. 1.13 представлены колонна и тарелки нескольких типов. Тарелочные скрубберы различают по типу используемых тарелок (например, скрубберы с ситовыми или колпачковыми тарелками).

На небольшом расстоянии от каждого перфорационного отверстия в ситовой тарелке могут быть помещены барботажные колпачки. Такую тарелку называют колпачковой. Колпачки на тарелке

находятся ниже уровня жидкости. Осажденные частицы непрерывно смываются с этой тарелки. Осаждение частиц происходит главным образом вследствие ударов газовых струек о поверхность жидкости или твердых тел. Возможно, что улавливанию способствует диспергирование жидкости под действием газовых струй, прорывающихся через тарелку.

Эффективность улавливания возрастает с уменьшением диаметра перфорации и может обеспечить отсекание улавливания при аэродинамическом диаметре около 1 мкм и диаметре отверстий в тарелке, равном 3,2 мкм. Под диаметром отсекания понимают размер частиц, улавливаемых с эффективностью 50 %.

Эффективность улавливания неодинакова для частиц различных размеров и резко падает, когда их диаметр близок к диаметру отсекания. Когда частицы больших размеров удалены из газа, установка дополнительных тарелок мало увеличивает эффективность. Это характерно для скрубберов и об этом надо помнить, прежде чем поддаться искушению поставить два скруббера последовательно с целью повышения эффективности улавливания.

Надо соблюдать осторожность при выборе типов тарелок для систем, в которых возможны образование осадков на стенках и прилипание частиц, что ведет к забиванию перфорации.

### **Массивные насадки**

Насадочные скрубберы обычно используют в качестве абсорберов и для разделения газовых смесей, но их можно также применять для улавливания частиц. Такие скрубберы можно заполнять различными промышленно производимыми элементами (различные кольцевые и седлообразные насадки). Контакт газа и жидкости может реализоваться при попутном потоке, или при противотоке (рис. 1.14), или при перекрестном течении. Улавливание туманов насадками с последующим дренажом возможно и без дополнительного потока жидкости.

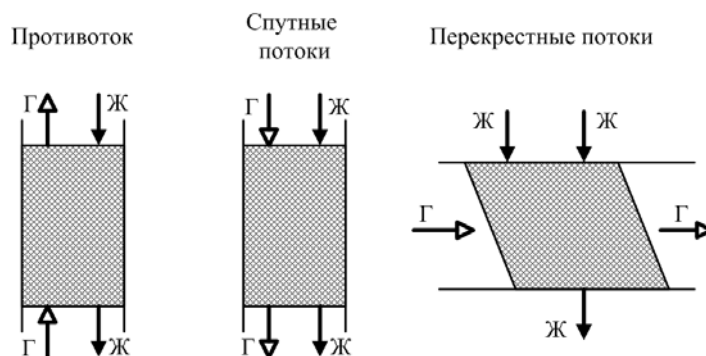


Рис. 1.14. Контактное в насадке



Осаждение в насадках происходит в основном под действием центробежных сил при криволинейном течении газа в пространстве пор и при обтекании углов элементов насадки. Происходит также инерционное осаждение при соударениях газовых струй с поверхностями. Если частицы достаточно малы, то хорошие характеристики массопереноса в насадке в отношении улавливания частиц могут обеспечиваться диффузионным осаждением.

Эффективность улавливания в инерционном диапазоне размеров частиц, т. е. при диаметре  $>0,3$  мкм, растет с уменьшением размера элементов насадки. В колоннах, наполненных седлами Берля или кольцами Рашига размером 2,5 см, диаметр отсекаания составляет  $\approx 1,5$  мкм. Насадки меньшего размера, например 1,25 см, могут обеспечить значение диаметра отсекаания, равное 0,7 мкм, при скоростях потока 9,2 м/с и спутном течении жидкости.

Насадки подвержены забиванию, но могут удаляться для очистки. При использовании пластиковых насадок существенны температурные ограничения; металлические насадки могут корродировать.

### **Волокнистые насадки**

Слой волокон можно использовать в виде различных статических или динамических систем с непрерывным или периодическим орошением (рис. 1.15.). Волокна изготовляют из таких материалов, как полимеры, стекло или сталь. Волокнистые насадки обычно имеют очень высокую долю свободного объема, находящуюся в пределах 97...99 %.

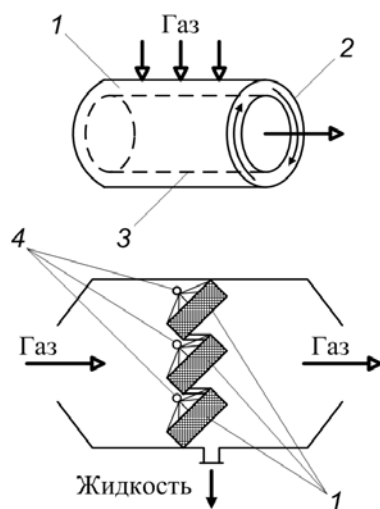


Рис. 1.15. Волокнистая насадка:  
 1 - слой волокон, 2 - полый вращающийся цилиндр, 3 - слой жидкости.  
 4 - ороситель

Для обеспечения высокой эффективности волокна должны иметь малый диаметр, но быть достаточно прочными, чтобы осаждение частиц или

капель не сопровождалось перепутыванием волокон. С этой целью используют смеси грубых и тонких волокон. Как и в случае объемных насадок, для смыывания осадков могут применяться встречные, спутные и поперечные потоки жидкости.

Если осаждение протекает по диффузионному механизму при обтекании волокон газовым потоком, то эффективность растет с уменьшением диаметра волокон и увеличением скорости течения. Диффузионное осаждение может быть очень эффективным для очень мелких частиц, и его эффективность возрастает с уменьшением скорости течения газа. Диаметр отсекаания при инерционном осаждении лежит в пределах 1,0...2,0 мкм для переплетенных проволочных сеток с диаметром проволоки 0,28 мм и может достигать  $\approx 0,5$  мкм для очень тонких проволок или большей скорости газа.

Волокнистые насадки весьма подвержены забиванию и могут оказаться непрактичными для систем с выраженной тенденцией к налипанию и в условиях, способствующих осаждению твердой фазы из суспензии. Очевидно, что такие насадки должны быть очень чувствительны к химическим, механическим и термическим воздействиям. Волокнистые насадки успешно используют во многих случаях. Их характеристики можно найти в тех же источниках, что для тарелок и насадок.

### ***Предварительное распыление жидкости***

Скрубберы с предварительным распылением жидкости собирают частицы на поверхности капель, полученных распылением в форсунках. В случае распылителей, предназначенных для какой-либо одной жидкости, свойства капель определяются конструкцией форсунки, свойствами жидкости и давлением на форсунке. Для двухфазных распылителей существенны скорости течения и давления обеих фаз (воздуха и воды или пара и воды). Капли из сопла направляются в камеру, конфигурация которой обеспечивает прохождение газа через систему распыленных капелек. Поток газа может быть горизонтальным или вертикальным, а распыл может вводиться спутным, противоточным или поперечным образом (рис. 1.16).

Улавливание частиц в этих устройствах происходит по инерционному механизму. Эффективность представляет сложную функцию размера капелек, скорости газа, отношения расходов жидкости и газа, формы траекторий капелек уноса.

В корпус 3 противоточного пылеуловителя (рис. 1.16 а) газовый поток подводится по тангенциально расположенному патрубку 8, в котором размещены смачивающее устройство, выполненное в виде омываемых неподвижных или качающихся прутков 6, и

разбрызгивающих воду форсунок 7. Пыль оседает на прутках или стенках патрубка, откуда она смывается водой в коническую часть 2 корпуса и далее в смывное устройство 1. Основная часть пыли центробежной силой отбрасывается на стенки корпуса, которые омываются водой через систему сопел 4. Очищенный газ выводится через верхний патрубок 5.

Существует оптимальный размер капелек, который зависит от параметров потока. Если капельки падают в стационарном режиме, то оптимальный размер их для сбора мелких частиц составляет 100...500 мкм. Для капелек,двигающихся с высокой скоростью на близком расстоянии от форсунки, оптимальный размер меньше. Распылительные скрубберы, в которых используются преимущества улавливания при седиментации капель, могут обеспечить диаметр отсекания 2,0 мкм при умеренных отношениях расхода жидкости и газа. Большая скорость капель обеспечивает достижение значения диаметра отсекания до 0,7 мкм. Эффективность улавливания повышается с ростом давления на форсунках и увеличением отношения расходов жидкости и газа.

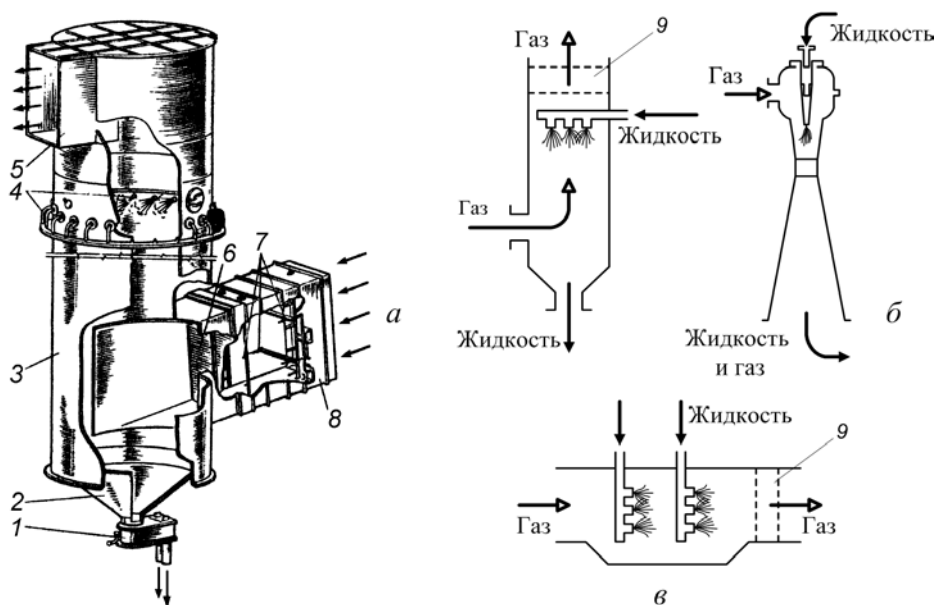


Рис.1.16. Скруббер с предварительным распылением:

- а* – противоточный; *б* - эжектор Вентури; *в* - распыление в спутном потоке;
- 1 – смывное устройство; 2 – конус; 3 – корпус; 4 – система сопел; 5 – верхний патрубок; 6 – качающиеся прутки; 7 – форсунки; 8 – тангенциальный патрубок;
- 9 – сепаратор

Распылительные скрубберы не имеют проблем, связанных с забиванием канала для течения газа, но вопросы забивания представляют большие сложности в случае систем распыления жидкости. Требуемый расход жидкости высок и обычно находится в

пределах 4...13 кг/м<sup>3</sup>, в зависимости от требуемой эффективности улавливания.

При рециркуляции жидкости в скруббере может наблюдаться эрозия и коррозия форсунок, насосов и трубопроводов. Частицы осадка и агломераты частиц могут забивать форсунки. По своей природе распыление связано с уносом жидкости и требует улавливания уносимой фракции. Перепад давления газового потока мал или может быть положительным, т. е. скруббер может подсасывать газ.

**Распыление жидкости потоком очищаемого газа**

Эти устройства используют поток газа сначала для того, чтобы распылить жидкость на капельки, а затем их ускорить. Типичными примерами таких устройств являются скруббер Вентури и сопловые скрубберы. Высокая скорость газа обеспечивает большую разность

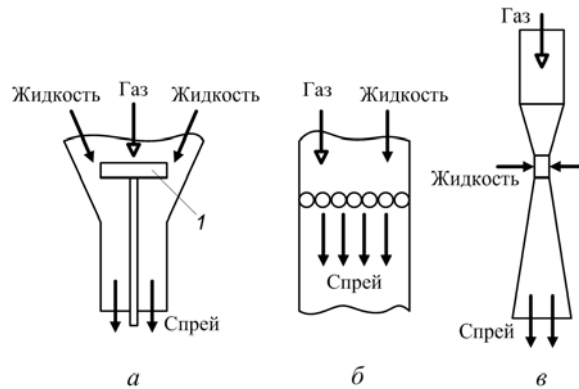


Рис.1.17. Скрубберы с распылением жидкости потоком газа:  
 а - кольцевая насадка; б - система стержней; в - скруббер Вентури;  
 1 - подвижный диск

скоростей газа и капелек и способствует улавливанию частиц. Используется диапазон скоростей 60...120 м/с. Различные конструкции скрубберов представлены на рис. 1.17. В скруббере Калверта со встречными струями (рис. 1.18) увеличение относительной скорости

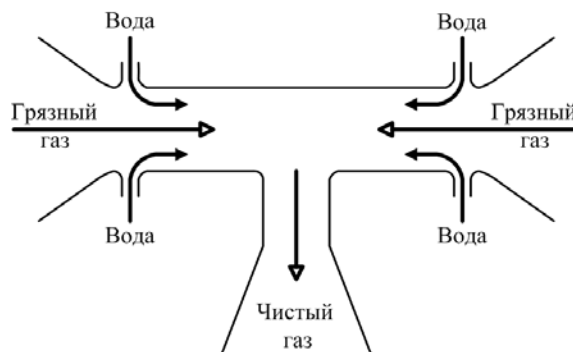


Рис. 1.18. Скруббер Калверта на сталкивающихся струях

и степени диспергации жидкости обеспечивается встречным направлением двух потоков капель, распыленных газом.

Жидкость может вводиться в различных местах и разными способами, что существенно не влияет на эффективность улавливания, если только обеспечивается однородное распределение капель. Обычно жидкость вводится на входе в сопло через несколько прямооточных насадок, направленных радиально внутрь. В других устройствах жидкость вводится в виде пленки на стенки канала выше сопла по течению потока.

Скрубберы с распылением жидкости потоком газа наиболее просты по конструкции и компактны по сравнению с другими скрубберами. Они не подвержены забиванию, но высокая скорость потока в сужениях ведет к эрозии. Существуют скрубберы с переменным сечением сопла, позволяющие варьировать перепад давления и эффективность улавливания.

### **Центробежные скрубберы**

Центробежные скрубберы сообщают вращательное движение газу, проходящему через них. Вращение может создаваться за счет тангенциального ввода газов в скруббер или благодаря направлению газового потока на искривленные неподвижные лопасти. В сухом центробежном осадителе – циклоне – можно прибегать к смачиванию стенок для уменьшения сдува частиц и смывания осадка. Для улавливания частиц по инерционному механизму и за счет эффекта касания через вращающийся газовый поток можно пропустить поток капель. Этот поток может быть направлен наружу от центрального разветвления или внутрь от коллектора, расположенного на стенках (рис. 1.19). Сопла, направленные внутрь со стены, проще обслуживать,

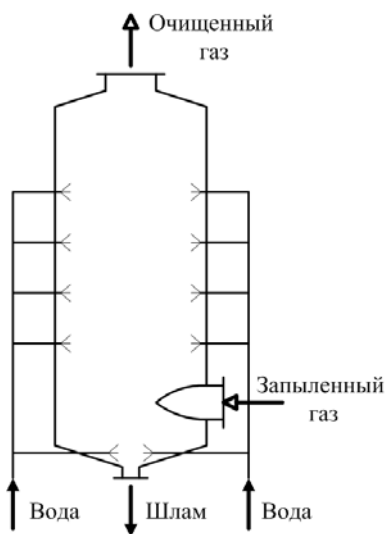


Рис. 1.19. Центробежный скруббер

поскольку к ним облегчен доступ снаружи скруббера.

Одним из механизмов улавливания частиц является центробежное осаждение, обусловленное вращением газового потока. В отсутствие капель эффективность скруббера будет такой же, как и сухого осадителя. В этом случае можно достичь значений диаметра отсекаания, равного 4,0 или 5,0 мкм. При введении капель происходит осаждение за счет инерции и касания на каплях, причем эффективность примерно такая же, как для скрубберов с предварительным распылением.

Центробежные скрубберы просты по форме и не имеют узких проходов. Они не очень подвержены забиванию, хотя на частях стенок, не подвергаемых достаточной промывке, может накапливаться осадок. При правильном конструировании центробежные устройства сами по себе обеспечивают улавливание уносимой жидкости. Тангенциальная скорость не должна превышать 30 м/с, а конфигурация стенок должна предотвращать течение жидкости по стенке к выходному отверстию.

### **Экранные скрубберы и скрубберы с вторичным потоком**

В экранных скрубберах направление потока газа изменяется под воздействием твердых поверхностей. Может быть либо изменено главное направление потока, либо наложено вторичное поле течения (рис. 1.20). Примерами поверхностей, изменяющих главное

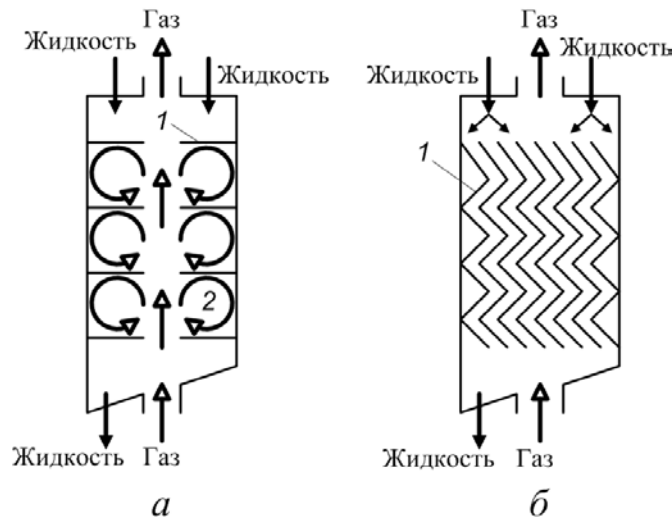


Рис. 1.20. Экран и вторичные течения:

*а* - система с вторичными течениями, *б* - зигзагообразные экраны, 1 - экран; 2 - вихрь

направление потока, являются жалюзи, зигзагообразные, дисковые и тороидальные экраны. Если улавливаемое вещество – жидкость, то она стекает по экрану в коллекторный сток. Твердые частицы можно смывать с поверхности экранов периодически.

Улавливание частиц происходит за счет центробежного осаждения, обусловленного изменением главного направления потока, или вследствие вращения вторичного потока. Для конфигураций типа сплошных или прерывистых зигзагов диаметр отсекания может составлять от 0,5 до 10,0 мкм.

Экраны используют для предварительной очистки и для улавливания уноса. Тяжелые и глинистые частицы могут скапливаться в виде осадков, вызывая забивание и коррозию.

### **Брызгальные скрубберы**

Брызгальные скрубберы, самогенерирующие капли, вынуждают поток газа соударяться с поверхностью жидкости в процессе движения к выходу (рис. 1.21). Выход газа обычно устроен таким образом, чтобы изменить направление потока и уменьшить унос капель.

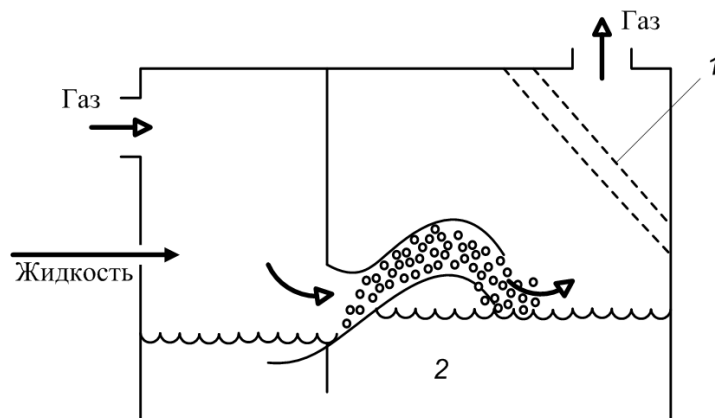


Рис. 1.21. Система «удар – унос»:  
1 - сепаратор уноса; 2 - слой жидкости

Улавливание частиц происходит обычно за счет инерции и касания при соударениях с поверхностью жидкости и капель. Размер капель и соотношение потоков жидкости и газа зависят от геометрии скруббера, но не поддаются управлению и измерению.

В общем, эффективность скрубберов типа «удар – унос» сопоставима с эффективностью скрубберов, использующих газовый поток для распыления, при том же перепаде давлений газового потока. Диаметр отсекания изменяется в диапазоне от нескольких микрометров, для низкоскоростных устройств, до десятых долей микрометра для таких высокоскоростных аппаратов, как скруббер Дойла.

Течение жидкости в скрубберах этого типа происходит вследствие действия газового потока, поэтому жидкостные насосы требуются только для системы очистки и рециркуляции. Возможно накопление твердого осадка на дне скруббера и плохо омываемых

участках стенок. Скруббер требует хорошей системы улавливания уноса вследствие генерации больших количеств распыла.

### **Скрубберы с механическими побудителями**

В скрубберах этого типа имеется лопастный вентилятор с приводом от двигателя, который побуждает газ к движению и на лопастях которого осаждаются частицы. Поток жидкости, вводимый в области ступицы вентилятора, частично распыляется, частично стекает по лопастям, омывая их. Капли жидкости улавливаются кожухом вентилятора, удаляются через сток и поступают на рециркуляцию.

Дезинтеграторные скрубберы снабжены погруженной в жидкость крыльчаткой с механическим приводом, распыляющей жидкость на мелкие капли. Капли срываются с крыльчатки и, пересекая газовый поток, улавливают частицы.

Механический скруббер состоит из поддона и кожуха, в котором вращается горизонтальный вал с насаженными на него перфорированными дисками, частично погруженными в ванну с жидкостью (рис. 1.22).

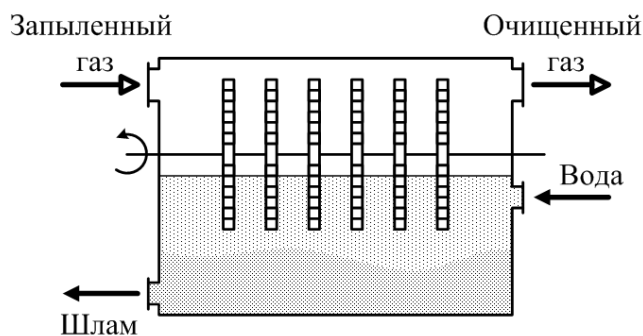


Рис. 1.22. Скруббер с механическим побуждением

Механизмами улавливания, перечисленными в вероятном порядке их важности, в данном случае являются инерционный захват и касание на каплях жидкости, на крыльчатке, а также центробежное осаждение на стенках кожуха. В скрубберах с низкоскоростными вентиляторами при достаточно тонком распыле жидкости достигаются значения диаметра отсекания до 2,0 мкм. Дезинтеграторные скрубберы обеспечивают диаметр отсекания даже до 1,0 мкм.

В общем скрубберы с механическими побудителями не дают энергетического выигрыша по сравнению с устройствами других типов. При сопоставимой эффективности дезинтеграторы требуют большего расхода энергии, чем скрубберы, использующие для распыления поток газа. Далее, удары брызг жидкости и суспензии о части этих скрубберов приводят к сильной эрозии и коррозии. Вращающиеся части



подвержены усталости, вызванной вибрацией вследствие накопления твердых осадков, а также износу, ведущему к разбалансу.

### **Скрубберы с подвижным слоем**

В этих скрубберах имеется зона подвижной насадки, обычно из полимерных или стеклянных сфер, в которой осуществляется тесный контакт жидкости и газа. К корпусу устройства крепится опорная сетка, на которую помещают подвижную насадку. Как показано на рис. 1.23,

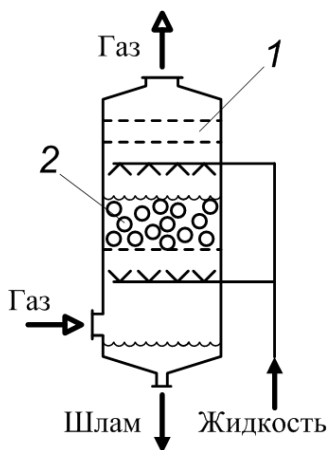


Рис. 1.23. Скруббер с подвижным слоем:  
1 - сепаратор уноса, 2 - оживленный слой полых сфер

газ проходит через насадку снизу вверх, в то время как жидкость распыляется в нижней части устройства в направлении вверх и (или) орошает насадку сверху. Скорость газа достаточна для того, чтобы вызвать местные перемещения насадки в процессе работы устройства. Эти перемещения способствуют турбулизации слоя и очистке элементов насадки. Если используются сферы с полостями или изготовленные из материалов малой плотности, то слой может сжижаться и его толщина возрастает вдвое по сравнению с состоянием покоя.

Улавливание происходит за счет инерции и касания капель жидкости и элементов насадки. При использовании насадки типа «шарики для пинг-понга» и наличии трех слоев насадки в колонне достигается диаметр отсекаания 1,0 мкм. Действие менее интенсивно перемешиваемой насадки типа «мрамора» напоминает поведение неподвижных объемных насадок, если скорость газа не настолько велика, чтобы вызвать сжижение слоя.

Скруббирование горячего влажного газа относительно холодной жидкостью представляется привлекательным с точки зрения экономики, если температура газа достаточно велика. Такой скруббер при

умеренном перепаде давлений может обеспечить такую же эффективность, как высокоэнергетический скруббер Вентури, если конденсация протекает достаточно интенсивно. Конструкция и экономическая эффективность скруббера должны прорабатываться применительно к каждому конкретному случаю.

При удачной конструкции и соответствующем выборе рабочих параметров весьма эффективными могут быть скрубберы с электростатическим оборудованием. Их достоинством является возможность улавливания частиц размером менее 1 мкм. Доступные разновидности этих приборов включают мокрые электростатические осадители, скрубберы типа «заряженная пыль – заземленная жидкость»; скрубберы с зарядкой капель и устройства «заряженная пыль – заряженная жидкость». Предсказать эффективность этих устройств трудно, поэтому они требуют опробования. Серьезными проблемами при использовании этого класса скрубберов являются электрическая изоляция и коррозия.

### **Улавливание уноса**

Неприятное следствие интенсивности контакта между жидкостью и газом в скруббере – распыление и унос части жидкости очищаемым газом. В общем случае унос или туман содержит и суспензированное, и растворенное твердое вещество.

Во многих случаях избыточный унос ограничивает производительность скруббера. Если скруббер сам по себе может очищать большой поток газов, то скорость, при которой унос становится избыточным, ограничивает производительность.

### **Принципы сепарации**

Капли, унесенные из контактной зоны скруббера, могут быть отделены от газа с использованием тех же механизмов, которые были описаны для частиц. Поскольку капли крупнее частиц, основными механизмами являются гравитационное осаждение, инерционное и центробежное осаждение.

### **Типы оборудования**

Устройства, используемые для улавливания уноса, могут быть разделены на категории по принципу действия следующим образом:

1. *Гравитационное осаждение.* Седиментация всегда существенна и важна внутри скруббера и в выходном канале. Однако сепараторы, основанные на этом принципе, редко устанавливаются на выходе скруббера.

2. *Центробежное осаждение.* Циклонные сепараторы различных типов используются широко. Для сообщения газу вращательного движения внутри корпуса скруббера устанавливают радиальные экраны и направляющие перегородки. Зигзагообразные, шевронные, рифленые перегородки и аналогичные приспособления могут вызвать однократное или множественные изменения направления потока. Капли осаждаются на экранах и пленка уловленной жидкости либо стекает вниз по экрану, если экран вертикальный, или падает каплями, если экран горизонтальный. Изменения направления потока в канале также могут вызвать осаждение крупных капель.

3. *Инерционное осаждение.* Для этого горизонтальный или вертикальный поток пропускают через слой насадок из массивных элементов, таких, как кольца, седла и т. п. Можно также использовать для этой цели слой проволочных сеток, экранов, стекловолокон. В других инерционных устройствах используются системы круглых труб, подкосов, распорок и других предметов, ориентированных горизонтально или вертикально. В специальных случаях применяют тарелки (перфорированные, с клапанами, отбойниками и др.). Поскольку эти устройства сами по себе являются скрубберами, они генерируют унос. Поэтому следует тщательно оценивать возможность их использования после скрубберов других типов.

### **1.3.5. Улавливание аэрозолей и пыли фильтрами**

#### **Принцип работы**

Одним из наиболее совершенных способов очистки газов от пыли является их фильтрация через пористые перегородки. Этот способ обеспечивает более высокую степень очистки, чем сухое или мокрое пылеулавливание, и стабильную работу в широком диапазоне температур, физико-химических свойств улавливаемых частиц и расхода газа.

*Фильтрация* – один из старейших и наиболее широко используемых методов удаления частиц из запыленных газовых потоков. В современном виде фильтрация обеспечивает улавливание самых разнообразных частиц размером от видимого до околомолекулярного. Фильтрация вне конкуренции, когда речь идет об обеспечении исключительно высокой эффективности улавливания очень мелких частиц ценой умеренных затрат.

Промышленные фильтры условно делят на три класса: *тканевые*, *волоконистые* и *зернистые* (гранулированные).

Тканевые фильтры изготовляют из тканых или валяных набивных материалов, которые служат подложкой для слоя пыли. В большинстве

случаев именно слой пыли обеспечивает высокую интенсивность захвата частиц, после того как образуется однородный слой на поверхности фильтра. Ткань периодически очищается от накопившихся частиц.

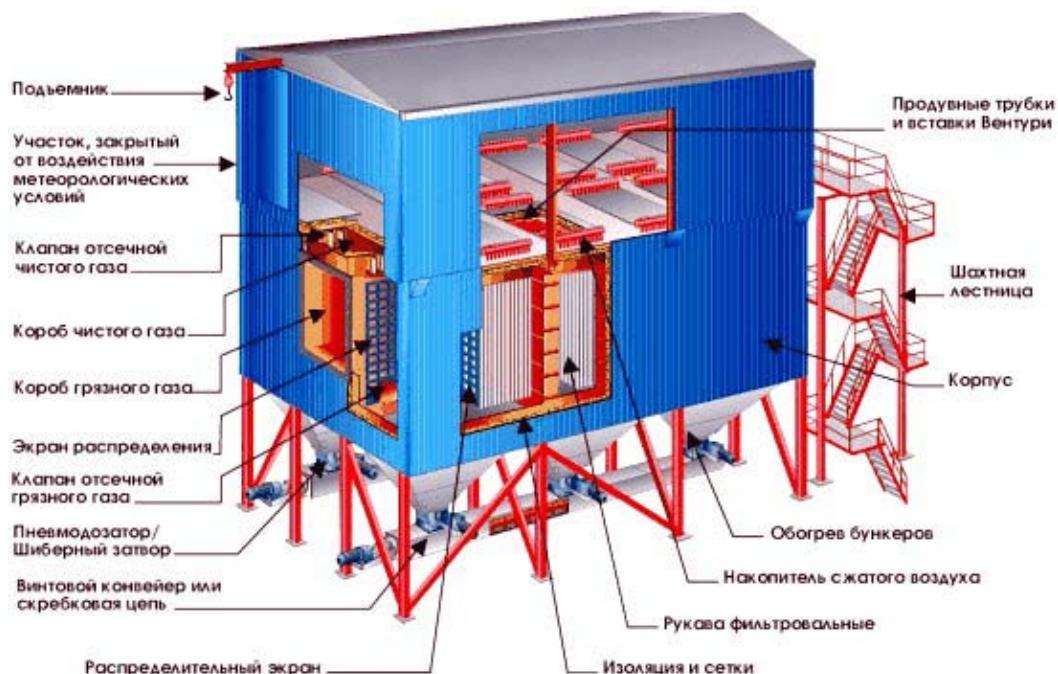


Рис. 1.24. Установка рукавных фильтров

Наибольшее распространение в промышленной газоочистке получили *тканевые рукавные фильтры* (рис. 1.24), состоящие из ряда тканевых рукавов с заглушенным верхним отверстием, которые укреплены в металлическом кожухе. Поступая в нижнюю часть аппарата, газ проходит сквозь ткань рукавов, а пыль осаждается на поверхности ткани и в ее порах, откуда ее периодически удаляют. Для улавливания зернистой гладкой пыли используют ворсистые шерстяные ткани, для волокнистой пыли – гладкие. Ткани, используемые в качестве фильтрующих материалов, должны отличаться прочностью, стойкостью к истиранию, устойчивостью к агрессивным воздействиям и высокой температуре, хорошей пылеемкостью и минимальным влагопоглощением. Рукавные фильтры способны задерживать пылевые частицы от 1...2 мкм и выше и имеют, в зависимости от площади фильтрующей поверхности, производительность по газу от 2400 до 15500 м<sup>3</sup>/ч.

Преимуществом *зернистых фильтров* является способность работать в агрессивных средах и при высоких температурах, выдерживать большие механические нагрузки и перепады давления. В качестве фильтрующих материалов используют песок, гальку, шлаки, кокс, графит, древесные опилки и другое дешевое и доступное сырье.

Различают фильтры насыпные с неподвижным фильтрующим веществом и фильтры с движущейся средой и непрерывным удалением из установки частиц зерен. Недостатком зернистых фильтров является необходимость частой регенерации, которая зачастую протекает медленно из-за глубокого проникновения тонкодисперсных частиц в поры фильтра.

Хотя *волокнистые фильтры* во многих отношениях напоминают тканевые, они обладают высокой эффективностью и до накопления слоя пыли. В зависимости от плотности и (или) толщины слоя волокон можно достичь относительно высокой эффективности улавливания ( $\approx 90\%$ ) в отсутствие накопленного пылевого слоя. Такие фильтры заменяют, а не очищают, за исключением проволочных экранов большой емкости.

### **Область применения фильтров**

Тканевые фильтры используют там, где необходимо достичь высокой эффективности и где условия позволяют использовать фильтр без его повреждения или нанесения ущерба процессу. Применение фильтров ограничено температурами, превышающими 500...600 К, при которых разрушается ткань или укорачивается срок ее службы до экономически невыгодного, а также составом газа или частиц, которые могут разрушать ткань или не поддаются удалению из фильтра. Например, не удаляются клейкие частицы, поскольку невозможно заранее покрыть волокна абсорбирующим, но не клейким материалом. Часто отмечают, что фильтры непригодны для улавливания жидкостей, тем не менее при правильном выборе фильтра можно задерживать и жидкие капельки. С помощью фильтров улавливаются и малые частицы размерами вплоть до молекулярных, оседающие благодаря высоким коэффициентам диффузии. Многие технологические трудности могут быть решены изменением условий работы фильтра, например, охлаждением газового потока до температуры, безвредной для фильтра.

Для первичной фильтрации при температурах, превышающих 500...600 К, используют гравийные фильтры. Эти фильтры громоздки и тяжелы. Высокая эффективность улавливания обеспечивается при правильном выборе конструкции и режима эксплуатации.

Волокнистые фильтры обычно не очищают. Их используют, когда концентрация частиц низка ( $<2\text{ г/м}^3$ ) и фильтр может прослужить достаточно долго, не требуя замены.

Если необходима высокая эффективность улавливания, то вместо фильтров можно использовать электрофильтры и мокрые скрубберы. Механические сепараторы играют второстепенную роль и применяются для предварительной очистки. Электрофильтры могут конкурировать

с тканевыми фильтрами, если электрическое сопротивление частиц лежит в пределах  $10^{13} \dots 10^{14}$  Ом·м; требуемая эффективность улавливания менее 99,5 %, поток газа не превышает  $\approx 10^5$  г/(м<sup>3</sup>·ч), а доля субмикрометровых частиц относительно мала. Скрубберы конкурентоспособны, когда необходимо обрабатывать большой поток газа с помощью малогабаритного оборудования, нет проблем, связанных с отводом жидкости и шлама, а требования по улавливанию мелких частиц невысоки. Механические сепараторы используются для улавливания крупных частиц с относительно небольшими затратами, когда не требуется высокая эффективность улавливания частиц диаметром менее 5...10 мкм.

### Механизмы улавливания и их относительное значение

При приближении частицы к волокну действует несколько механизмов, которые могут привести к ее улавливанию:

- 1) касание;
- 2) инерционный захват;
- 3) диффузия;
- 4) электростатическое осаждение;
- 5) термофорез;
- 6) гравитационное осаждение;
- 7) ситовой эффект.

Данные рис. 1.25 иллюстрируют действие наиболее важных из этих механизмов. В каждом случае предполагается, что частица захватывается, если касается волокна, нити или ранее осажденной частицы.

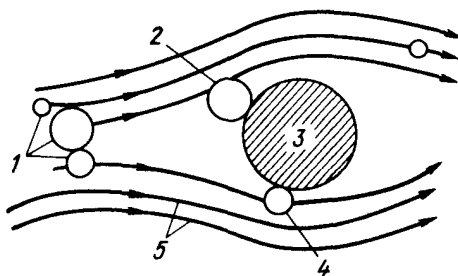


Рис. 1.25. Механизмы захвата частиц – касание и инерция

1 - частицы, 2 - инерционный захват, 3 - нить или волокно, 4 - касание; 5 - линии тока

**Касание.** Частица переносится вдоль линии тока газа к нити или волокну (препятствию). Если частица движется мимо препятствия на расстоянии меньше своего радиуса, то она касается препятствия и захватывается.

**Инерция.** Частица находится на линии тока, следуя которой она прошла бы мимо препятствия, не касаясь его, но под действием инерции частица сходит с первоначальной линии тока. В результате она

сталкивается с препятствием. Чем больше частица, тем больше ее инерция, лучше условия для захвата. При обычных скоростях течения в фильтрах этот механизм мало эффективен для частиц диаметром менее микрометра.

*Диффузия.* Частица настолько мала, что ее траектория становится хаотичной из-за броуновского движения. Захват может произойти, если случайное отклонение приводит частицу к волокну (рис. 1.26). Этот механизм становится наиболее важным, когда размер частиц меньше 0,1 мкм.

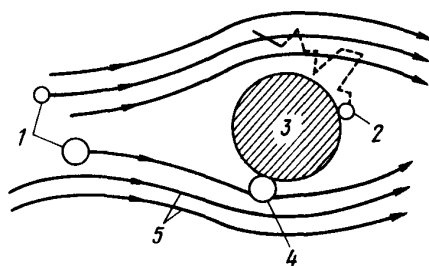


Рис. 1.26. Механизм захвата частиц – диффузия и электрическая сила:  
1 – частицы, 2 – диффузия, 3 – нить или волокно, 4 – электрическая сила,  
5 – линии тока

*Электростатическое осаждение.* Частица и препятствие имеют заряды противоположных знаков, вследствие чего частица притягивается к препятствию.

*Термофорез.* Частица смещается к препятствию под действием градиента температуры.

*Гравитационное осаждение.* Частица смещается с линии тока, проходящей мимо препятствия к самому препятствию под действием притяжения между частицей и волокном или под действием земного тяготения. Этот эффект очень мал.

*Ситовой эффект.* Частица задерживается из-за того, что слишком велика, чтобы пройти через данную пору или канал (рис. 1.27).

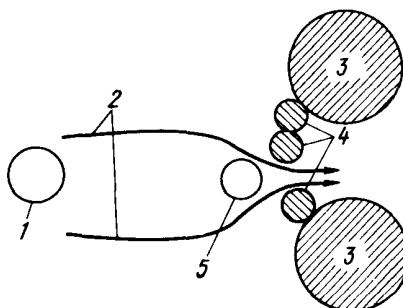


Рис. 1.27. Механизмы захвата частиц – ситовый эффект:  
1 – частица, 2 – линии тока, 3 – нить или волокно, 4 – ранее захваченные частицы, 5 – частица, размер которой больше отверстия

При осаждении одиночной частицы на изолированном волокне касание, инерция и диффузия, вероятно, являются наиболее важными механизмами. Гравитация и термофорез обычно несущественны, электрические силы могут играть и незначительную роль, и очень важную. Ситовой эффект не используется. В случае тканевых фильтров значительная часть процесса улавливания протекает в слое осадка частиц на лобовой поверхности фильтра. Утверждают, что обычные механизмы – касание, инерция и диффузия – действуют лишь в течение небольшой части всего цикла фильтрации. Как только после очистки фильтра образуется новый слой осадка, доминирующим механизмом становится ситовой эффект.

### **Механические аспекты**

Основные различия между устройствами для фильтрации с применением тканевых фильтров обусловлены фильтруемой средой, методами очистки и геометрией оборудования. Эти различия ведут к изменениям в условиях эксплуатации и обслуживания. Уловленные частицы накапливаются в объеме фильтрующего материала или образуют пылевой слой на его поверхности, что является для вновь поступающих частиц дополнительным фильтрующим материалом и повышает эффективность очистки. Однако газопроницаемость фильтра постепенно снижается и периодически необходима его регенерация.

### **Фильтруемая среда**

Основой тканевого фильтра является гибкая пористая паутина текстильного материала. Это элемент, используемый для отделения твердого дисперсного материала от газового потока. Материалы, применяемые для изготовления фильтров, разнообразны и выбирают их таким образом, чтобы они имели минимальную стоимость и допускали использование при данных температуре,  $pH$  и других химических и физических условиях, характеризующих и газовый поток, и дисперсный материал. Кроме того, фильтрующее устройство должно соответствовать геометрии тканевого фильтра, методу очистки и обеспечивать требуемую эффективность.

Для изготовления фильтров используют и натуральные, и синтетические волокна. В настоящее время преобладает использование синтетических волокон, поскольку их можно применять в более широком диапазоне температур и  $pH$ . При выборе материала фильтра можно пользоваться данными табл. 1.5. для натуральных и синтетических волокон; в нее включены также рекомендуемые диапазоны рабочих температур и сведения о стойкости к кислотам и щелочам.



Таблица 1.5.

## Карта для выбора материала

| Название или торговая марка | Природа материала                                | Свойства волокон |                      |                      |                     |           | Рабочая температура при эксплуатации, К |                 | Удлинение при разрыве, % |
|-----------------------------|--|------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------|---|-----------------|--------------------------|
|                             |  | прочность        | сопротивление износу | стойкость к кислотам | стойкость к щелочам | Горючесть | длительной                              | кратковременной |                          |
| Хлопок                      | Натуральное целлюлозное волокно                  | Хорошая          | Среднее              | Плохая               | Отличная            | +         | 341                                     | 366             | –                        |
| Полипропилен                | Полиолефин                                       | Отличная         | Хорошее              | Отличная             | »                   | +         | 346                                     | 346             |                          |
| Стекло                      | Стекло   | »                | Плохое               | Хорошая              | Плохая              | –         | 519                                     | 548             | 3...4                    |
| Нейлон                      | Полиамид   | »                | Отличное             | Плохая               | Отличная            | +         | 351                                     | 379             |                          |
| Дакрон                      | Полиэфир   | »                | »                    | Хорошая              | Очень хорошая       | +         | 393                                     | 422             |                          |
| Орлон                       | Полиакрилат                                      | Средняя          | Среднее              | Очень хорошая        | То же               | +         | 373                                     | 385             |                          |
| Микртаин                    | »  | »                | »                    | То же                | Плохая              | +         | 385                                     | 392             |                          |
| Шерсть                      | Натуральное белковое волокно                     | Плохая           | »                    | »                    | »                   | –         | 351                                     | 379             |                          |
| Тефлон                      | Фторуглерод                                      | Средняя          | Ниже среднего        | Отличная             | Отличная            | –         | 491                                     | 519             | 15...32                  |
| PВ1                         | Полибенз-имидазол                                | Отличная         | Отличное             | Хорошая              | Очень хорошая       | –         | 799                                     | 907             | 16...18                  |
| Номекс                      | Ароматический полиамид                           | Очень хорошая    | Очень хорошее        | »                    | »                   | –         | 464                                     | 479             |                          |
| Ритон,                      | Полифенилен-сульфид.                             | Средняя          | Хорошее              | »                    | Хорошая             | –         | 430                                     |                 | 25...35                  |
| Дралон Т                    | Полиакрильный гомополимер                        | Хорошая          | »                    | »                    | Отличная            | –         | 399                                     |                 |                          |
| Хайглас                     | Валяное стекловолокно                            | Отличная         | Среднее              | »                    | Плохая              | –         | 589                                     | 616             |                          |
| Горетекс                    | Пленка политетрафторэтилена на войлоке или ткани | Средняя          | Ниже среднего        | Отличная             | Отличная            | –         | 589                                     | 616             |                          |
| Бекипор                     | Коррозионностойкая сталь                         | Отличная         | Отличное             | Хорошая              | Хорошая             | –         | 713                                     | 799             |                          |

При выборе волокон надо учитывать и среднюю рабочую температуру, и допустимые ее отклонения. Воздействие чрезмерных температур или рН на фильтр может привести к утрате фильтрующих свойств в течение часа или даже за более короткое время. Параметры фильтруемой системы необходимо доводить до приемлемых значений, чтобы обеспечить возможность работы фильтра. Например, если температура очищаемого потока выше 600 К (предел для современных промышленно выпускаемых и экономически доступных фильтров), то поток должен быть предварительно охлажден.

Когда материал волокна выбран, необходимо осуществить выбор типа фильтра, его массы, плотности и толщины, например, определить, применить набивной или тканый материал. Под набивным фильтром понимают хаотичную систему волокон, скрепленную прошиванием; тканый материал – это симметричная система переплетенных нитей, т. е. скрученных пряжей волокон. Выбор фильтрующего материала в большой мере зависит от характера устройства, в которое помещают фильтрующий элемент, и доступного метода очистки. Эти взаимосвязи более подробно изложены в разделе о методах очистки.

### ***Методы очистки фильтров***

Существует три основных метода очистки, старейшим из которых является встряхивание фильтрующей среды для удаления пыли. Два других метода основаны на выдувании фильтра или обратным потоком низкого давления, или импульсом сжатого воздуха. Кроме того, используют и ряд других методов, которые по техническим или экономическим причинам до сих пор не получили широкого распространения. Иногда прибегают к комбинации двух методов, например к сочетанию обратного потока со встряхиванием, в тех случаях, когда удаление осадка затруднено.

### ***Очистка встряхиванием***

Очистка встряхиванием, естественно, заключается в удалении пыли под действием быстрых движений, передаваемых фильтрующей среде, при встряхивании конструкции, удерживающей фильтрующий материал. Чтобы обеспечить эффективную очистку, можно варьировать основные параметры процесса, которыми являются частота и амплитуда встряхивания, а также натяжение фильтрующего материала.

Продолжительность и интенсивность встряхивания не должны превышать необходимых для удаления пыли, поскольку этот процесс укорачивает срок службы материала.

Как видно из рис. 1.28, встряхивание обычно производят при фильтре, открытом снизу и закрытом сверху. Запыленный поток

подается снизу, и при его прохождении через фильтрующую среду пыль осаждается на внутренней поверхности, в то время как очищенный газ поступает через коллектор к вентилятору и на выброс. Во время фильтрации поток газа поддерживает рукава фильтра в раздутом виде. При очистке поток газа прекращается, рукава обмякают, а их форма определяется силой внешнего натяжения. Чтобы не препятствовать процессу встряхивания, избегают использовать распорки в виде клеток или колец.

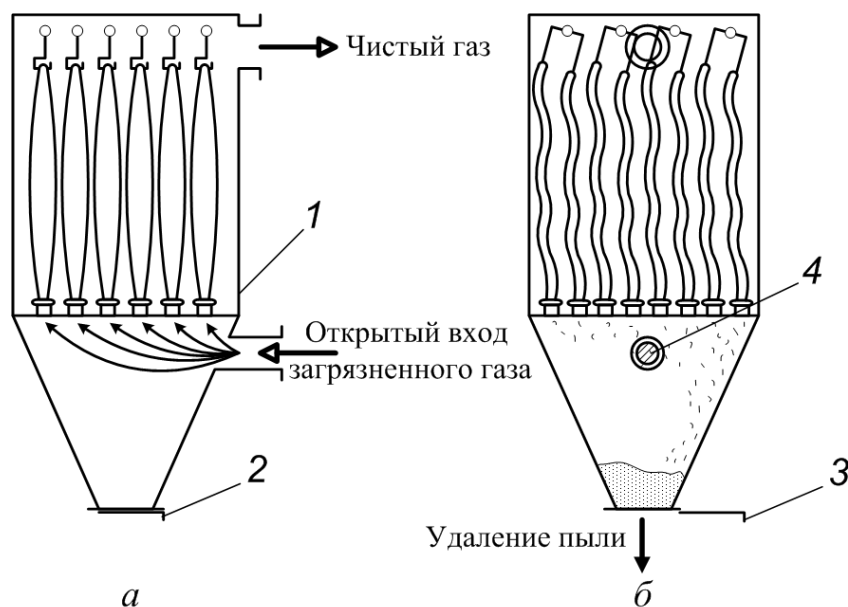


Рис. 1.28. Фильтр с очисткой встряхиванием:

*а* - пылеулавливание, *б* - очистка рукавов: 1 - пластина с трубчатыми насадками, 2 - закрытая заслонка; 3 - заслонка, открытая для удаления пыли, 4 - закрытый вход грязного газа

В США для очистки тканых материалов используют исключительно встряхивание. При очистке встряхиванием тканых материалов отношение количества газа к количеству материала относительно мало, не более 0,02 м/с. В Европе встряхивание используют для очистки войлочных фильтров при несколько большем значении этого отношения.

Встряхивание часто используют, когда уровень запыленности потока и характер технологического цикла позволяют держать коллектор под потоком в течение нескольких часов. Это может составлять полный цикл улавливания между операциями очистки. Если встряхивание необходимо использовать в непрерывном технологическом процессе, то конструкция фильтра должна предусматривать разделение его внутреннего пространства на изолируемые отсеки. Это даст возможность изымать отдельные отсеки

из процесса фильтрации для очистки. В этом случае конструкция должна допускать регулирование линейной скорости фильтрации.

Большинство устройств для встряхивания снабжены эксцентрическим приводом от электродвигателя, однако в случае малых фильтров, требующих редкой промежуточной очистки, используют ручное встряхивание. Применяют также встряхивание рукавов под действием воздушного потока при высокочастотном перемешивании с помощью акустических или ультразвуковых средств. Следует отметить, однако, что использование электродвигателя с эксцентриком остается до сих пор наиболее экономичным методом.

### **Очистка обратным потоком**

Этот способ заключается в остановке газового потока и последующем изменении его направления на обратное, при этом фильтрующие рукава натягиваются в противоположном направлении. Обычно варьируемыми параметрами процесса являются частота и длительность, однако до некоторой степени можно изменять давление газа и скорость потока.

Как видно из рис. 1.29, очистку обратным потоком применяют тогда, когда рукава открыты снизу и закрыты сверху. В отличие от систем, очищаемых встряхиванием, в данном случае рукава имеют

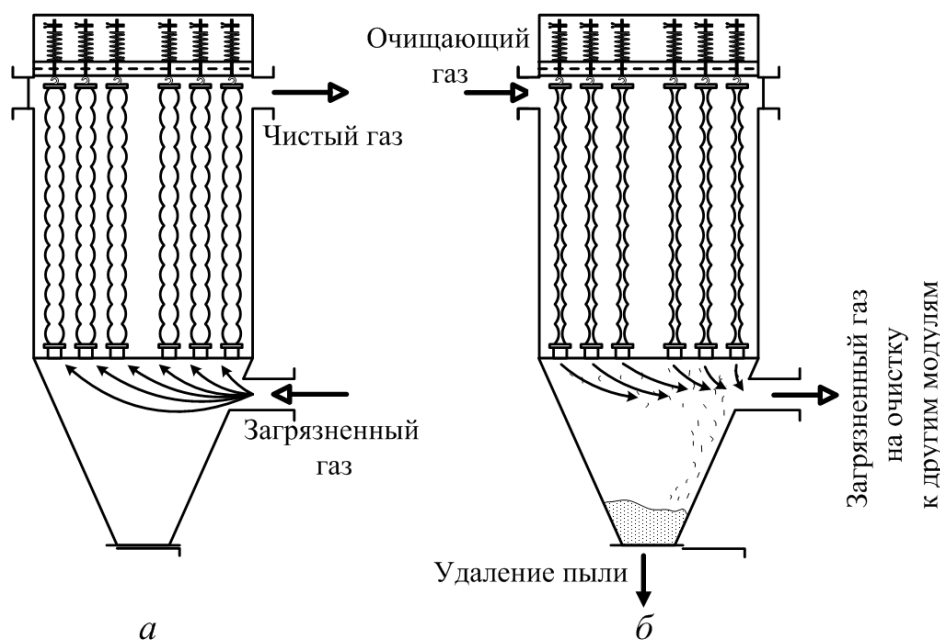


Рис. 1.29. Фазы работы фильтра с очисткой обратным потоком

металлические колпаки, закрепляемые сверху на устройствах для регулирования натяжения. Как и в случае встряхивающих систем, газ входит в рукава снизу через пластину, в отверстиях которой расположены наконечники для присоединения рукавов, и через

фильтрующую среду поступает на чистую половину. Газ выходит с наружной поверхности рукавов, а пыль собирается на внутренней. Во время очистки нормальный ток газа прекращен, а обратный включен. При этом рукава схлопываются, но полное схлопывание невозможно, так как имеются внутренние кольца-распорки. Удаляемая пыль ссыпается по внутренней полости рукавов на откидное дно.

Обратным потоком обычно очищают тканевые фильтры. Перепад давления порядка килопаскалей достаточен для схлопывания валяных рукавов. Как и при очистке встряхиванием, типичны значения линейной скорости фильтрации, составляющие около 0,02 м/с.

В непрерывных процессах используют очищаемые противотоком системы большой емкости, построенные по модульной схеме (рис. 1.30). Правильная организация системы трубопроводов и вентилялей

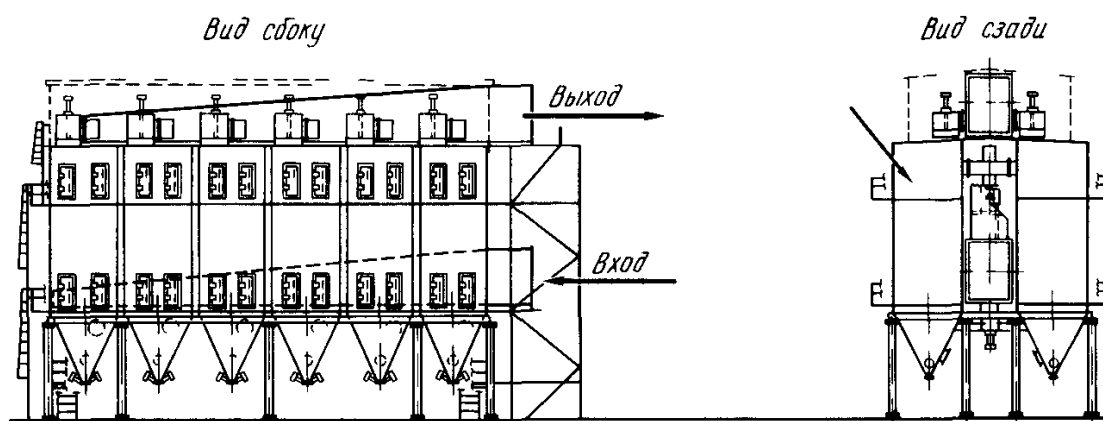


Рис.1.30. Фильтры с очисткой обратным потоком – модульная конструкция

обеспечивает возможность увеличения линейной скорости фильтрации в процессе очистки. Схема применяется для очистки газа, причем часть очищенного потока используется для очистки отключенной секции. Поток, запыленный в процессе очистки, рециркулируется через включенные секции перед выбросом в атмосферу.

В большинстве систем с оборотным потоком используется специальный вентилятор для его реверсирования, однако возможна схема с применением одного и того же вентилятора для прямого и обратного потоков.

### **Очистка пульсирующим потоком**

Импульсная очистка также предусматривает обратное схлопывание фильтрующего материала. При использовании этого метода достигается тщательная очистка, поскольку для схлопывания применяется воздух высокого давления (обычно 0,4...0,6 МПа). Короткий импульс сжатого воздуха создает ударную волну, которая бежит вниз по рукаву, удаляя пыль с валяной ткани. При использовании

этого метода можно удалить слишком много пыли, что приведет к повышению допустимого уровня выбросов. Чтобы избежать этого,

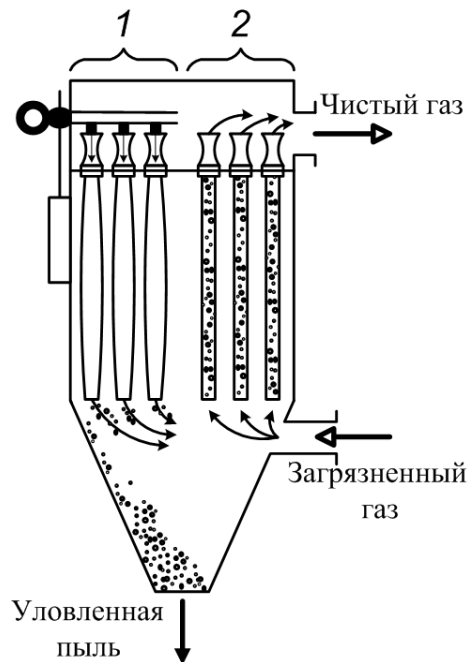


Рис.1.31. Фильтр с очисткой пульсирующим потоком:  
1 - очистка, 2 - пылеулавливание

уменьшают давление в импульсе или длительность импульса. Варьируемыми параметрами процесса являются давление в импульсе, частота и последовательность очисток, а также до некоторой степени длительность процесса.

Импульсная очистка применяется для рукавов, открытых сверху и закрытых снизу (рис. 1.31). Иногда, как показано на рис. 1.32, используют скруббер Вентури, чтобы получить порцию воздуха для обратной продувки сразу же после импульса сжатого воздуха.



Рис.1.32. Рукав в сочетании со скруббером Вентури

Оказывается, что пыль удаляется в основном при изгибе ткани в начальный момент. В отличие от систем со встряхиванием и обратным потоком в данном случае пыль осаждается на внешней поверхности рукавов, а очищаемый газ движется внутрь и вверх и выходит в верхней части рукава через пластину с трубчатыми насадками в рабочую зону Вентури. Необходимо помещать распорки в виде клеток внутрь рукавов, чтобы предупредить их схлопывание. Этот метод позволяет очищать рукава импульсами сжатого воздуха тогда, когда фильтр остается включенным на очищаемый поток. Это объясняется тем, что импульс мгновенно останавливает поток в нормальном направлении. Поэтому системы с импульсной очисткой не требуют обычного разделения на отсеки и один ряд рукавов или несколько их рядов могут очищаться, в то время как соседние рукава продолжают собирать пыль. В сложных случаях прибегают к разделению на отсеки, чтобы предотвратить повторный унос.

Импульсы обычно используют для очистки валяных фильтров, причем допустимы значения линейной скорости фильтрации, равные 0,0305 м/с, поскольку при больших значениях легче удалять частицы.

Хотя этот метод очистки наиболее новый из описанных здесь, его используют уже более 30 лет. Широко применяют его в установках малой и средней производительности ( $< 47 \text{ м}^3/\text{с}$ ), недавно он был использован и в установках очень большой производительности.

### **Выбор фильтрующего материала**

Исторически первыми материалами для тканевых фильтров были натуральные волокна – шерсть и хлопок. Внедрение синтетических волокон в 1940 г. увеличило диапазон применения тканевых фильтров по температуре и в отношении химически агрессивных аэрозолей. Расширение возможностей тканевых фильтров путем использования различных новых волокон продолжается и в наше время.

Выбор фильтрующего материала возможен, если известны рабочая температура и условия использования. Это вполне справедливо, поскольку информация об условиях применения включает и сведения о том, какие материалы ранее уже успешно применялись для этой цели. Крайне желательно иметь детальную информацию о составе газа, поскольку химическая природа материала, который предполагается использовать, определяется прежде всего температурой, а также кислотностью или щелочностью газа. В табл. 1.6. приведен перечень фильтрующих материалов с указанием ограничений по температуре и химическому составу.

Существующие фильтрующие материалы выбирают в зависимости от конкретных условий очистки. Например,

хлопчатобумажные ткани обладают хорошими фильтрующими свойствами и имеют низкую стоимость, но обладают недостаточной химической и термической стойкостью, высокой горючестью и влагоемкостью. Шерстяные ткани характеризуются большой воздухопроницаемостью, обеспечивают надежную очистку и регенерацию, но стойкость к кислым газам, особенно к  $\text{SO}_2$  и туману серной кислоты, низкая. Стоимость их выше, чем хлопчатобумажных. При длительном воздействии высокой температуры волокна становятся хрупкими. Работают при температуре газов до 90 °С.

Таблица 1.6.

Сравнение фильтрующих материалов

| Материал    | Относительная цена | Температура, К |
|-------------|--------------------|----------------|
| Полиэфир    | 6                  | 392            |
| Номекс      | 14                 | 463            |
| Фторопласт  | 45                 | 490            |
| Стеклоткань | 25                 | 519            |
| Хайглас     | 30                 | 519            |

*Примечание:* скорость фильтрации для всех материалов предполагалась равной 0,0254 м/с за исключением стеклоткани, для которой принято значение 0,01016 м/с.

Синтетические ткани вытесняют материалы из хлопка и шерсти благодаря более высокой прочности, стойкости к повышенным температурам и агрессивным воздействиям, более низкой стоимости.

Лавсановые ткани используются для очистки горячих сухих газов в цементной, металлургической и химической промышленности. В кислых средах стойкость их высокая, в щелочных — резко снижается. Стекланные ткани стойки при 150...350 °С. Их изготавливают из алюмоборосиликатного бесщелочного или магнезиального стекла.

Рабочие температуры коммерчески доступных фильтрующих материалов ограничиваются примерно 550 К, однако ряд фирм разрабатывает высокотемпературные материалы. В настоящее время верхний температурный предел промышленного применения стекловолокнистых фильтров составляет около 550 К, а фторопластовых — около 520 К. Фторопласт более устойчив к химическим воздействиям, но и более дорог. До недавнего времени стекло было доступно только в тканевой форме. Разработка валяных стекловолокнистых фильтров дала промышленности материал с большим ресурсом использования (рис. 1.33). Фторопласт применяют как в тканом, так и в валяном виде.



Другая новая высокотемпературная разработка – нанесение микропористой политрифторэфирной пленки на тканевые и валяные материалы. С этих материалов хорошо удаляется слой накопленной пыли. Для увеличения срока службы рукавов чаще всего применяют валяные подкладки.

Если температура газового потока превышает 550 К, а тканевый фильтр оказывается предпочтительным средством улавливания, необходимо предварительное охлаждение потока. Способ охлаждения –

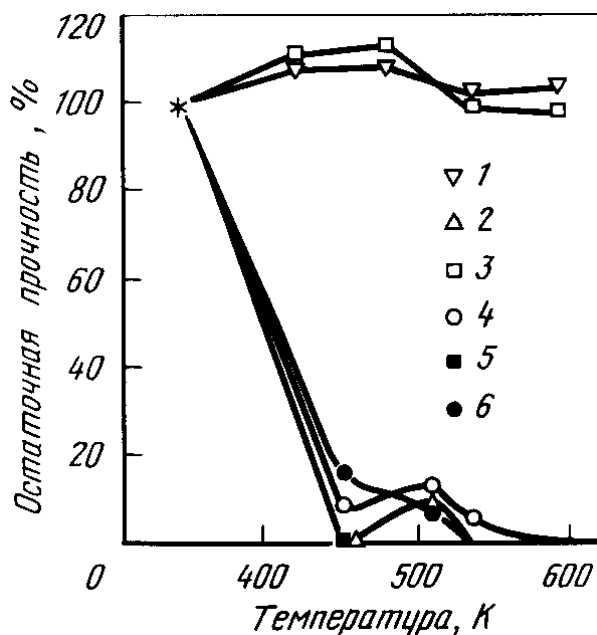


Рис.1.33. Сохранение прочности материала (в %) при повторных воздействиях серной кислоты при повышенной температуре по отношению к прочности при температуре окружающей среды (с разрешения фирмы «Nuysck Felt»):  
 1 - фильтрующий материал HUYGLAS, 2 - войлок Nomex фирмы Дюпон,  
 3 - фторопластовый войлок фирмы Дюпон, 4 - стеклоткань с фторопластовым покрытием фирмы Дюпон, 5 - полиэфирный войлок, 6 - стеклоткань с силиконово-графитным покрытием

радиационное охлаждение, теплообменник, разбавление воздухом, спрейное охлаждение – следует выбирать на основе экономических оценок. Спрейное охлаждение представляет потенциальную опасность, поскольку оно связано с возможностью увлажнения рукавов и конденсации кислоты на элементах конструкции или в рукавах.

Физическую природу и (или) конструкцию фильтрующего элемента выбирают во взаимосвязи с методом очистки.

Обычно тканевые материалы используют в сочетании с очисткой встряхиванием или обратным потоком. В то же время валяные рукава используют с системой импульсной очистки. Последний выбор неизбежен, поскольку тканевые материалы менее стойки по отношению к

повторяющимся высокоэнергетическим импульсам, а структура каналов в них допускает избыточное проникновение частиц после импульсной очистки (рис. 1.34).

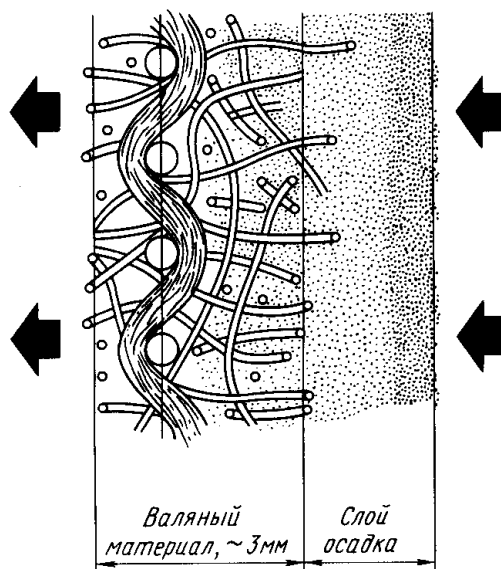


Рис. 1.34. Распределение пыли в валяном фильтрующем материале

### **Выбор конструкции системы пылеулавливания**

Выбор или конструирование фильтра, а также его эксплуатация должны осуществляться на основе полного анализа процесса образования пыли. Характеристики источника пылевых выбросов влияют не только на выбор конструкции фильтра, но и на всю структуру системы. Система может быть очень простой и содержать, например, один раструб для забора пыли, небольшой трубопровод между раструбом и фильтром, вентилятор и трубу для выброса. Система может быть очень сложной, например работающая на угле котельная, и включать байпасные линии, дополнительные теплообменники, многочисленные заслонки, изоляцию, аварийную сигнализацию по температуре, давлению, параметрам процесса системы автоматического отключения и включения байпаса, дополнительные модули для обеспечения возможности очистки с выключением фильтра из линии. Очевидно, что уже на стадии формулировки проблемы улавливания необходимо анализировать параметры технологического процесса, продукты которого необходимо улавливать. При уточнении таких параметров, как температура, концентрация пыли, объем газа, следует определять не только средние значения, но весь рабочий диапазон, а также возможные аварийные условия. На этой стадии необходимо рассматривать:

1. *Объективные показатели системы:* эффективность, рабочий и максимальный перепады давления, максимальный и перспективный объемы производства, текущий и ожидаемый в будущем состав отходящих продуктов.

2. *Ограничения:* на расположение по высоте; связанные с необходимостью иметь свободные проходы; по габаритам; по величине противодействия.

3. *Рабочий режим системы:* непрерывный или периодический (если непрерывный, то это предполагает очистку без отключения, поэтому желателен модульный принцип конструкции).

При пуске системы требуется определять, соответствует ли формулировка проблемы, использованная на стадии конструирования, реальным условиям работы. После этого всё оборудование системы должно быть проверено с точки зрения удовлетворительной работы и правильного расположения. Следует избегать запуска системы в условиях, выходящих за пределы нормального диапазона рабочих параметров. Например, слишком большая скорость может вызвать забивание или колебания температуры, ведущие к достижению точки росы. Существенно также решить, как вводить в действие систему – с включенным или выключенным фильтром.

Когда система уже работает и ожидается изменение технологического процесса или условий работы источника пыли, следует заново оценить возможности фильтрующей системы и фильтрующего материала. Ключевыми параметрами для такой переоценки являются:

1. *Объем газа.* При слишком высокой скорости фильтрации возможно забивание рукавов, а при слишком малой – осаждение пыли в трубопроводах.

2. *Температура.* При слишком высокой температуре могут разрушиться рукава и (или) прокладка, при слишком низкой может достигаться точка росы.

3. *Концентрация пыли.* При слишком высокой концентрации может быть превышена возможность аппарата по удалению пыли из корпуса фильтра, при слишком низкой – может образоваться большое количество пыли в выбросах в течение части цикла, следующей за очисткой рукавов.

4. *Размер частиц.* При слишком малых частицах возможно забивание рукавов или превышение допустимого уровня концентрации пыли в выбросах.

Если ранее надежно работавший фильтр начинает требовать повышенных затрат на обслуживание или становится неработоспособным, то прежде всего следует оценить процесс, в

результате которого образуется пыль, чтобы выявить изменения параметров процесса, которые могут повлиять на работу фильтра. Если таким образом не удастся выявить причину неполадок, то необходимо выполнить систематическое обследование фильтра и выяснить соответствие условий работы фильтра его назначению. Технологический процесс и работа фильтра взаимосвязаны, неполадки в работе фильтра могут вызвать снижение уровня производства продукции, а изменения параметров процесса – нарушения в работе фильтра.

### **1.3.6. Улавливание аэрозолей электрофильтрами**

Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае осаждающая сила действует непосредственно на частицы, а не создается косвенно воздействием на поток газа в целом. Это прямое и чрезвычайно эффективное использование силового воздействия и объясняет такие характерные черты электростатического метода, как умеренное потребление энергии и малое сопротивление потоку газа. Даже мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила. Принципиальных ограничений степени очистки нет, поскольку эффективность может быть повышена путем увеличения продолжительности пребывания частиц в электрофильтре.

Энергия, потребляемая в электрофильтре, складывается из энергии, расходуемой генератором тока высокого напряжения, и энергии, необходимой для преодоления гидравлического сопротивления при прохождении газа через электрофильтр. Гидравлическое сопротивление электрофильтра при его правильной эксплуатации не превышает 100...150 Па, т. е. значительно ниже, чем у большинства других пылеуловителей. Энергия, подводимая к обрабатываемым газам при электроосаждении, расходуется преимущественно на оказание непосредственного воздействия на осаждаемые частицы.

Этим обусловлены многие преимущества процесса электрофильтрации. Электрофильтр относится к наиболее эффективным пылеулавливающим аппаратам. Эффективность очистки достигает 99,9 % в широких пределах концентраций (от нескольких мг до 200 г/м<sup>3</sup>) и дисперсности частиц (до долей мкм) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,1...0,5 кВт·ч на 1000 м<sup>3</sup> газов). Электрофильтр может обеспыливать влажную и коррозионноактивную газовую среду с температурой до 500 °С. Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч м<sup>3</sup>/ч очищаемого газа.

К недостаткам электрофильтров относится их высокая чувствительность к поддержанию параметров очистки, высокая металлоемкость и большие габариты, а также высокая требовательность к уровню монтажа и обслуживания.

Практическое развитие электростатического осаждения как эффективного метода улавливания выбросов дисперсных загрязнений на металлургических и цементных заводах, а также в других отраслях тяжелой промышленности берет свое начало с работ Ф. Коттреля в начале нашего века. Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае осаждающая сила действует непосредственно на частицы, а не создается косвенно воздействием на поток газа в целом. Это прямое и чрезвычайно эффективное использование силового воздействия и объясняет такие характерные черты электростатического метода, как умеренное потребление энергии и малое сопротивление потоку газа. Даже мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила. Принципиальных ограничений степени очистки нет, поскольку эффективность может быть повышена путем увеличения продолжительности пребывания частиц в электрофильтре.

Принцип действия электрофильтра заключается в том, что пылевидным частицам сообщается заряд, после чего они осаждаются на противоположно заряженном (осадительном) электроде, откуда пыль периодически удаляют.

В современных условиях электрофильтры обычно обеспечивают эффективность, составляющую 99,5 % и более, многие из них работают с эффективностью, превышающей 99,9 %. Сочетание высокой эффективности, умеренного расхода энергии, способности очищать большие потоки газа при высоких температурах и работать в агрессивной среде объясняют широкое использование и разнообразие областей применения электрофильтров.

Использование процесса электростатического осаждения на практике требует знания многих научных дисциплин и технологий – физики, химии, механической, электротехнической, химической, бытовой и аэрозольной технологии, а также электроники. Кроме того, важно знать технологические процессы и предприятия, для которых предназначены электрофильтры. Без этого невозможно обеспечить технически и экономически оправданные решения.

Со времени создания процесса электростатического осаждения в начале века в него было внесено много фундаментальных и практических усовершенствований, однако до сих пор сохраняется

широкое поле для дальнейших разработок применительно к улавливанию частиц с высоким электрическим сопротивлением. Это может привести к уменьшению размеров установок и снижению их стоимости, а также к снижению расхода энергии и т. п. В настоящее время исследования по усовершенствованию процесса фильтрации и конструкций электрофильтров в целях расширения сферы применения и обеспечения более высоких рабочих характеристик ведутся в международном масштабе.

### **Принцип действия**

Электрофильтр – это аппарат (или установка), в котором используются электрические силы для отделения взвешенных частиц от газов. На практике применяют электрофильтры многих типов и конфигураций. Наиболее распространены в промышленности установки круглого и прямоугольного сечений. При очистке воздуха, а также в отраслях легкой промышленности используют главным образом двухступенчатые системы. Независимо от типа все электрофильтры основаны на одних и тех же основных принципах: процесс имеет три основные стадии – зарядку взвешенных частиц, осаждение заряженных частиц в электрическом поле и удаление осажденного материала во внешний приемник.

Натурные эксперименты показали, что в большинстве случаев в промышленных условиях частицы заряжаются уже в процессе образования вследствие ионизации в пламени, трения, измельчения, однако степень зарядки обычно умеренна. Эти естественные заряды слишком малы для эффективного осаждения.

Наиболее эффективным средством зарядки, используемым при электростатическом осаждении, является коронный разряд постоянного тока. Корона формируется между активным высоковольтным электродом типа тонкой проволоки и заземленным пассивным электродом, имеющим форму трубы или пластины. Зарядка происходит в газовом пространстве между электродами, содержащем ионы в высокой концентрации, обычно отрицательные.

Переносимые газовым потоком пылевые частицы приобретают заряд в результате бомбардировки газовыми ионами за сотые доли секунды или менее того. Уровень зарядки зависит от размера частиц, однако в типичных случаях имеется примерно 300 элементарных зарядов на частице размером 1 мкм или 30000 при размере ее 10 мкм.

Осаждение частиц обусловлено или последующим воздействием на них поля короны, или прохождением их в чисто электростатическом поле между гладкими некоронирующими электродами. Электрофильтры первого типа известны под названием

одноступенчатых, или осадителей Коттреля, вторые называются двухступенчатыми, поскольку в них зарядка и осаждение протекают в различных ступенях. Схемы устройств этих двух типов представлены на рис. 1.35. Общая идея метода использования коронного разряда для

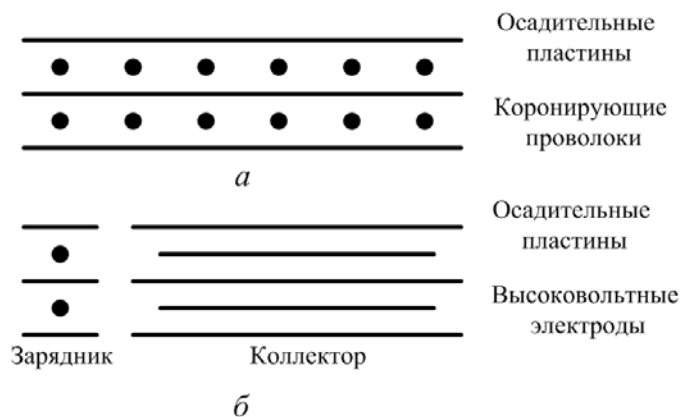


Рис.1.35. Схема одноступенчатого (а) и двухступенчатого (б) электрофильтров:  
1 - осадительные пластины, 2 - коронирующие проволоки, 3 – зарядник,  
4 - высоковольтные электроды, 5 - осадитель

осаждения частиц в одноступенчатом осадителе показана рис. 1.36.

Частицы сильно заряжаются на первых 100...200 мм пути и смещаются к заземленным осадительным электродам под воздействием интенсивного поля короны. Процесс в целом протекает очень быстро, на полное осаждение частиц требуется всего несколько секунд.

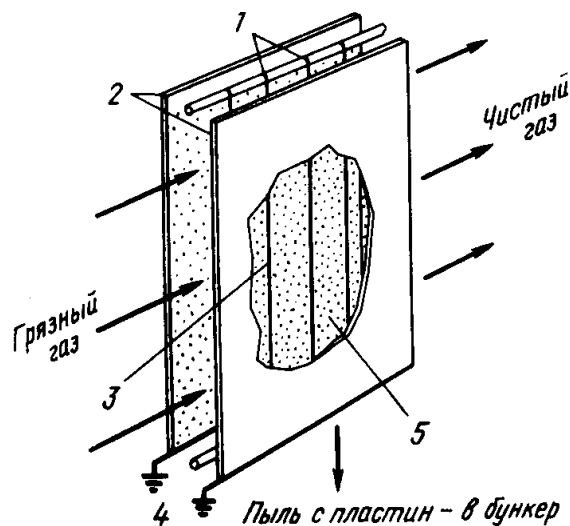


Рис.1.36. Схема одноступенчатого электрофильтра:  
1 - высоковольтные проволоки для коронного разряда, 2 - осадительные пластины,  
3 - коронный разряд вдоль проволоки, 4 – заземление, 5 - пыль, собранная на  
пластиках

Слой осажденных частиц на заземленных электродах удаляется встряхиванием и падает в бункер, откуда частицы направляют на

хранение. Если частицы жидкие, например, при улавливании серной кислоты или дегтя, то они сливаются и стекают по каплям в сборные резервуары под электродами.

### Области применения

Применение электрофильтров началось на металлургических и цементных заводах. На первых порах расширение области применения этих аппаратов происходило путем внедрения их в других отраслях промышленности, а позже было связано с появлением новых видов технологии. Еще одним фактором, способствовавшим распространению электрофильтров, явилось ужесточение законодательства в области контроля за загрязнением воздушного бассейна, что потребовало более высокого качества улавливания.

Примерами передовых технологий, появление которых вызвало необходимость использования электрофильтров, могут служить сжигание пылевидного угля на тепловых электростанциях, катализ в псевдооживленном слое с целью получения бензина при нефтепереработке, внедрение кислородного дутья в сталеплавильной промышленности. Важную роль сыграла также необходимость улавливания ценных продуктов, в частности, улавливание щелочной пыли в крафт-бумажном производстве.

Области применения электрофильтров приведены в табл. 1.7. В США 75 % объема газовых потоков, пропускаемых через электрофильтры, составляют отходящие золосодержащие газы тепловых электростанций. Вклад металлургической, цементной и бумажной отраслей промышленности лежит в пределах 5...10 % для каждой отрасли, хотя применение электрофильтров в этих отраслях имеет большое значение и непрерывно растет.

Таблица 1.7

Применение электрофильтров в основных отраслях промышленности США

| Отрасль<br>1                                  | Применение<br>2   |
|---|---|
| Электростанции и промышленные котельные       | Улавливание летучей золы из топок, в которых используется угольная пыль   |
| Плавка цветных металлов: меди, свинца и цинка | Улавливание частиц при плавках; очистка газов при производстве серной кислоты                                       |
| Производство первичного алюминия              | Очистка газов, поступающих в электролизную ванну, и выбросов анодной печи   |
| Производство железа и стали                   | Печи с открытым горном; печи с кислородным дутьем; фабрики спекания; кирковочные машины; вагранки для серого чугуна |



| 1                           | 2  |
|-----------------------------|--|
| Производство цемента        | Вращающиеся печи для обжига; охлаждение клинкера                               |
| Производство гипса          | Гипсовые чаны  |
| Бумажные фабрики            | Печи регенерации щелока; обжиг известкового шлама                              |
| Химическая промышленность   | Серная кислота; горячий фосфор; фосфорная кислота; многие другие производства  |
| Городские мусоросжигатели   | Очистка отходящих газов  |
| Нефтепереработка            | Улавливание оживленного катализатора при производстве высокооктанового бензина |
| Синтетический и спутный газ | Очистка газа от дегтя  |
| Лес и древесина             | Очистка газогенераторного газа, получаемого из коры и щепы                     |
| Производство стекла         | Очистка выбросов из стекловаренных печей                                       |

Сведения об объеме сбыта электрофильтров опубликованы в различных источниках, но об общей тенденции можно судить по рис. 1.37. Следует отметить, что эти данные характеризуют стоимость

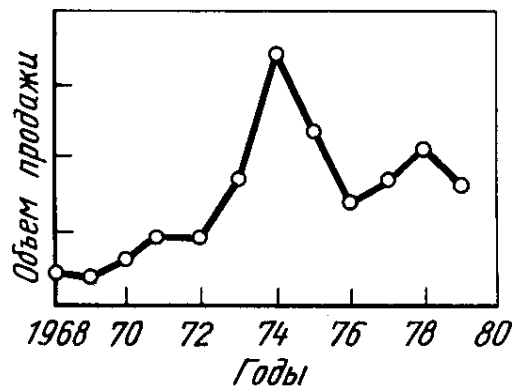


Рис. 1.37. Характеристика продажи электрофильтров в США.

собственно электрофильтра. С учетом стоимости фундамента, установки, трубопроводов, систем удаления осажденной пыли стоимость возрастает в несколько раз.

Скорость расширения рынка сбыта электрофильтров в США весьма значительна, поскольку одновременно возросли требования и к объему очищаемых газовых потоков, и к эффективности очистки. На рис. 1.38 отражена тенденция изменения требований к степени улавливания летучей золы. Средняя эффективность возросла с 94 % в 1950 г. до 99 % в 1970 г. и 99,8 % в 1980 г. Максимальная эффективность улавливания летучей золы, которая требовалась в 1980 г., превысила 99,95 %. Поскольку для обеспечения более высокой эффективности требуется существенное увеличение размеров

осадителей, влияние требований, касающихся эффективности, на объем сбыта очень велико.

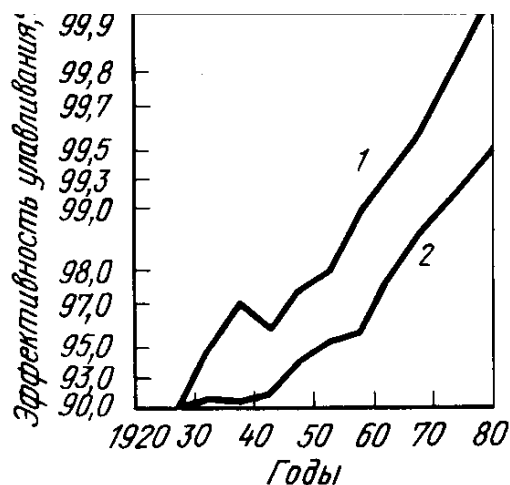


Рис.1.38. Тенденция к повышению эффективности улавливания летучей золы в США:

1 – требования к электрофильтрам; 2 – общие требования

Ожидается дальнейшее существенное расширение использования электрофильтров, так как они обладают многими достоинствами и могут применяться как в отделах промышленности, ставших традиционными для их использования, так и в новых – таких, как получение газа из сланцевого дегтя и угля. Возможность обеспечивать путем электростатического осаждения очень высокую эффективность улавливания при умеренном потреблении энергии особо важно, если учесть повышение цен на энергию. Несмотря на то, что на применение электрофильтров влияет развитие других методов газоочистки, большая гибкость электроосаждения, большой опыт использования электрофильтров в сложных и разнообразных условиях в тяжелой промышленности, а также дальнейшее совершенствование электрофильтров позволяют считать их весьма перспективными.

### Очистка газов в электрофильтрах

В электрофильтрах очистка газов от пыли происходит под действием электрических сил. В процессе ионизации молекул газов электрическим разрядом происходит заряд содержащихся в них частиц (коронирующий электрод). Ионы абсорбируются на поверхности пылинок, а затем под действием электрического поля они перемещаются и осаждаются к осадительным электродам. Зарядка частиц в поле коронного разряда происходит по двум механизмам: воздействием электрического поля (частицы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и диффузией ионов. Первый механизм преобладает при размерах частиц более 0,5 мкм,

второй – менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2...0,5 мкм эффективны оба механизма. Максимальная величина заряда частиц размером более 0,5 мкм пропорциональна квадрату диаметра частиц, а частиц размером меньше 0,2 мкм – диаметру частицы.

При некотором достаточно большом напряжении движущиеся ионы и электроны ускоряются настолько, что, сталкиваясь с молекулами очищаемого газа, ионизируют их, превращая нейтральные молекулы в положительные ионы и электроны. Образовавшиеся ионы и электроны ускоряются электрическим полем и в свою очередь ионизируют новые молекулы газа.

Этот процесс называют ударной ионизацией газа. Такая ионизация протекает устойчиво лишь в неоднородном поле, создаваемом например сферическим конденсатором (рис. 1.39). В зазоре между коронирующим 1 и осадительным 2 электродами создается электрическое поле убывающей напряженности с силовыми линиями, направленными от коронирующего к осадительному электроду или наоборот. Напряжение к электродам подается от выпрямителя 3.

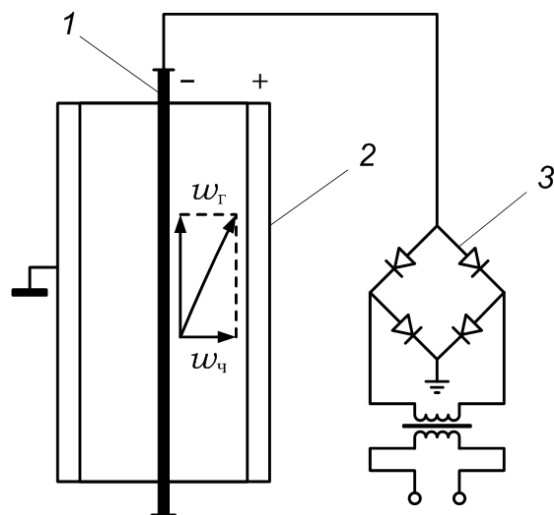


Рис. 1.39. Схема расположения электродов в электрофильтре:  
1 – коронирующий электрод; 2 – осадительный электрод; 3 – выпрямитель

Величину заряда  $q$  (кА), приобретаемого проводимой частицей сферической формы под воздействием электрического поля, рассчитывают по формуле

$$q = 3 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E,$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $E$  – напряженность электрического поля коронного разряда, В/м.

Величину заряда, приобретаемого непроводящей частицей, определяют по формуле

$$q = \frac{3 \cdot \varepsilon}{\varepsilon + 2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E,$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

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.

Для тонкой очистки газов рекомендуется применять унифицированные горизонтальные малогабаритные (УМГ) сухие электрофильтры. Для обеспечения равномерности поступления газа в электрофильтр на его входе устанавливается распределительная решетка. Удаление осевшей на осадительных электродах пыли осуществляется периодическим встряхиванием молотковыми или какими-либо другими устройствами. При этом пыль ссыпается в бункер, расположенный под электродами. Электрофильтры, оснащенные встряхивающими устройствами, особенно широкое распространение нашли в системах золоулавливания.

Повышение эффективности очистки запыленных газов достигается лишь в том случае, когда осевшая на электродах пыль при их встряхивании будет падать в бункер в виде относительно крупных конгломератов, состоящих из множества слипшихся под действием сил адгезии частиц. Если же при встряхивании слой осевшей пыли будет диспергироваться на очень мелкие конгломераты или на индивидуальные частицы, очистка газов будет малоэффективной вследствие уноса газовым потоком из электрофильтра сброшенной с электродов пыли. Для того чтобы на осадительном электроде образовался слой пыли, который при встряхивании распадается на крупные конгломераты, необходимо, чтобы встряхивающие импульсы следовали друг за другом через некоторые промежутки времени, которые зависят от запыленности газов, эффективности улавливания пыли и суммарной площади осадительных электродов, расположенных над бункером.

Конструктивно 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 форме коронирующих электродов – с игольчатыми, круглого или штыкового сечения; 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.

Наиболее распространены электрофилтры с пластинчатыми и трубчатыми электродами. В пластинчатых электрофилтрах между осадительными пластинчатыми электродами натянуты проволочные коронирующие. В трубчатых электрофилтрах осадительные электроды представляют собой цилиндры (трубки), внутри которых по оси расположены коронирующие электроды.

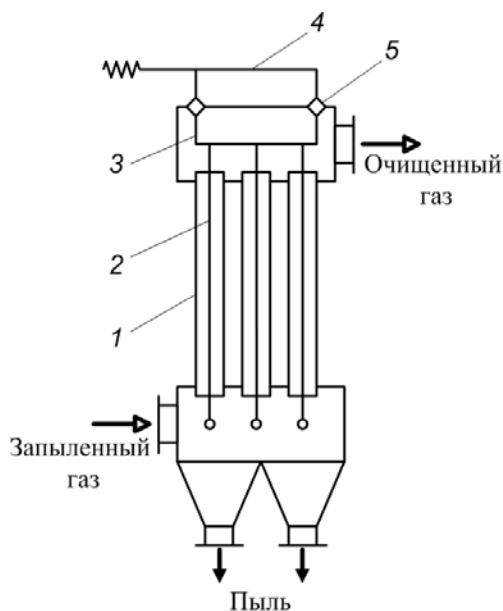


Рис. 1.40. Трубчатый электрофилтр:  
 1 - осадительный электрод, 2 - коронирующий электрод, 3 - рама,  
 4 - встряхивающее устройство, 5 - изолятор

Схема трубчатого электрофилтра представлена на рис. 1.40. Запыленный газ движется по вертикальным трубам диаметром 200...250 мм. Пыль оседает на внутренней поверхности труб. При помощи встряхивающего устройства ее удаляют в бункер.

Электрофилтры очищают большие объемы газов от пыли с частицами размером от 0,01 до 100 мкм при температуре газов до 400...450 °С. Гидравлическое сопротивление их достигает 150 Па. Затраты электроэнергии составляют 0,36...1,8 МДж на 1000 м<sup>3</sup> газа.

Эффективность работы электрофилтров 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.

Напряженность поля на расстоянии  $x$  метров от оси коронирующего электрода определяется по зависимости

$$E_x = \frac{U}{\ln \frac{r_1}{r_2}},$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к электродам, В;  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы коронирующего и осадительного электродов, м.

Критическое напряженность электрического поля, при котором возникает корона, для воздуха определяется по формуле (в В/м):

– для коронирующего электрода положительной полярности

$$E_{\text{кр}} = 3,37 \cdot \left( \beta + 0,0242 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{r_1}} \right) \cdot 10^6,$$

– для коронирующего электрода отрицательной полярности

$$E_{\text{кр}} = 3,04 \cdot \left( \beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{r_1}} \right) \cdot 10^6.$$

Здесь  $\beta$  – поправка на плотность газа в рабочих условиях:

$$\beta = \frac{293,15 \cdot (P_{\text{бар}} + P)}{101,325 \cdot 10^5 \cdot (273,15 + t)},$$

где  $P_{\text{бар}}$  – барометрическое давление, Па;  $P$  – разряжение или избыточное давление в аппарате, Па;  $t$  – температура газов, °С.

Пыль с малой электрической проводимостью вызывает явление обратной короны, которое сопровождается образованием положительно заряженных ионов, частично нейтрализующих отрицательный заряд пылинок, вследствие чего последние теряют способность перемещаться к осадительным электродам и осаждаются. На проводимость пыли оказывает влияние состав газа и пыли. С повышением влажности газов удельное электрическое сопротивление пыли снижается. Наличие в очищенных газах десятых и сотых долей процента  $\text{SO}_2$  и  $\text{NH}_3$  значительно улучшает электрическую проводимость пыли.

При высоких температурах газа понижается электрическая прочность межэлектродного пространства, что приводит к ухудшению улавливания пыли. С повышением температуры газов возрастает их вязкость и объем, а следовательно, увеличивается скорость потока в электрофильтре, что снижает степень обеспыливания. С увеличением скорости газа возрастает так называемый вторичный унос.

Для нормальной работы электрофильтров необходимо обеспечить чистоту осадительных и коронирующих электродов. Отложения загрязнений на коронирующем электроде способствуют повышению начального напряжения коронирования, но это не всегда возможно. Если пыль имеет большое электрическое сопротивление, то слой на электроде действует как изолятор и коронный разряд прекращается.

Теоретическая степень очистки газов в электрофильтре:

– для трубчатого электрофильтра

$$\eta = 100 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot w_{\text{ч}} \cdot L}{w_{\Gamma} \cdot r}} \right),$$

– для пластинчатого электрофильтра

$$\eta = 100 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{w_{\text{ч}} \cdot L}{w_{\Gamma} \cdot h}} \right),$$

где  $w_{\text{ч}}$  – скорость движения частиц к осадительным электродам (скорость дрейфа частиц), м/с;  $w_{\Gamma}$  – скорость газов в активном сечении электрофильтра, т. е. в свободном сечении для прохода газов, м/с;  $L$  – активная длина электрофильтра, т.е. протяженность электрического поля в направлении хода газов (в вертикальных электрофильтрах совпадает с высотой электродов), м;  $r$  – радиус трубчатого осадительного электрода, м;  $h$  – расстояние между коронирующим электродом и пластинчатым осадительным электродом (межэлектродный промежуток), м.

В пределах применимости формулы Стокса скорость  $w_{\text{ч}}$  (в м/с) рассчитывают по следующим формулам:

– для частиц диаметром  $d_{\text{ч}} \geq 1$  мкм

$$w_{\text{ч}} = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot d_{\text{ч}}}{2 \cdot \mu},$$

– для частиц диаметром  $d_{\text{ч}} \leq 1$  мкм

$$w_{\text{ч}} = \frac{0,17 \cdot 10^{-11} \cdot E C_{\text{к}}}{\mu},$$

где  $C_{\text{к}}$  – коэффициент, равный  $\frac{A \cdot \lambda}{d_{\text{ч}}}$  ( $A = 0,815-1,63$ );  $\lambda$  – длина среднего свободного пробега молекул газа ( $\lambda = 10^{-7}$  м).

$$\text{Скорость осаждения заряженных частиц } w_0 = \frac{q \cdot E \cdot C_{\text{к}}}{3 \cdot \pi \cdot \mu_{\Gamma} \cdot d_{\text{ч}}}.$$

### Типы осадителей

Электрофильтры делятся на одно- и двухступенчатые (рис. 1.36). Двухступенчатые используют для очистки вентиляционного воздуха, а также в некоторых отраслях легкой промышленности. Они компактны, поддаются массовому производству и удовлетворяют потребностям рынка сбыта. Однако приоритет в использовании отдается одноступенчатым системам, применяемым в тяжелой промышленности. Два основных типа этих электрофильтров – трубные и с каналами прямоугольного сечения. Наиболее широко применяются

электрофильтры с прямоугольными каналами (рис. 1.41). Их используют для газовых потоков объемом 25...30 м<sup>3</sup>/с.

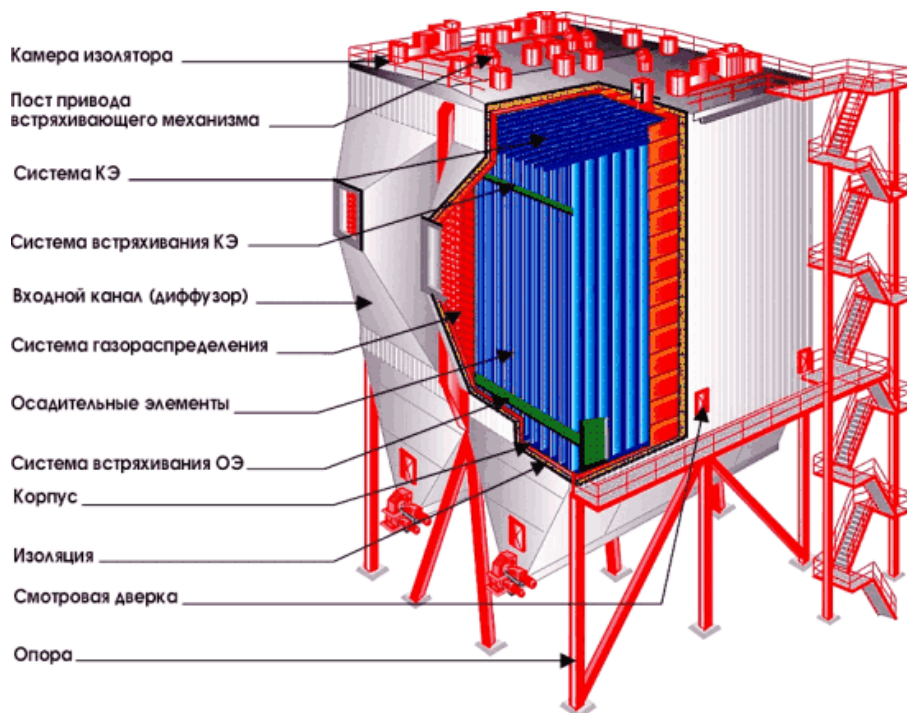


Рис. 1.41. Электростатический фильтр

Электрофильтры подразделяются на сухие и мокрые. В сухих электрофильтрах обычно улавливаются твердые частицы, которые удаляются с электродов встряхиванием. Очищаемый в сухом электрофильтре газ должен иметь температуру, превышающую точку росы, во избежание конденсации влаги, появление которой может вызвать коррозию аппарата.

В мокрых электрофильтрах можно улавливать твердые и жидкие частицы, смываемые с поверхности электродов орошающей жидкостью (обычно водой). Температура газа, поступающего в мокрый электрофильтр, должна быть близкой к точке росы или равна ей. Если жидкие частицы самостоятельно стекают с электродов по мере их накопления, то мокрые электрофильтры могут не иметь специальных устройств для промывания.

### **1.3.7. 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:

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

Рассмотрим некоторые примеры.

### **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). Особенностью сажи является высокая дисперсность составляющих ее частиц (0,01...5,5 мкм) и их низкое удельное электрическое сопротивление. Плотность сажи находится в пределах 1750...2000 кг/м<sup>3</sup>, а ее насыпная плотность – 40...300 кг/м<sup>3</sup>. В зависимости от способа производства сажи и ее сорта применяют различные схемы сажеулавливания из технологических газов сажевых производств.

На рис. 1.42 в качестве иллюстрации приведена схема очистки технологических газов в производстве форсуночной сажи. Такую сажу получают при сжигании жидких нефтепродуктов, распыляемых форсунками в реакторах при недостатке воздуха. Она характеризуется большой дисперсностью: ее удельная поверхность составляет 25...35 м<sup>2</sup>/г. 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 упразднения пиковых давлений при возникновении в системе «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 газов составляет  $\approx 1,3$  % об.

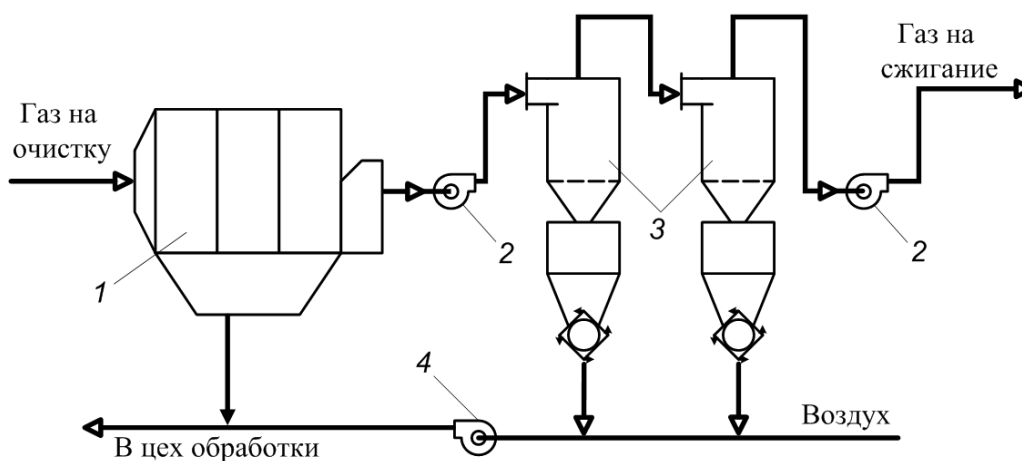


Рис. 1.42. Схемы установки рекуперации сажи из технологических газов производства форсуночной сажи:

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

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.

### Возврат пыли в производство

Возврат пыли в производство является одним из наиболее распространенных и рациональных приемов обеспечения безотходности производства с одновременным увеличением его эффективности и решением природоохранных задач. Технология возврата улавливаемых пылевых материалов в основное производство обычно определяется используемыми способами газоочистки (сухими, мокрыми, одно- и

двухступенчатыми, комбинированными) и целесообразностью введения этих продуктов в определенный аппарат технологической схемы в том или ином агрегатном состоянии.

При получении декаоксотрифосфата (триполифосфата) натрия с отдельной сушкой раствора в распылительной сушилке и прокаливанием сухих ортофосфатов в турбокальцинаторе газы, поступающие в систему очистки (см. рис. 1.43) отделения сушилки, состоят из продуктов сгорания природного газа, избыточного воздуха, влаги и пыли ортофосфатов натрия ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  и  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ).

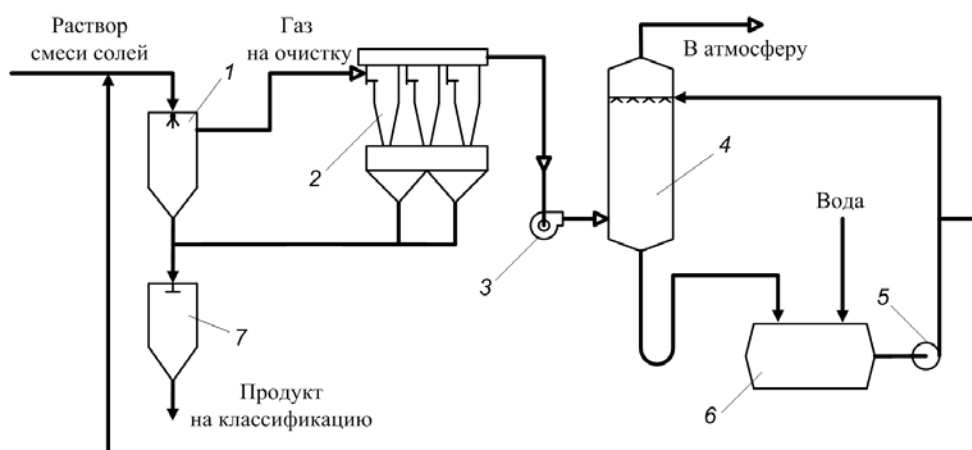


Рис. 1.43. Схема установки рекуперации пыли из газов распылительной сушилки ортофосфатов натрия:

1 - распылительная сушилка, 2 - батарейный циклон, 3 – дымосос, 4 - полый скруббер, 5 – насос, 6 - емкость для орошающего раствора, 7 - турбокальцинатор

Пыль ортофосфатов натрия относится к третьей группе пылей и является среднedisперсной. Количество пыли составляет около 44 % от производительности установки по ортофосфату натрия. Основную ее часть улавливают в батарейном циклоне. Дисперсный состав пыли ортофосфатов, уловленной циклоном и проходящей через циклон, представлен ниже:

| фракция, мкм        | 0...20 | 20...30 | 30...40 | 40...50 | >50  |
|---------------------|--------|---------|---------|---------|------|
| содержание пыли, %: |        |         |         |         |      |
| – уловленной        | 2,3    | 6,7     | 22,0    | 70,0    | 69,0 |
| – на выходе         | 40,0   | 27,0    | 23,0    | 10,0    | 23,0 |

Фракционная эффективность очистки характеризуется следующими показателями:

|                  |        |         |         |      |
|------------------|--------|---------|---------|------|
| фракция, мкм     | 0...10 | 10...15 | 15...20 | >20  |
| эффективность, % | 5,4    | 20,0    | 50,0    | 87,0 |

Общая эффективность очистки для батарейного циклона составляет 96,4%.

Предварительно очищенные газы подают затем в полый скруббер, орошаемый раствором ортофосфата натрия, насыщающимся в процессе циркуляции до плотности  $1300 \text{ кг/м}^3$ , при достижении которой раствор выводят из цикла и передают на сушку, а систему заполняют свежей водой. Расход раствора, подаваемого на форсунки скруббера, составляет  $0,237 \text{ л/м}^3$  очищаемого газа. Дисперсную смесь солей из пылесборного бункера батарейного циклона транспортируют в кальцинатор для получения высококачественного продукта.

В целом ряде производственных процессов, сопровождающихся пылеобразованием продуктов на отдельных стадиях, используют еще более простые рекуперационные схемы. 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 скрубберы), 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.

В качестве иллюстрации на рис. 1.44 приведена схема рекуперации аммиака и пылевидного карбамида из пылегазовой смеси, выходящей из кристаллизаторов карбамидного производства.

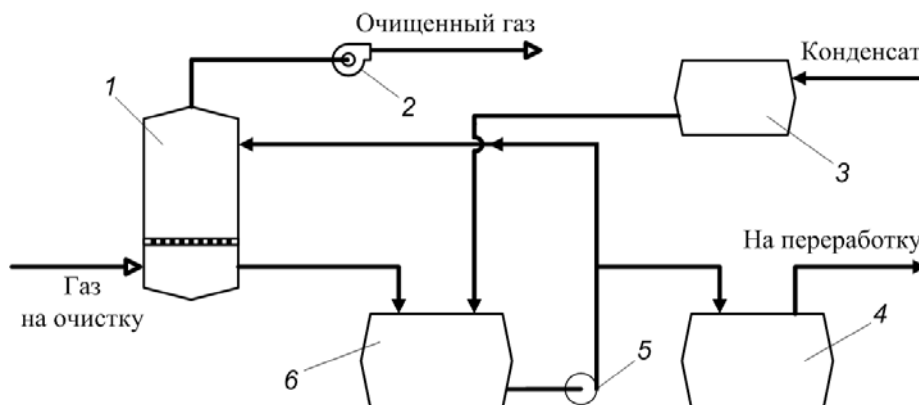


Рис. 1.44. Схемы установок рекуперации газообразного аммиака и пылевидного карбамида из отходящих газов кристаллизаторов в производстве карбамида:  
 1 - пенный аппарат, 2 – вентилятор, 3 - емкость для конденсата, 4 - промежуточная емкость, 5 – насос, 6 - емкость для поглотительного раствора

Поглотительный раствор циркулирует в системе до достижения 40...50% 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.

Аналогично может быть организована рекуперационная технология пылеулавливания в производстве аммиачной селитры на стадии очистки газов процесса гранулирования, в производстве адипиновой кислоты на стадии ее сушки и в некоторых других процессах. Подобным же образом – с непосредственным возвратом улавливаемой пыли в виде водного раствора в основное производство организуют рекуперационные циклы при очистке вентиляционных выбросов в производствах хлорида кальция, карбамида и ряда других продуктов.

### **Утилизация пыли, уловленной в одном производстве, в качестве сырья для другого производства**

Это 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 триоксид 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.

Сажа, выделенная при очистке технологических и отходящих газов ряда производств, может быть использована для приготовления гранул или брикетов, служащих в качестве котельного топлива. Например, в процессах газификации жидких топлив при мокрой очистке получаемого синтез-газа, используемого в качестве сырья для различных химических синтезов, сажевую пыль выводят в виде водного раствора, отстой которого (шлам) может быть переработан в процессе, схема которого приведена на рис. 1.45. По этой схеме синтез-газ очищают от сажи в несколько ступеней с использованием последовательно установленных по ходу газа скруббера, пенного аппарата и электрофильтра.

В качестве рабочей жидкости в системе используют воду, циркуляция которой обеспечивается центробежными насосами. Во избежание накопления в воде вредных примесей и солей жесткости в системе водооборота сажеочистки (помимо дегазации и охлаждения воды в градирне) предусмотрены ее подщелачивание и продувка (обычно воду сбрасывают вместе с саженной пульпой). Отделяемую в отстойниках сажевую пульпу (шлам с содержанием сажи около 5 %)

обезвоживают на вакуум-филт্রে. Полученный концентрат смешивают с керосином (или другими подобными продуктами) из расчета 140 кг на 1 м<sup>3</sup> шлама. Смесь гранулируют. Готовый продукт – топливные гранулы размером 5...15 мм – содержат 25 % сажи, 70 % керосина и 5 % влаги.

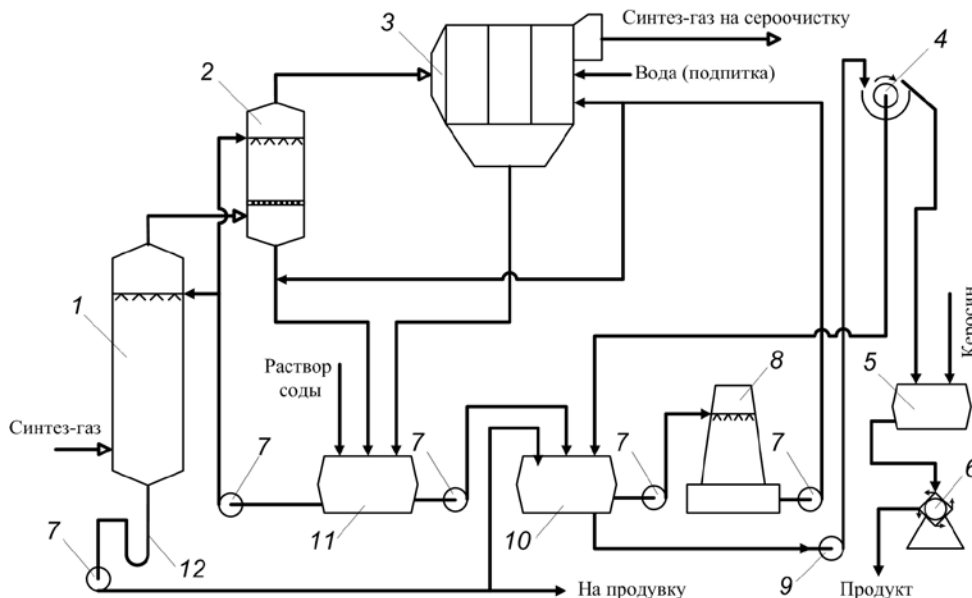


Рис. 1.45. Схема производства топливных гранул из сажи, рекуперированной при очистке синтез-газа в процессе газификации жидких топлив:

1 – скруббер, 2 - пенный аппарат, 3 – электрофилтр, 4 - вакуум-филтр, 5 – смеситель, 6 - тарельчатый гранулятор, 7 – насос, 8 – градирня, 9 – шламонасос, 10 – отстойник, 11 – смеситель, 12 - гидрозатвор

Следует отметить, что в ряде случаев возможно и целесообразно комплексное использование технологических и аспирационных пылей различных производств с целью получения товарной продукции. Например, при приготовлении сырьевых смесей для получения цементного клинкера широко используют огарковую пыль серноокислотного производства. Эту же пыль применяют в производстве некоторых минеральных пигментов.

## Вопросы для самоконтроля

1. Дайте характеристику основных свойств пылей
2. Объясните: что такое фракционная и общая эффективности очистки газов от пылей?
3. Какова природа сил, используемых для улавливания пыли механическими осадителями?
4. Какие аппараты применяют для сухой очистки газов от пылей? Укажите их достоинства, недостатки и эффективность.



5. Перечислите основные типы циклонных осадителей.
6. Каковы основные механизмы улавливания пылей в фильтрах?
7. Какие пористые перегородки используют в фильтрах для очистки газов и каковы принципы их выбора?
8. Какие фильтры используют для тонкой очистки газов?
9. Каково устройство и конструкция электрофильтров?
10. Какие аппараты применяют для мокрой очистки газов и какова их эффективность?
11. Какие аппараты применяют для улавливания туманов?
12. Для какой цели устанавливают сепараторы в аппараты для мокрой очистки газов?
13. Назовите возможные пути рекуперации промышленных пылей.



## **1.4. Обработка газов методами абсорбции, адсорбции и конденсации**

### **1.4.1. Применимость рассматриваемых методов**

Существует пять основных методов удаления газообразных загрязнителей: абсорбция, адсорбция, конденсация, химическая обработка и сжигание горючих загрязнителей. Для абсорбции газа используют жидкие растворители. Ее применение особенно эффективно при значительных концентрациях газообразных загрязнителей (начиная от объемной доли в несколько процентов). Однако возможно применение этих растворителей и при весьма низких концентрациях, когда растворимость газа в жидкости очень высока. Хотя вода используется как растворитель наиболее часто, для поглощения газов, плохо растворимых в воде, можно применять другие растворители с низким давлением пара; примером указанных газов могут служить углеводороды или  $H_2S$ . Вода, используемая для абсорбции, может содержать добавки химических веществ, таких как кислоты, щелочи, окислители или восстановители, реагирующие с поглощаемым газом и снижающие равновесное давление его пара. Данный вариант можно рассматривать как комбинацию методов абсорбции и химической обработки, однако в настоящей главе он обсуждается совместно с методами абсорбции.

Адсорбцию применяют для удаления большого числа различных газообразных загрязнений, особенно органических, до получения их очень низких объемных концентраций (менее миллионных долей). Основными областями применения этого метода являются обработка больших объемов газов с очень низкой концентрацией загрязняющих веществ и снижение концентраций этих веществ до следовых уровней. Полярные адсорбенты, такие, как активированные оксиды алюминия, силикагель и молекулярные сита, обладают высокой селективностью по отношению к газам с полярными молекулами. Однако присутствие таких часто встречающихся полярных продуктов, как водяной пар, может приводить к снижению их адсорбирующей способности по отношению к другим веществам или делать их вовсе неэффективными. Неспецифический адсорбент – активированный уголь – получил наиболее широкое распространение. Он является одним из немногих адсорбентов, которые можно использовать для влажных газов. Вследствие неспецифичности активированный уголь адсорбирует все газы, присутствующие в малых количествах, пропорционально их концентрациям, поэтому следует учитывать тот факт, что, помимо газа, который необходимо уловить, будут адсорбироваться и другие примеси. Поскольку адсорбент должен регенерироваться для повторного использования, при разработке процесса необходимо также подробно рассматривать и стадии десорбции. Некоторые материалы обладают такой сильной адсорбирующей способностью, что при десорбции одновременно удаляется некоторое количество молекул адсорбента (хемосорбция). Другие материалы, на которых происходит полимеризация в порах адсорбента, постепенно теряют свою активность, потому что удаления полимерного материала не происходит и площадь поверхности адсорбента уменьшается.

Конденсация может быть применена для удаления материалов, имеющих низкое давление пара, при умеренных температурах, а также для материалов с высоким давлением пара в тех случаях, когда не требуется удаление загрязнений до столь низких концентраций, как миллионные доли. Необходимость охлаждения при конденсации значительно снижает экономическую эффективность этого метода обработки.

Выбор метода обработки в определенной степени может определяться параметрами газового потока и концентрацией загрязняющих веществ. Для снижения расходов желательно, чтобы объем обрабатываемого газа был минимально возможным, а концентрация загрязняющего вещества по возможности более высокой (необходимо минимальное количество инертных разбавителей). Для потоков с высокой концентрацией загрязнителя может оказаться



целесообразным использование системы предварительной обработки. Это позволит уменьшить размеры основной очистной системы и обеспечит более высокую экономическую эффективность. Если не учитывать таких дополнительных обстоятельств, как необходимость извлечения ценных продуктов или предварительное охлаждение горячего газового потока, то обработка в одной системе, как правило, дешевле (меньше капиталовложений), чем при двух- или многостадийной обработке. При необходимости обработки небольших потоков с высокими концентрациями загрязнений и больших объемов с малыми их концентрациями следует, прежде всего, рассматривать возможность обработки каждого потока в отдельности, а не варианты, предполагающие смешивание обоих потоков. При раздельной подаче потоков более разбавленный газ в некотором количестве может периодически подаваться в обрабатывающую систему, что позволяет поддерживать движущую силу, связанную с градиентом концентрации.

#### **1.4.2. Осложняющие обстоятельства**

Присутствие твердых частиц в газовом потоке, особенно при больших нагрузках, может привести к затруднениям в работе очистного оборудования. Твердые частицы могут забивать насадку в абсорберах и в солях гранулированного адсорбента, а также загрязнять теплопередающие поверхности конденсатора. Для удаления твердых частиц можно применять предварительную обработку в устройствах для улавливания сухих частиц (циклоны, рукавные фильтры и электрофильтры). Другим решением проблемы может быть разработка специального оборудования, позволяющего проводить одновременную обработку газов и твердых материалов. В абсорберах с насадкой можно обрабатывать твердые частицы, которые достаточно хорошо растворяются в абсорбирующей жидкости, если обеспечивается хорошая промывка всех поверхностей, о которые ударяются частицы, и если нагрузка, вызываемая твердыми загрязнениями, не очень велика. Обычно верхний предел концентрации твердых частиц составляет около  $11,4 \text{ г/м}^3$ . Для обработки нерастворимых (но не прилипающих) твердых частиц при высокой нагрузке можно использовать насадочные колонны с поперечным потоком. При высокой нагрузке по твердым загрязнениям следует использовать оборудование, обеспечивающее одновременное улавливание твердых частиц и абсорбцию газа, например: брызгальных градилен, тарельчатых колонн, скрубберов Вентури, псевдооживленных сферических насадок и мокрых электрофильтров. При недостаточной эффективности абсорбции в указанных устройствах необходимо обеспечить эффективное удаление твердых частиц до того, как газ поступает в контактный аппарат. При

проведении конденсации в присутствии твердых частиц предпочтительно использовать струйные конденсаторы с непосредственным контактом.

Присутствие газообразных загрязнителей разных типов также может привести к усложнению конструкции и к затруднениям при выборе системы обработки. Как правило, следует выбирать такой метод, который обеспечивает обработку всех присутствующих газообразных загрязнителей. Система должна иметь достаточную емкость по отдельным компонентам, а также соответствующую суммарную емкость. Необходимость разделения уловленных веществ для повторного использования в технологическом процессе (или для удаления) может еще более усложнить конструкцию системы.

Все методы, обсуждаемые в настоящей главе, позволяют улавливать и выделять загрязняющие вещества во многих случаях в виде концентрированного материала. Их использование наиболее целесообразно тогда, когда улавливаемые загрязнения имеют какую-либо ценность: либо для повторного использования, либо как сырье для производства других товарных продуктов. Если улавливаемые материалы не находят никакого практического применения, то может возникнуть дополнительная проблема их удаления. В таких случаях более целесообразно использовать другие методы обработки, такие, например, как сжигание, конечно, если присутствующие загрязнители горючи.

### **1.4.3. Абсорбция**

Абсорбция представляет собой процесс химической технологии, включающий массоперенос между растворимым газообразным компонентом и жидким растворителем, осуществляемый в аппарате для контактирования газа с жидкостью. Движущей силой абсорбции является разность между парциальным давлением растворенного газа в газовой смеси и его равновесным давлением над пленкой жидкости, контактирующей с газом. Если значение движущей силы не является положительным числом, то абсорбции не происходит. Если это значение представляет отрицательную величину, то происходит десорбция и количество загрязнителей в обрабатываемом газе возрастает.

#### **Абсорбционные системы**

Эти системы можно разделить следующим образом:

- 1) системы, в которых в качестве основной абсорбирующей жидкости используется вода;

2) системы, в которых используются малолетучие органические жидкости.

Абсорбционная система может быть простой, в которой жидкость применяется только один раз и без отделения абсорбированного загрязнения удаляется из системы. В другом варианте загрязнение отделяют от абсорбирующей жидкости, выделяя последнюю в чистом виде. Затем абсорбент вновь подают на стадию абсорбции, снова регенерируют и возвращают в систему. Помимо регенерации абсорбента с помощью выпаривания (десорбции), возможно удаление абсорбированных загрязнений путем осаждения и отстаивания, путем их химического разрушения в результате нейтрализации, окисления, восстановления или гидролиза, а также экстракцией, жидкостной адсорбцией и другими методами.

### **Водные системы**

При использовании воды абсорбируемый газ должен достаточно хорошо растворяться в ней при той конечной температуре, которая устанавливается в системе «газ–жидкость». Для абсорбции газообразных загрязнений с ограниченной растворимостью в воде, таких, как  $\text{SO}_2$  или бензол, необходимы очень большие количества воды. Такие процессы обычно не имеют практического значения, однако их можно применять в некоторых специальных случаях. Удаление  $\text{SO}_2$  из отходящих поточных газов путем промывки речной водой, имеющей щелочную реакцию, применяемое на электростанциях Баттерси и Бэнксайд в Англии, может служить примером поглощения газа с ограниченной растворимостью очень большими количествами воды при одноразовом использовании абсорбирующей жидкости.

Вода обладает высокой эффективностью при удалении кислых растворимых газов, таких, как  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  и  $\text{SiF}_4$ , особенно если на последней стадии обработки используют воду, имеющую слабощелочную реакцию. Напротив,  $\text{NH}_3$  легко улавливается водой, если на последней стадии контактирования воду подкисляют. Газы с меньшей растворимостью, например  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ , легче абсорбируются не чистой водой, а щелочными растворами, в частности, разбавленным  $\text{NaOH}$  или водным раствором извести. Добавки химических реагентов во многих случаях могут увеличивать движущую силу массопереноса за счет химической реакции в водной пленке, приводящей к изменению молекулярной формы абсорбируемого загрязнения.

Системы, в которых используется вода, как правило, пригодны для абсорбции только тех органических соединений, которые обладают значительной растворимостью в воде.

## **Неводные системы**

Помимо воды, которая является наиболее широко распространенной абсорбирующей жидкостью для кислых газов, применяются также органические жидкие абсорбенты, такие, как диметиланилин и амины (моно-, ди- и триэтаноламин и метилдиэтаноламин). Использование таких абсорбентов, как правило, ограничено системами, не содержащими твердых частиц, поскольку твердые вещества загрязняют органические жидкости, в частности, происходит образование шламов, трудно поддающихся удалению. Как правило, стоимость промывной жидкости достаточно высока и в большинстве случаев требуется ее регенерация.

Абсорбция органическим растворителем наиболее эффективна для удаления органических газообразных загрязнений, поскольку в этом случае обеспечиваются хорошая растворимость и смешиваемость. Низкие значения теплоты испарения органических жидкостей позволяют снизить энергоемкость процесса в тех случаях, когда регенерация осуществляется путем упаривания. Многие тяжелые масла, гексадекан (топливное масло №2) или более тяжелые продукты, а также растворители с низким давлением пара позволяют уменьшить концентрацию органических паров до очень низких значений. Однако при этом необходимо учитывать возможность выделения некоторого количества паров абсорбирующей жидкости в окружающую атмосферу.

При использовании промывных жидкостей с достаточно высоким давлением паров может происходить насыщение ими отходящего газа, что приводит к нарушению законодательных требований, ограничивающих содержание неметановых углеводородов в выбросах. Чем большее количество газа подается на промывку, тем ниже должно быть давление пара промывной жидкости. Как правило, давление паров промывной жидкости на выходе газового потока не должно превышать 13,332 Па (0,1 мм рт. ст.).

Важное значение имеет также стабильность органического растворителя в системе «газ – растворитель» (в частности, его устойчивость к окислению); необходимо учитывать и возможную огне- и взрывоопасность органических соединений.

## **Однократная абсорбция и регенерация**

При абсорбции определяющей характеристикой является межфазная поверхность, от состояния которой во многом зависит скорость переноса целевого компонента из газовой фазы в жидкую. Поэтому интенсификация абсорбционных процессов проводится по пути создания аппаратов с наиболее развитой поверхностью контакта фаз, способных работать при высоких скоростях газового потока,

рассчитанных на полное поперечное сечение, т. е. по пути создания аппаратов большой единичной мощности.

При простой однократной абсорбции свежая абсорбирующая жидкость непрерывно подается в абсорбционную колонну или камеру. Выходящий поток жидкости, в котором содержатся абсорбированные или химически связанные газообразные загрязнения, может быть снова использован в процессе, направлен на продажу с целью утилизации или удален из системы таким образом, чтобы не нанести вреда окружающей среде. Альтернатива состоит в регенерации и повторном использовании абсорбирующей жидкости.

Выпаривание газообразных загрязняющих веществ и их выделение в концентрированном виде представляет один из возможных методов регенерации. Его почти всегда применяют при использовании органических абсорбентов, поскольку их высокая стоимость делает необходимым сведение потерь к минимуму. На рис. 1.46 приведена схема потоков для системы, включающей абсорбер и отпарную колонну, которая применяется для удаления паров бензола из отходящих газов с последующим выделением бензола.

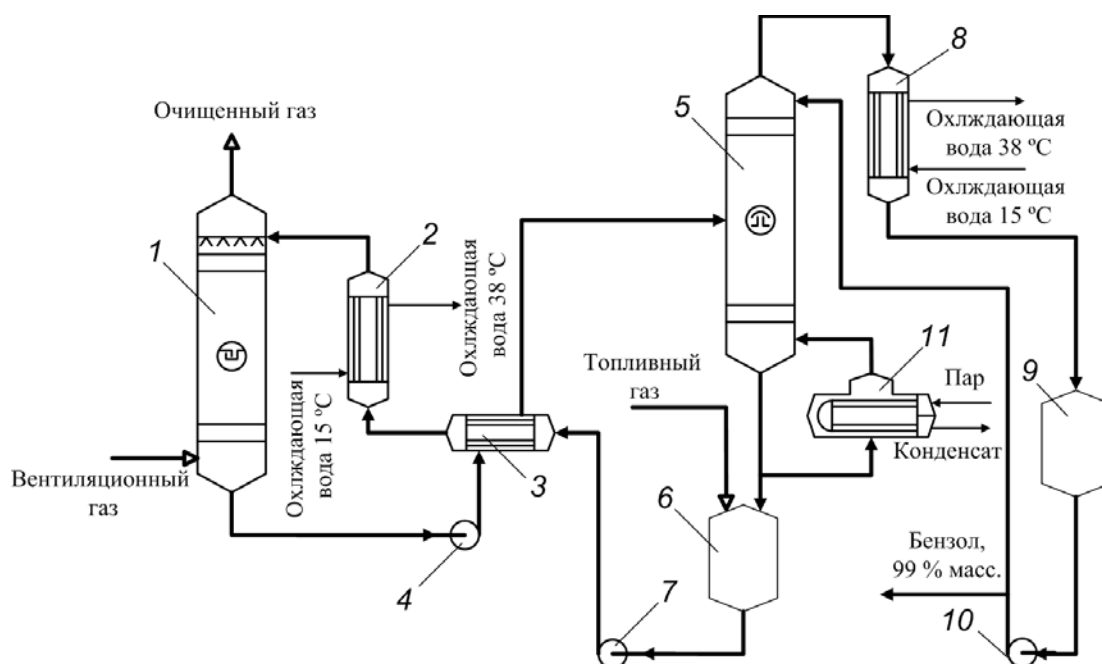


Рис. 1.46. Система для удаления паров бензола из вентиляционного потока рециркулируемым топливным маслом:

1 – абсорбер, 2 – холодильник, 3 – теплообменник, 4 – насос абсорбера, 5 – отпарная колонна, 6 – циркуляционный резервуар, 7 – насос отпарной колонны, 8 – конденсатор отпарной колонны, 9 – резервуар для флегмы, 10 – насос для флегмы, 11 – ребойлер

Помимо упаривания, для регенерации можно использовать такие методы, как комплексообразование, осаждение и отстаивание

абсорбированных материалов, разрушение с помощью химических реагентов, а также выделение другими способами, такими, как кристаллизация, экстракция и т. п.

### **Конструкция абсорбционного оборудования**

Для осуществления абсорбции необходим непосредственный контакт между газом и жидкостью. Обычно жидкость диспергируют с образованием маленьких капель или тонких пленок, которые вследствие турбулентности постоянно образуются заново, что обеспечивает большую площадь поверхности жидкой фазы, необходимую для массопереноса, и наличие пленок, не насыщенных загрязняющими веществами, вследствие чего движущая сила имеет высокие значения.

В современных абсорбционных аппаратах применяются самые разнообразные конструкции контактных устройств. Можно выделить следующие наиболее перспективные аппараты:

- с контактными элементами, работающими в условиях повышенных нагрузок взаимодействующих фаз;
- с контактными элементами, эффективно работающими в широком диапазоне изменения расходов фаз;
- с контактными элементами, обладающими малым гидравлическим сопротивлением.

По общепринятой классификации абсорберы подразделяются на следующие группы:

- поверхностные;
- барботажные;
- распыливающие.

Из аппаратов этих групп интенсивно используются насадочные и тарельчатые колонны, открытые брызгальные камеры и колонны, мокрые циклоны, а также сочетания аппаратов с насадкой и с разбрызгиванием. В некоторых случаях применяют колонны с отражателями, особенно при наличии серьезных проблем, связанных с образованием накипи и с забивкой системы. Вместе с соответствующими механическими устройствами они получили достаточно широкое распространение в ряде европейских стран для проведения абсорбции.

#### ***Абсорберы с насадкой***

Колонны с насадками обеспечивают высокую эффективность контакта между газом и жидкостью и интенсивный массоперенос. В связи с этим их размеры обычно меньше, чем открытых камер с разбрызгиванием.

Наиболее широко распространенные типы насадок показаны на рис. 1.47. Седлообразная насадка, как правило, обеспечивает более

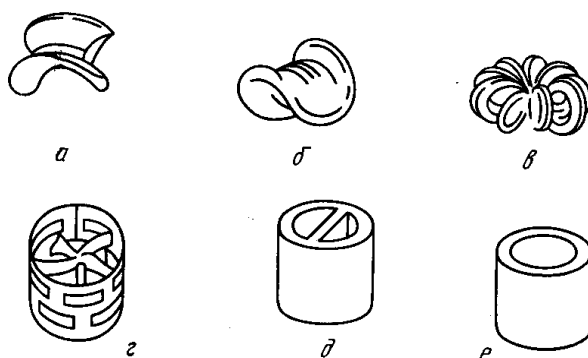


Рис. 1.47. Насадки, используемые в абсорберах:  
*a* - седлообразная Intalox; *б* - седлообразная Берля; *в* - теллеровская; *г* - кольца Палля;  
*д* - кольца Лессига; *е* - кольца Рашига

эффективный контакт и меньший перепад давлений, однако ее стоимость выше, чем кольцевой насадки. Кольцевая насадка Палля позволяет достичь более высоких скоростей массопереноса, чем кольца Рашига и Лессига, но и эта насадка имеет более высокую стоимость, а для ее изготовления необходим коррозионностойкий металл.

Керамические и угольные кольца, как правило, обладают достаточно высокой стойкостью ко многим химическим соединениям. Имеются керамические насадки, получаемые методом экструзии, для насадочных камер очень большого размера, а также много насадок различных форм и размеров для тех случаев, когда возможно применение металлов.

Насадка Теллера и другие пластиковые насадки более сложной формы могут быть использованы при температурах, не превышающих 355...360 К, когда обеспечиваются высокая стойкость массопереноса и малый перепад давлений. Большая поверхность такой насадки обуславливает постоянное обновление пленки жидкости, а большой свободный объем – минимальный перепад давлений.

На рис. 1.48. показаны насадочные абсорберы двух типов. В противоточной насадочной колонне (рис. 1.48 *a*) достигается максимальная движущая сила, поскольку выходящий газ с наименьшей концентрацией загрязнений контактирует со свежим абсорбционным раствором. Небольшие размеры, высокая скорость массопереноса и большая движущая сила позволяют считать эту колонну оптимальным аппаратом в тех случаях, когда обрабатываемый газ не содержит значительного количества твердых частиц. В присутствии нерастворимых твердых веществ обработка противотоком не рекомендуется, поскольку быстро забивается насадка. Наличие

параллельного нисходящего потока газа и жидкости может уменьшить вероятность забивки. Колонна, показанная на рис. 1.48 *a*, может быть переведена в режим параллельного потока путем изменения направления движения потока, газа. Сообщается, что при абсорбции  $\text{SiF}_4$  в водных системах срок службы насадки до чистки составил 6 месяцев и забивки при использовании параллельного потока не наблюдалось. В этой системе при взаимодействии  $\text{SiF}_4$  с водой образуется гель кремниевой кислоты, который легко прилипает к насадке.

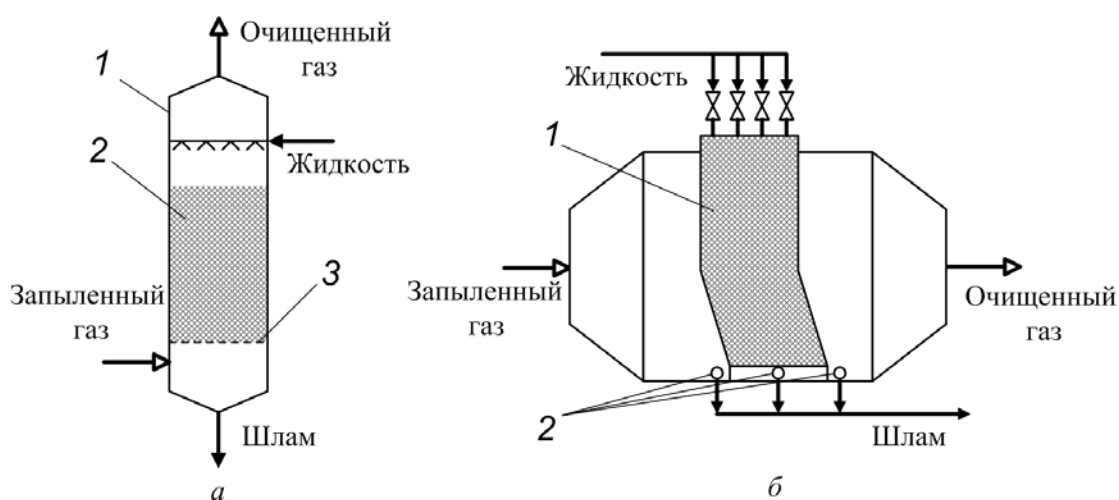


Рис. 1.48. Аппараты для абсорбции газов:

- a* - противоточная насадочная колонна: 1 - насадочная колонна, 2 – насадка, 3 - конструкционный элемент для распределения газа и удерживания насадки;  
*б* - насадочный абсорбер с поперечный потоком: 1 - слой насадки; 2 – шламосборник

Насадочный скруббер с поперечным потоком показан на рис.1.48 *б*. Он обладает более высокой стойкостью против забивания твердыми частицами. Газ проходит через аппарат в горизонтальном направлении, а жидкость – над насадкой вертикальным потоком вниз. Теллеровскую насадку часто используют в тех случаях, когда необходимо обеспечить малый перепад давлений и высокую скорость массопереноса без нарушения распределений в потоке жидкости. Последнее обстоятельство позволяет изменять скорость подачи жидкости путем перемещения насадки. При использовании в качестве абсорбера только газообразных компонентов конструкционные параметры имеют следующие типичные значения:

|  |        |
|--|--------|
| скорость газового потока $G$ , кг/(с·м <sup>3</sup> )  | 2,44;  |
| скорость потока жидкости $L$ , кг/(с·м <sup>3</sup> )  | 2,03;  |
| то же при наличии твердых частиц, кг/(с·м <sup>3</sup> )                                     | 2,71;  |
| то же на участке первых 300 м насадки по направлению газового потока, кг/(с·м <sup>3</sup> ) | 13,56. |



Аппарат нормально функционирует при нагрузке по загрязняющим веществам до  $11 \text{ г/м}^3$  (величина площади поверхности в таких скрубберах определяется в плоскостях, перпендикулярных к направлению движения каждого из потоков жидкости). В случае скрубберов с поперечным потоком основная проблема связана с увеличением масштаба аппарата. Для каждой объемной единицы насадки характерна собственная величина градиента движущей силы массопереноса и не существует простых математических зависимостей, позволяющих рассчитать суммарное значение для всего аппарата.

### Тарельчатые колонны

На рис. 1.49 показана тарельчатая колонна, используемая для абсорбции газа. Контакт между газом и жидкостью достигается при прохождении газа через маленькие отверстия в тарелках и его барботировании через слой жидкости, находящийся на тарелке.

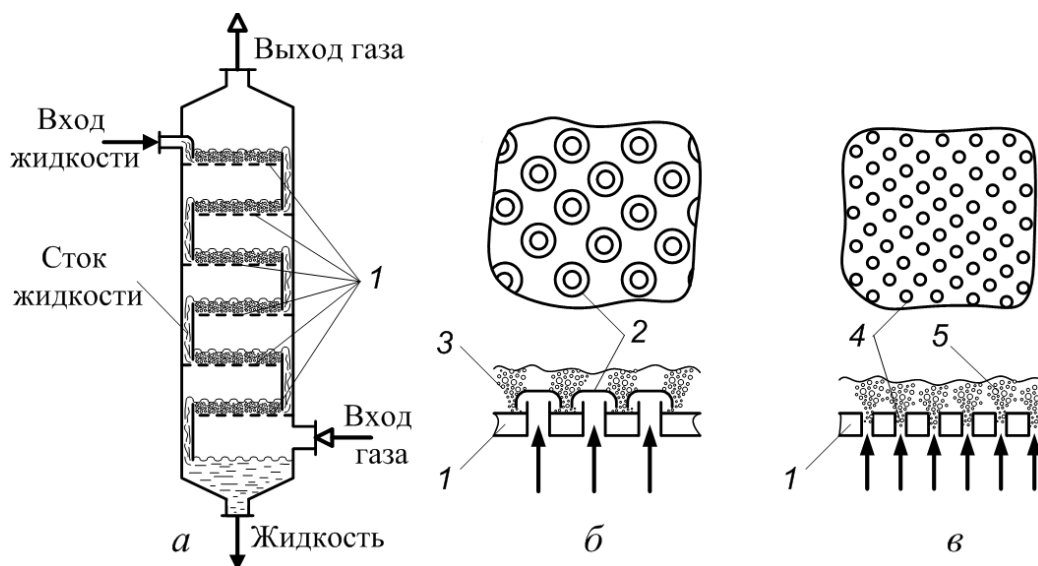


Рис.1.49. Типичная тарельчатая абсорбционная колонна и два вида тарелок:  
*а* - тарельчатая колонна: 1 – тарелки, 2 - корпус колонны, 3 - переливная трубка;  
*б* - колпачковая тарелка: 1 – тарелка; 2 - колпачки; 3 - жидкость;  
*в* - ситовая тарелка: 1 – тарелка; 2 – отверстия; 3 - жидкость

Колпачковая барботажная тарелка, показанная на рисунке, является классическим устройством для осуществления контакта газа и жидкости. Другой вариант – клапанная тарелка, позволяющая работать в более широком интервале скоростей газового потока без значительного уноса жидкости. Ситовые тарелки имеют большое число мелких отверстий. Их преимущества – малая стоимость и высокая эффективность, однако эксплуатация таких тарелок возможна только в узком интервале скоростей газового потока. Обычно тарелки

соединяются последовательно, что позволяет обеспечить необходимую эффективность абсорбции.

При использовании тарельчатых колонн предполагается подача жидкости и газа противотоком. Обычно жидкость стекает по тарелкам через переливные трубки, которые благодаря давлению восходящего газового потока позволяют поддерживать постоянный уровень жидкости на тарелках. Переливные трубки также выполняют роль гидрозатвора, не дающего возможности газу подниматься в обход тарелок.

Провальные тарелки имеют отверстия больших размеров, чем ситовые, и в них жидкость стекает через те же отверстия, через которые проходит газ. Переливные трубки здесь отсутствуют. В некоторых разновидностях ситовых тарелок используют небольшие отражатели, погружаемые в жидкость вокруг отверстия для прохода газа (скруббер Пибоди); вместо перфорированных тарелок можно использовать плетеную сетку. Последний вариант в основном применяют в скрубберах, предназначенных для улавливания твердых частиц, и его использование для абсорбции только газовых компонентов нецелесообразно.

Газовый объем над жидкостью, находящейся на тарелке, заполняется пеной и аэрозолем, содержащим частицы жидкости. Это явление способствует увеличению эффективности контакта и не является нежелательным до тех пор, пока унос жидкости не становится чрезмерным. В случае необходимости для уменьшения уноса в газовом пространстве могут быть установлены влагоотбойники, выполненные в виде сетчатых прокладок.

### **Брызгальные скрубберы**

На рис. 1.50 представлены различные типы аппаратов с разбрызгиванием. Они обладают достаточно высокой устойчивостью к забивке при наличии в газе твердых частиц. Чтобы предотвратить возможную забивку форсунок, можно применять рецикл жидкости. При высокой концентрации твердых частиц можно проводить предварительное отстаивание и фильтрацию. Горизонтальные камеры с разбрызгиванием (рис. 1.50 *а*) рассмотрены в работе. Они, как и вертикальные колонны с разбрызгиванием (рис. 1.50 *б*), широко применяются для обработки газовых выбросов, содержащих твердые частицы. Циклонные распыливающие колонны (рис. 1.50 *в, г*) позволяют несколько повысить эффективность промывки газа (более высокие коэффициенты массопереноса и большее количество единиц переноса).

Хотя теоретически не существует предела для числа единиц переноса в противоточной вертикальной насадочной или тарельчатой колонне достаточно больших размеров, для колонны с разбрызгиванием число единиц переноса ограничено. При очень большой высоте колонны и при больших скоростях газа наблюдается значительный унос с восходящим потоком, что приводит к нарушению условий истинного противотока.

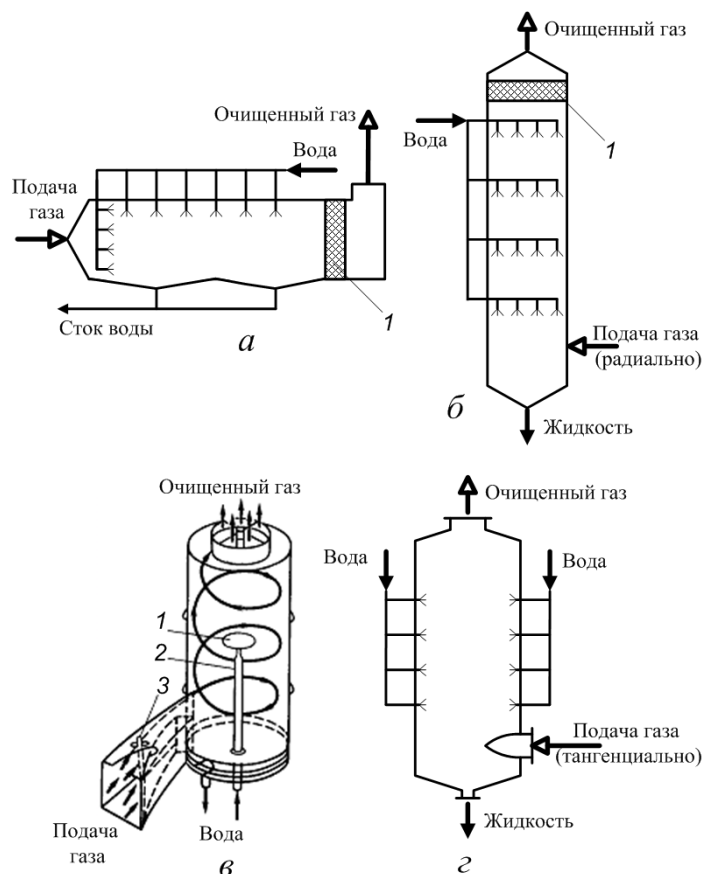


Рис. 1.50. Различные типы распыливающих колонн:

- а* – горизонтальная распыливающая камера; *б* – вертикальная распыливающая колонна; *1* – сепаратор; *в* – мокрый циклон Пиза-Энтони; *1* – пневматический распылитель, *2* – распыляющий патрубок, *3* – заслонка; *г* – циклонная колонна с внешними форсунками

Хотя теоретически возможные пределы в литературе не приводятся, имеются некоторые экспериментальные данные. Так, предельным является число единиц переноса, равное 5,8 в случае вертикальной колонны с разбрызгиванием (рис. 1.50 б) и 3,8 – для горизонтальной камеры с разбрызгиванием (рис. 1.50 а). Максимальное число единиц переноса для промышленной циклонной распыливающей колонны равно 7 (рис.1.50 г). При необходимости использования

большого числа единиц переноса практикуют последовательное соединение колонн.

Наличие дополнительных форсунок и высокая концентрация аэрозоля на входе в распыливающую колонну позволяют увеличить эффективность абсорбции.

### ***Другие абсорбционные аппараты***

В случае высоких нагрузок по загрязняющим твердым частицам и при необходимости улавливания, помимо газообразных загрязнений, также частиц субмикрометровых размеров обычно используют аппараты для мокрого улавливания, эффективно удаляющие твердые частицы и позволяющие абсорбировать также некоторое количество газа. Одним из универсальных устройств подобного рода является скруббер Вентури (рис. 1.17 в), однако его применение для абсорбции ограничено тем, что потоки газа и жидкости подаются параллельно. Максимальное число единиц переноса при абсорбции газа в скруббере Вентури равно 3. Мокрый электрофильтр для жидких аэрозолей также может быть использован для абсорбции и для эффективного удаления мелких частиц. Испытания в лабораторных условиях показали, что применение коронного разряда позволяет увеличить скорость массопереноса в процессе абсорбции, однако механизм этого явления пока неизвестен.

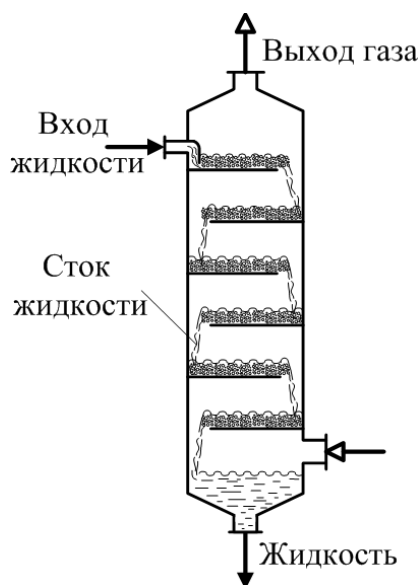


Рис. 1.51. Тарельчатая колонна с отражателями, используемая для абсорбции газов

Еще одним видом контактного аппарата является колонна с отражателями (рис. 1.51), применение которой целесообразно в тех случаях, когда имеются серьезные проблемы, связанные с образованием

накипи и забивкой оборудования. Газ, поднимающийся вверх по колонне, последовательно проходит через слои жидкости. При больших скоростях его подачи часть жидкости в виде капель переходит в аэрозоль, при этом площадь поверхности контакта увеличивается. Используются колонны с отражателями в виде сегментов, как показано на рисунке, а также колонны с круглыми и тороидальными отражателями, в которых газ проходит вверх через центральные отверстия, пересекая водяную завесу при каждом изменении направления движения. Массоперенос в таких аппаратах обычно недостаточен, а данных о конструкционных параметрах очень мало.

В некоторых европейских странах применяют абсорбцию газа в скрубберах с механической диспергацией жидкости (рис. 1.52). Во многих случаях газ подается в верхнюю часть камеры, наполовину заполненной жидкостью. Дисковые валы, движущиеся с высокой скоростью в горизонтальном направлении и частично погруженные в жидкость, предназначены для разбрызгивания капель жидкости в газовом пространстве.

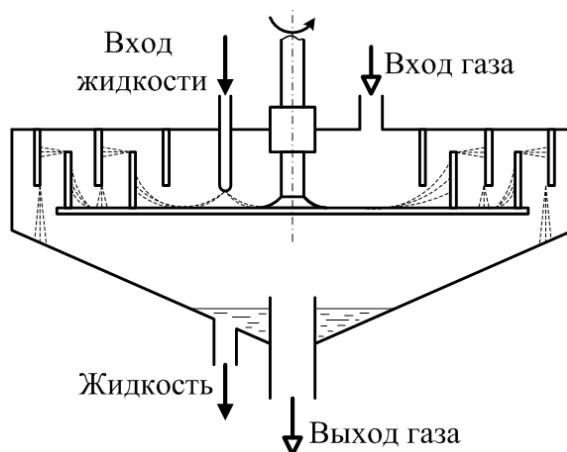


Рис. 1.52. Схема центробежного абсорбера для поглощения газа

Эффективность этого процесса может быть увеличена при замене плоских вращающихся дисков дисками с прорезями в радиальных направлениях. Разработаны и другие конструкции аппаратов, в которых абсорбирующая жидкость подается в центр горизонтального вращающегося диска. Диск имеет концентрические вращающиеся лопасти, расположенные между неподвижными лопастями, благодаря чему газ последовательно проходит через ряд аэрозольных систем. Данные о методах расчета емкости таких аппаратов очень немногочисленны.

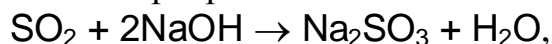
## Некоторые области применения абсорбции

Одной из основных областей применения абсорбции является удаление водорастворимых газообразных загрязнений из отходящих газов различных процессов; примерами таких загрязнений являются  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{H}_2\text{S}$ . Промывке топочных газов, образующихся при сжигании серосодержащего топлива, для удаления  $\text{SO}_2$  посвящено большое число исследований, проведены также испытания в промышленном масштабе. Из-за ограниченной растворимости  $\text{SO}_2$  в воде обычно применяют щелочную абсорбирующую жидкость, что позволяет нейтрализовать  $\text{SO}_2$  в абсорбирующей жидкой пленке, снизить давление паров  $\text{SO}_2$  и увеличить движущую силу. Однако, поскольку продукты сгорания содержат  $\text{CO}_2$ , в случае сильно щелочных растворов ( $\text{pH} > 9$ ) будут абсорбироваться большие количества  $\text{CO}_2$ , что приведет к повышенному расходу щелочи и твердых реагентов для удаления отходов. Обычно величину  $\text{pH}$  абсорбирующей жидкости на выходе газового потока поддерживают равной 8,0...8,5. Для поддержания в отработанной жидкости  $\text{pH} \geq 7$  соответствующим образом регулируют отношение скоростей жидкого и газового потоков. Чтобы движущая сила была максимальной, жидкость и газ направляют противотоком.

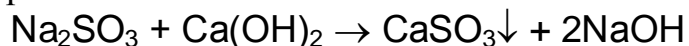
Насадочные и тарельчатые колонны, обеспечивающие наиболее эффективный контакт газа с жидкостью, являются оптимальными аппаратами для абсорбции в отсутствие твердых частиц (как присутствующих в газовом потоке, так и образующихся в результате реакции осаждения). Известь (а также известняк) – доступные и недорогие щелочные агенты – часто применяются для достижения требуемого  $\text{pH}$  абсорбирующей жидкости. В то же время многие соли кальция, такие, как сульфаты, сульфиты и фториды, имеют ограниченную растворимость. При использовании их растворов возможна забивка трубопроводов, форсунок, насадки и т. п., что представляет серьезную проблему в системах обессеривания топочных газов. Для абсорбции  $\text{HF}$  часто используют открытые распыливающие камеры, однако при обессеривании в этих аппаратах также возможны указанные трудности. Успешно был проведен процесс очистки в скрубберах Вентури и в турбулентных контактных аппаратах, в которых осадок, откладывающийся на полой псевдооживленной насадке, постоянно соскабливается.

Другим возможным решением проблемы забивки оборудования является использование в абсорберах хорошо растворимых щелочных агентов, например  $\text{NaOH}$ . Жидкость после стадии абсорбции обрабатывается известью в специальном реакторе, и смесь подается в отстойник; в результате такой обработки регенерируется  $\text{NaOH}$ ,

который возвращается в абсорбер. В системе протекают следующие химические реакции. В абсорбере



в нейтрализаторе-отстойнике



Иногда раствор продувают воздухом для окисления сульфита в сульфат.

Если образующийся при обработке продукт находит полезное применение, то необходимость в стадии регенерации отпадает. Так, процесс абсорбции  $\text{SO}_2$  гидроксидом или карбонатом натрия может оказаться экономически выгодным в тех случаях, когда образующиеся бисульфит или сульфит натрия находят применение на расположенных неподалеку бумагоделательных фабриках.

В процессе Коминко для абсорбции  $\text{SO}_2$  используют щелочной раствор соли аммония. При этом по мере необходимости могут быть получены бисульфит, сульфит, бисульфат или сульфат аммония. Газы, поступающие на промывку, на первой стадии контактируют с раствором, имеющим явно щелочную реакцию, в результате чего достигается полное удаление  $\text{SO}_2$ . На второй стадии газ проходит через скруббер с нейтральным или слабокислым раствором, чтобы предотвратить унос  $\text{NH}_3$  в атмосферу.

В другой абсорбционной системе, разработанной для удаления  $\text{SO}_2$  и прошедшей опытную проверку, используют  $\text{MgO}$  и промывку фосфатными, карбонатными или лимоннокислыми растворами.

При обработке абсорберов, в которых на начальных стадиях контакта используется вода, содержащая летучий нейтрализующий агент, необходимо учитывать, что он может взаимодействовать с газообразными загрязнениями в газовой фазе с образованием твердых продуктов реакции. В качестве примера можно упомянуть абсорбцию  $\text{NH}_3$  водой, подкисленной  $\text{HCl}$  или  $\text{HNO}_3$ , или абсорбцию  $\text{HCl}$  водой, содержащей  $\text{NH}_3$ . Газофазные реакции протекают в начале контактирования, они приводят к образованию дыма с частицами субмикрометровых размеров, которые плохо смачиваются и могут проходить через абсорбер, практически не улавливаясь. Для предотвращения этого явления необходимо соответствующим образом регулировать концентрации (давление пара) нейтрализующего агента в точках, где происходит первичный контакт. Можно рекомендовать использование чистой воды или очень малых концентраций нейтрализующего агента с последующим его добавлением к абсорбирующей жидкости по мере снижения парциального давления загрязняющего вещества в газовом потоке. Подобные проблемы становятся еще более серьезными в тех случаях, когда на очистку

подаются горячие газы, что может привести в начальный момент к испарению нейтрализующего агента. В этом случае поступающий газ желательнее предварительно охладить.

Хотя изменение  $pH$  водной фазы является наиболее распространенным методом при абсорбции газообразных загрязнений, возможно также использование других вспомогательных химических реагентов, природа которых определяется конкретными химическими свойствами системы. Для удаления следов органических соединений, в том числе в таких количествах, которые определяются только по запаху, к водному раствору добавляют окислители. Типичные промывные растворы могут содержать  $KMnO_4$ ,  $NaClO_4$ ,  $NaClO$ ,  $HNO_3$  и  $H_2O_2$ . В тех случаях, когда необходимо использование восстановителей, можно рекомендовать  $Na_2SO_3$ . В некоторых случаях очень эффективны концентрированные растворы неорганических соединений; примером может служить удаление олефинов с использованием  $H_2SO_4$ .

При абсорбции  $NO_2$  серьезные проблемы связаны с тем, что из каждых 3 молей диоксида, поглощенных водой, образуется, наряду с азотной кислотой, 1 моль  $NO$ . Последний необходимо вновь окислять до  $NO_2$  (реакция протекает с малой скоростью) и снова подавать на абсорбцию. При уменьшении концентраций оксида азота общая скорость процесса снижается. При практическом осуществлении абсорбции в насадочных и в тарельчатых колоннах полное удаление никогда не достигается и выбрасываемые в атмосферу газы часто имеют коричневую окраску. Полной очистки можно достичь путем дополнительного промывания щелочью, однако удаление образующихся при этом продуктов связано с очень большими трудностями. Серная кислота хорошо поглощает  $NO_x$ , однако и в этом случае возникает проблема утилизации или удаления отработанных растворов. Предложено проводить абсорбцию  $NO_2$  отогнанной азотной кислотой с использованием каталитической насадки, на которой происходит окисление образующегося  $NO$ .

Пары органических соединений, не растворимых в воде, обычно абсорбируют органическими малолетучими жидкостями. На практике используют процессы удаления  $H_2S$  и кислых продуктов для очистки углеводородных газов, основанные на абсорбции органическими аминами.

### **Транспортировка, утилизация и удаление материалов, образующихся в результате очистки методом абсорбции**

В результате удаления газообразных загрязнителей путем абсорбции происходит переход этих загрязнителей в раствор, как правило, весьма разбавленный. Чтобы избежать проблем, связанных с



удалением таких растворов, желательно их каким-либо образом утилизировать. Если загрязняющее вещество абсорбируется в чистом виде (не реагируя с другими химическими веществами), его практически всегда можно получить в концентрированной форме путем отгонки абсорбирующей жидкости. Полученный таким образом материал в принципе может быть использован в том же самом производственном процессе или в других процессах. Иногда в результате перевода в другую форму этот материал может служить исходным сырьем для промышленных предприятий или использоваться жителями близлежащих районов. После нейтрализации уловленного вещества возможны его осаждение или концентрирование в растворе, а также сушка с получением продукта, имеющего определенную товарную ценность, пусть даже достаточную только для того, чтобы покрыть расходы на транспортировку. Выделенные сульфат и сульфит натрия (в жидком и в твердом виде) могут найти применение на бумажных фабриках. В результате их реакции с аммиаком можно получить удобрения.

При обработке известью или другими реагентами загрязняющие вещества могут быть выделены из абсорбционного раствора в виде нерастворимого осадка. Этот осадок концентрируют путем отстаивания, а затем из него удаляют воду фильтрацией или центрифугированием. Однако во многих случаях осадки после обезвоживания содержат не более 30...50 % твердых веществ, что создает серьезные проблемы при их удалении. Сброс в водоемы, как правило, запрещен или трудно осуществим. Для сброса отходов можно использовать свободные земельные участки, однако при этом следует учитывать возможность вредных последствий для окружающей среды, к которым приведет такой метод в будущем. Кроме того, после закапывания осадков в землю данные участки могут оказаться непригодными для строительства, поскольку сопротивление грунта нагрузке снижается.

Серьезную проблему представляет выделение хлоридов, нитратов и нитритов, поскольку их осаждение – дорогостоящий процесс. В некоторых районах практиковалась закачка в скважины, однако можно предполагать, что в будущем она будет запрещена. То же самое можно сказать и о захоронении отходов в море. В случае хлоридов необходимо учитывать возможность их очистки и использования в качестве сырья для получения хлора. Нитрит можно окислить в нитраты и после концентрирования использовать в качестве компонента удобрений.

В случае органических загрязнителей наиболее эффективной, по-видимому, является отгонка и выделение вещества в концентрированном виде, даже в тех случаях, когда выделяемый материал может быть использован только в качестве топлива. Если

органическое соединение растворимо в воде и способно подвергаться биологическому разрушению, то более экономичной может оказаться однократная абсорбция водой с последующим биологическим разложением, особенно в тех случаях, когда образующиеся растворы сильно разбавлены и отгонка малоэффективна. Граничное значение концентрации загрязнителя в обрабатываемом газе, при котором целесообразно переходить от отгонки к биологическому разрушению, обычно составляет  $100...300 \text{ млн}^{-1}$  (по объему).

Помимо отгонки, существуют и другие методы регенерации отработанного абсорбционного раствора. К ним относится обработка озоном и другими окислителями ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HClO}$ ,  $\text{KhlO}_4$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  и др.), гидролиз (возможен при высоких температурах и давлениях), обработка другими реагентами, в результате которой получают:

- нетоксичные отходы;
- несмешивающиеся продукты, которые можно отделить отстаиванием;
- нерастворимые осадки.

Можно использовать также адсорбцию органических веществ глинами, древесным углем, опилками и смолами; экстракцию растворителями; обработку твердыми или жидкими ионообменными материалами; охлаждение абсорбционного раствора, приводящее к кристаллизации загрязнения.

Для однократной абсорбции иногда применяют воду, однако использование для этой цели органических жидкостей возможно только в очень редких, специальных случаях. Если такая возможность представляется, ею пренебрегать не следует. Примером может служить использование в качестве абсорбента органического сырья или топливных нефтей, которые после абсорбции непосредственно направляются на переработку или на сжигание.

### **Абсорбция на твердых материалах**

Газообразные загрязнения могут быть удалены с помощью твердых абсорбентов, так, например, удаляется  $\text{H}_2\text{S}$  при прохождении через слой гранулированного оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В процессе обработки оксид сульфидируется, и через некоторое время его регенерируют, обрабатывая воздухом. Оксид цинка также был использован для удаления серы. Проводилось также гидрирование органических серосодержащих соединений на твердых катализаторах, содержащих сульфиды кобальта, никеля и молибдена, в результате чего достигалось выделение серы из органической молекулы. Большинство из этих процессов известны достаточно давно. Обычно используются неподвижные слои материала, хотя описано и применение оживленного

слоя оксида железа. Эффективность реакций, как правило, невелика, что связано с недостаточно большими площадями поверхности твердых материалов. В настоящее время специалисты-технологи рассматривают подобные методы как устаревшие и малоэффективные. Однако при интенсивной разработке процессов газификации и ожижения угля эти методы снова могут приобрести практическое значение, поскольку следует ожидать, что будут разработаны твердые абсорбенты с большой площадью поверхности, пригодные для использования в ожиженных и в движущихся слоях.

В последнее время были предприняты попытки использовать твердую известь и известняк для обессеривания топочных газов. Однако в этих экспериментах степень удаления  $\text{SO}_2$  редко превышала 50...60 %. Намного более эффективное удаление  $\text{SO}_2$  было достигнуто при использовании жидких суспензий, что привело к прекращению работ с твердыми материалами.

#### **1.4.4. Адсорбция**

Силы притяжения, существующие между атомами, молекулами и ионами в твердом состоянии, позволяют частицам, находящимся на поверхности, притягивать и удерживать другие вещества – газы и жидкости. Это явление и называется *адсорбцией*. Если твердое вещество является высокопористым, с большим размером пор и развитой микроструктурой, то для него характерна высокая адсорбционная способность.

Адсорбируемая молекула газа задерживается на твердой поверхности, причем этот процесс сопровождается выделением тепла в количестве, часто близком к величине теплоты конденсации. Адсорбция всегда является экзотермическим процессом. *Десорбция* – обратный процесс, и для ее протекания необходима затрата энергии. Отвод тепла, связанного с выделением энергии, способствует протеканию адсорбции и повышает адсорбционную способность твердого вещества. Следовательно, при осуществлении адсорбции желательно охлаждение слоя адсорбента или предварительное охлаждение подаваемого газа.

Многие адсорбционные процессы являются необратимыми, т. е. десорбция адсорбированного вещества может быть осуществлена только при удалении некоторого количества твердого адсорбента. Такие адсорбционные процессы называют *хемосорбцией*. Так, например, кислород настолько сильно адсорбируется на активированном угле, что удалить его с поверхности можно только в виде  $\text{CO}$  или  $\text{CO}_2$ . Адсорбирующее твердое вещество называется *адсорбентом*, или *сорбентом*, а адсорбируемый материал – *адсорбатом*, или *сорбатом*.

## Типы адсорбентов

Практически важными сорбентами являются *активированный уголь*, простые или сложные *оксиды* и *импрегнированные сорбенты*. В состав активированного угля в основном входят нейтральные атомы, и электрический градиент между молекулами отсутствует. В связи с этим здесь нет градиента потенциалов, позволяющего притягивать и ориентировать полярные молекулы более эффективно, чем неполярные. Таким образом, уголь является эффективным адсорбентом для улавливания органических соединений из влажных газовых потоков. Поскольку взаимное притяжение полярных молекул воды столь же сильно, как и их притяжение к поверхности нейтрального угля, селективность адсорбента в отношении органических молекул несколько повышается. Однако некоторое количество воды также адсорбируется, особенно если парциальное давление ее паров выше, чем паров органического вещества; в этом случае адсорбцию воды следует учитывать при проектировании. Уголь обладает меньшей селективностью, чем другие сорбенты, и является одним из немногих адсорбентов, пригодных для работы во влажных газовых потоках. Основными источниками активированного угля являются скорлупа кокосового и других видов орехов, фруктовые косточки, битуминозные угли, твердая древесина, а также кокс и остатки процесса нефтепереработки.

Оксидные адсорбенты характеризуются неомогенным распределением заряда, они полярны. Эти адсорбенты обладают значительно более высокой селективностью, чем уголь, по отношению к полярным молекулам. В связи с этим они находят применение для удаления твердых частиц из газовых потоков. Их недостатком является снижение эффективности в присутствии влаги. Большинство из этих адсорбентов – прекрасные осушители.

К классу кремнийсодержащих адсорбентов относятся такие оксидные адсорбенты, как силикагели, отбеливающие и диатомитовые земли, синтетические цеолиты, или молекулярные сита. Их адсорбционная способность изменяется в весьма широком интервале, причем максимальные значения близки к величинам, характерным для активированного угля. Синтетические цеолиты могут быть получены с заданными размерами пор, что позволяет осуществлять специфическую адсорбцию молекул определенного размера и формы. Однако даже с помощью этого приема не удастся преодолеть склонность цеолитов предпочтительно адсорбировать полярные молекулы, вследствие чего при наличии молекул воды они не поглощают органические молекулы, даже те, размеры которых соответствуют пористой структуре адсорбента. Такие металлоксидные адсорбенты, как активированный

оксид алюминия, еще более полярны, чем оксиды кремния, и их редко применяют для удаления загрязнений.

Импregnированные сорбенты можно разделить на три больших группы:

- 1) сорбенты, в которых пропитка представляет собой химический реагент;
- 2) сорбенты, в которых пропитка действует как катализатор непрерывного окисления или разложения загрязнителей;
- 3) сорбенты, в которых пропитка лишь периодически действует как катализатор.

Реакционноспособные пропитки в результате химической реакции превращают загрязнитель в безвредный адсорбируемый продукт. Углерод можно модифицировать 10...20 % (по массе) брома, реагирующего с олефинами. Его применение особенно эффективно для удаления примесей этилена из воздушных потоков, обычно этилен плохо адсорбируется вследствие низкой молекулярной массы. При контакте с поверхностью, содержащей бром, этилен превращается в 1,2-дибромэтан, который хорошо адсорбируется. По мере расходования свободного брома система теряет свою эффективность и адсорбент должен быть заменен или регенерирован. Другими примерами модифицирования химическими реагентами являются использование иода для улавливания паров ртути, ацетата свинца для улавливания сероводорода и силиката натрия – для фтористого водорода. Каталитические пропитки непрерывного действия катализируют только реакции, которые могут происходить между загрязнителем и газом-носителем, в котором он находится. Если в качестве адсорбента используется уголь, необходимо принимать дополнительные меры, чтобы предотвратить окисление самого адсорбента. Катализаторы с высокой окислительной способностью могут вызвать самовоспламенение угля. В случае более полярных адсорбентов возможны ограничения в использовании катализаторов, связанные с высокой полярностью. Известно применение каталитических пропиток непрерывного действия на угле; в их состав входят хром, медь, серебро, палладий и платина. В процессе пропитки происходит разложение комплексных солей, нанесенных на адсорбент. Такие материалы использовались для разрушения при обычных температурах легко окисляющихся загрязнителей, а также некоторых отравляющих веществ (хлорпикрина, льюизита). Разработка катализаторов – переносчиков кислорода – открывает новые возможности для приготовления модифицированных адсорбентов, позволяя проводить окисление загрязняющих веществ в газе-носителе, не содержащем кислорода.

Адсорбент с катализатором окисления через определенные промежутки времени необходимо регенерировать путем продувки воздухом.

В случае каталитических пропиток периодического действия сначала происходит обычная физическая адсорбция загрязнителей. На второй стадии повышают температуру, что приводит к активации катализатора и окислению сорбата. При использовании в качестве адсорбента угля необходимо принимать меры предосторожности, исключая его самовоспламенение. В работе описано применение пропиток из оксидов хрома, молибдена и вольфрама, работающих подобным образом.

Адсорбенты, используемые для обработки газов в стационарных слоях, обычно гранулируются, причем их размеры выбирают таким образом, чтобы сопротивление газовому потоку было минимальным. На рис. 1.53 представлена зависимость перепада давлений от величины

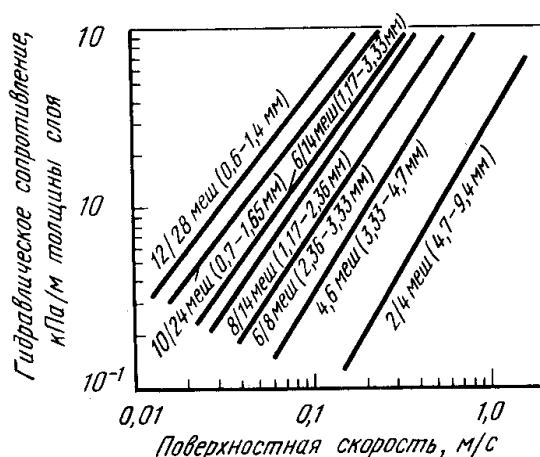


Рис. 1.53. Гидравлическое сопротивление сухих слоев гранулированного угля.

поверхностной скорости для гранулированного угля с гранулами разных размеров (поток воздуха направлен сверху вниз; давление 100 кПа, температура 294 К. Цифры у кривых – величина фракции, мм). Для оживленных и движущихся адсорбционных слоев важное значение имеет и твердость частиц адсорбента, поскольку в этих случаях желательно по возможности уменьшить истирание адсорбента и снизить расходы, связанные с введением дополнительных его количеств.

### Принципы разработки адсорбционных систем

Ниже перечислены факторы, определяющие емкость адсорбционного слоя:

- 1) концентрация адсорбата в каналах адсорбционного слоя;
- 2) общая площадь поверхности адсорбента;

- 3) относительная концентрация молекул, адсорбирующихся наиболее эффективно;
- 4) температура газа и адсорбционного слоя (чем ниже, тем лучше);
- 5) характеристики молекул адсорбата (молекулярная масса, полярность, химическая активность, размер и форма);
- 6) пористая микроструктура адсорбента (размеры и форма);
- 7) химическая активность адсорбента (полярность и реакционная способность).

Скорость адсорбции зависит от величины парциального давления сорбата, скорости его диффузии в поры сорбента и от степени насыщения слоя. При разработке адсорбционных систем необходимо учитывать следующие основные принципы:

- 1) достаточное время контакта между газовым потоком и слоем сорбента, позволяющее обеспечить необходимую эффективность очистки (малые поверхностные скорости и соответствующую высоту слоя);
- 2) достаточная емкость адсорбента, обеспечивающая возможно более длительный срок службы;
- 3) возможно более низкое сопротивление газовому потоку для снижения энергетических расходов;
- 4) равномерное распределение воздушного потока, обеспечивающее полное использование сорбента;
- 5) либо проведение, в случае необходимости, предварительной обработки для удаления твердых частиц, мешающих газообразным примесей или веществ, которые нельзя десорбировать, либо предварительное охлаждение газов;
- 6) обеспечение возможности регенерации или замены отработанного насыщенного сорбента.

Процесс удаления загрязняющего вещества из газа-носителя в слое адсорбента может быть описан с помощью «адсорбционной волны», показанной на рис. 1.54. Кривая 1 характеризует зависимость концентрации загрязнителя от положения слоя для свежего адсорбента, а штриховая горизонтальная линия  $C_0$  – максимально допустимую концентрацию загрязнителя в газовых выбросах после адсорбционной обработки. При правильной конструкции адсорбера выходные концентрации намного ниже этого значения. В процессе работы на входе в адсорбционный слой начинается насыщение и загрязнители начинают проникать дальше в глубину слоя, где происходит их эффективная адсорбция (кривая 2). Наконец, в тех случаях, когда достигается максимально допустимая концентрация на выходе из слоя (кривая 3), адсорбент необходимо регенерировать.

Как было сказано выше, адсорбция представляет собой экзотермический процесс, а адсорбционная емкость снижается при повышении температуры. В связи с этим желательно проводить

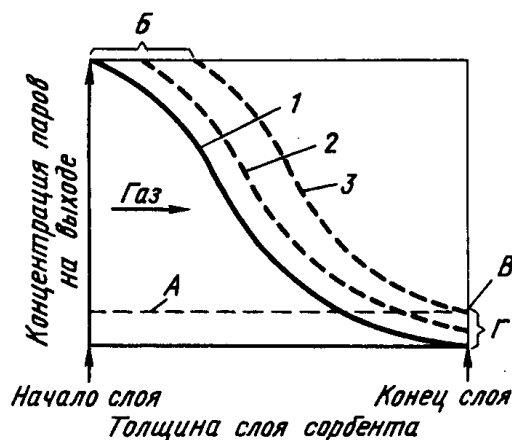


Рис. 1.54. Движение адсорбционной волны по стационарному слою при осуществлении цикла адсорбции:

1 - начало цикла, свежий сорбент, 2 - частично насыщенный сорбент, 3 - конец цикла; А - максимально допустимая концентрация загрязнителя на выходе, В - полностью насыщенный сорбент, В – проскок, Г - направление газового потока

охлаждение адсорбционного слоя. В некоторых случаях использовались охлаждающие трубы, проходящие через стационарные слои, однако, как правило, теплопередача происходит только на очень малые расстояния. Часто применяют предварительное охлаждение обрабатываемого газа. Используют также удаление паров, адсорбирующихся наиболее эффективно, например паров воды, которые уменьшают емкость адсорбционного слоя.

### **Десорбция, или удаление адсорбированных продуктов**

Одним из путей удаления адсорбированных загрязнителей является полная замена адсорбента с направлением отработанного материала в отходы. Такой путь возможен в тех случаях, когда количество адсорбата невелико или процесс замены производится достаточно редко. Стоимость свежего адсорбента невелика по сравнению со стоимостью процесса регенерации с учетом трудовых затрат. Адсорбент может находиться на бумажном носителе или во вставной гильзе. Удаляемый материал может быть вывезен на свалку, однако, в тех случаях, когда адсорбированное вещество токсично или канцерогенно и может растворяться в воде, а также при использовании угля в качестве адсорбента, предпочтительно отработанный материал сжигать.



Как правило, возможность регенерации адсорбента и выделения адсорбированного загрязнения определяется экономическими соображениями. Для осуществления десорбции применяют следующие приемы:

- 1) нагревание адсорбента;
- 2) вакуумирование адсорбента;
- 3) продувку инертным газом;
- 4) вытеснение сорбата более легко адсорбирующимся материалом;
- 5) комбинация двух или более указанных методов.

Нагревание распространено наиболее широко, оно позволяет получать сорбат в концентрированном виде, а в некоторых случаях и в виде, пригодном для повторного использования. При повышении температуры адсорбента до величины, равной температуре кипения сорбата при атмосферном давлении, начинается выкипание вещества, пары которого конденсируют. Если повышение температуры до такого значения приводит к разложению вещества, то дополнительно можно применить частичное вакуумирование. При использовании только вакуумирования степень десорбции не столь высока, как при нагревании. Кроме того, в этом случае для конденсации десорбированного продукта могут потребоваться более эффективные холодильники или окажется необходимой конденсация при сжатии.

Продувка газом, инертным относительно адсорбционного процесса (например, воздухом или азотом), имеет тот недостаток, что десорбируемое вещество снова оказывается распределенным в газовой фазе. Однако в определённых ситуациях применение этого метода целесообразно. Для концентрирования загрязняющих веществ, присутствующих в очень малых концентрациях, может быть использована абсорбция. При продувке воздухом образующийся при десорбции газовый поток может быть непосредственно направлен на сжигание.

Обработка угольного адсорбента водяным паром представляет собой метод регенерации, основанный на вытеснении. Водяной пар адсорбируется, вытесняя молекулы адсорбата, который имеет более низкое равновесное парциальное давление. Десорбированные загрязнения конденсируются вместе с избытком водяного пара. После насыщения адсорбента паром необходима регенерация для удаления воды; ее проводят продуванием горячего воздуха. Обработка водяным паром фактически представляет собой комбинацию методов. Хотя основной движущей силой десорбции является вытеснение, пар одновременно повышает температуру адсорбента, а его избыток выполняет роль инертного газа, используемого для продувки.

В процессе регенерации никогда не достигается абсолютно полная десорбция, поэтому необходимо предусматривать некоторый избыток адсорбционной емкости, компенсирующий ее потерю за несколько циклов регенерации. При регенерации могут возникать и другие проблемы, которые нужно предусматривать при выборе метода обработки.

Некоторые органические соединения, в частности, мономеры, например пары стирола, в процессе регенерации могут полимеризоваться в порах адсорбента, что делает его непригодным для дальнейшего использования. При высоких температурах регенерации возможен распад органических соединений, в результате чего сорбент покрывается смолой и сажей и также становится неактивным.

В таких случаях следует использовать другие методы десорбции, или работать при умеренных температурах и пониженных давлениях, или проводить обработку водяным паром; возможна также регенерация дезактивированного адсорбента в окислительной атмосфере печи. В таких печах в контролируемых условиях органические материалы выжигают с поверхности и из пор сорбента. Во многих случаях обработку осуществляют предприятия-изготовители адсорбента.

В результате хемосорбции сорбат связывается настолько прочно, что десорбция возможна только при удалении некоторого количества самого сорбента. В большинстве случаев регенерация проводится в специальных условиях. Примером может служить регенерация активированного угля, используемого для удаления  $\text{SO}_2$ , продувкой воздухом. Часть  $\text{SO}_2$  постоянно накапливается на сорбенте в виде серной кислоты. Ее десорбируют, нагревая до  $370^\circ\text{C}$  в инертной атмосфере, в результате чего кислота реагирует с углем, образуя  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ .

### **Типы оборудования для адсорбции**

По способу организации процесса адсорбции аппараты могут быть разделены на две группы: адсорберы периодического и непрерывного действия. Если адсорбент находится в аппарате в неподвижном состоянии, то после достижения определенной (заданной) степени насыщения его необходимо заменить или регенерировать (десорбировать). На время замены или регенерации процесс адсорбции прерывается. В аппаратах с подвижным адсорбентом можно организовать постоянную замену его части в одном адсорбере, не прекращая подачу загрязненных газов.

Существует пять различных типов аппаратуры для проведения адсорбции газов:

- 1) сменные контейнеры;

- 2) аппараты с постоянными регенерируемыми слоями (рис. 1.55, 1.56 а);

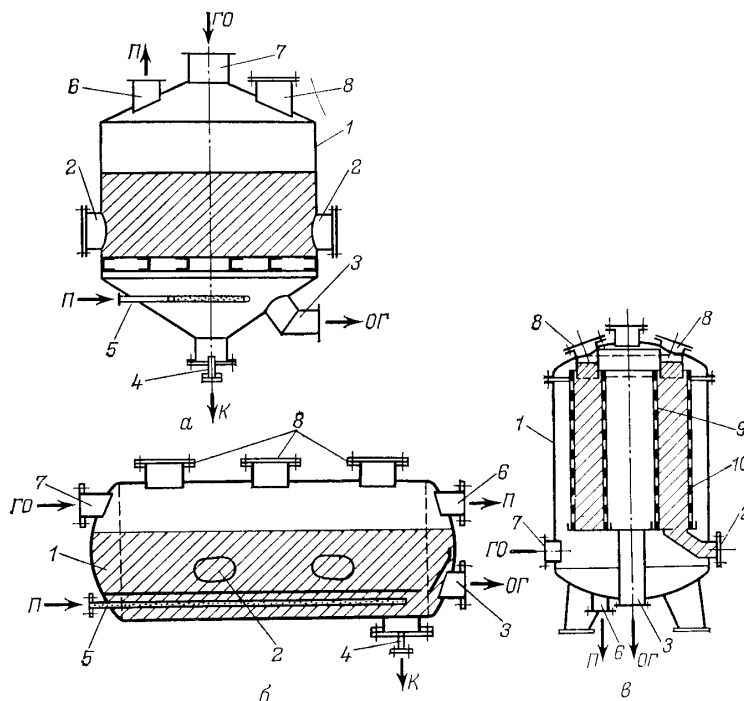


Рис.1.55. Адсорберы периодического действия с неподвижным вертикальным (а), горизонтальным (б) и кольцевым (в) слоем адсорбента:  
 1 - корпус; 2 - люки для выгрузки адсорбента; 3 - штуцер для вывода очищенного газа; 4 - штуцер для отвода конденсата; 5 - барботер для подачи острого пара при десорбции; б - штуцер для отвода паров при десорбции; 7 - штуцер для подачи газа; 8 - люки для загрузки адсорбента; 9, 10 - внутренняя и внешняя цилиндрические решетки соответственно

- 3) адсорберы с движущимся адсорбентом;  
 4) адсорберы с ожиженным слоем (рис. 1.56 б);  
 5) камеры для хроматографической очистки газов.

### Некоторые области применения адсорбции

Наиболее широкое применение методы адсорбции находят в тех случаях, когда необходимо снизить содержание загрязняющих веществ до очень низких, следовых значений (от миллиардных долей до нескольких миллионных долей). Многие загрязнители с сильным запахом обнаруживаются уже при содержаниях порядка  $100 \text{ млрд}^{-1}$ ; для полного удаления запаха концентрация загрязняющего вещества должна быть снижена до более низких значений, чего невозможно достичь, применяя большинство других методов обработки. Подобные задачи возникают в пищевой промышленности (удаление запахов при консервировании, обжиге кофе, переработке рыбы, вытапливании сала, ферментации, жарении и выпечке), в химической и перерабатывающей

промышленности (в частности, в производстве клея и при переработке природных материалов, таких, как кровь и железы, при дублении, в производстве бумаги), а также при осуществлении других процессов, например: в литейном производстве, при нанесении лакокрасочных и других покрытий, а также в лабораториях, где проводятся эксперименты на животных.

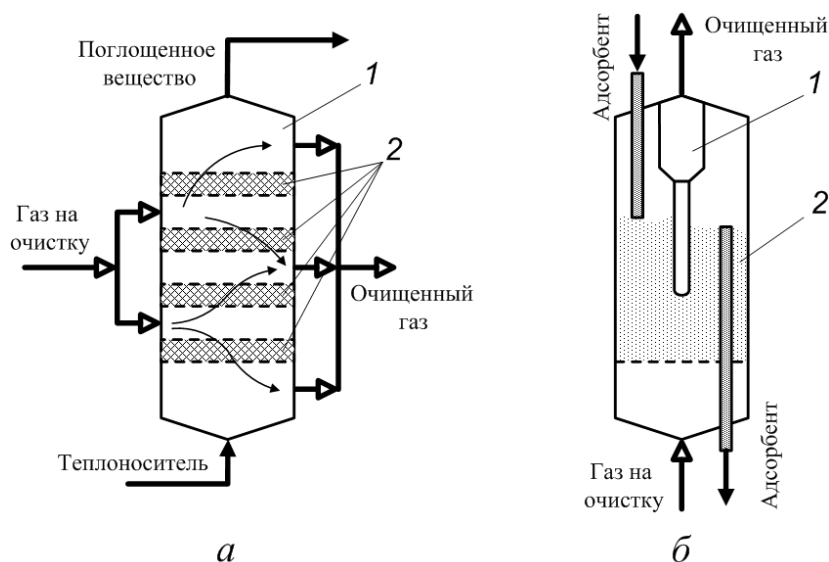


Рис. 1.56. Конструкции адсорберов:

- а - полочный многосекционный адсорбер с неподвижными слоями адсорбента: 1 - корпус, 2 - слои адсорбента; б - однокамерный адсорбер с кипящим слоем поглотителя: 1 - корпус аппарата, 2 - циклонное устройство

Адсорбция менее эффективна при необходимости удаления больших концентраций загрязняющих веществ, поскольку при этом необходима большая адсорбционная емкость или большое количество адсорбента. В тех случаях, когда концентрации загрязнений невелики и обработке подвергается большое количество воздуха, адсорбция может оказаться очень эффективной для удаления летучих углеводородов и органических растворителей. Наиболее целесообразно использовать этот метод для удаления паров ядовитых веществ и предполагаемых канцерогенов в тех случаях, когда содержание примесей должно быть снижено до нескольких миллионных долей или ниже.

Широкое применение находит адсорбция для удаления паров растворителя из отработанного воздуха при окраске автомобилей, органических смол и паров растворителя в системе вентиляции предприятий по производству стекловолокна и стеклоткани, а также паров эфира, ацетона и других растворителей в производстве нитроцеллюлозы и бездымного пороха. Адсорбенты используются для очистки выхлопных газов автомобилей и для удаления ядовитых компонентов, например  $H_2S$  из газовых потоков, выбрасываемых в

атмосферу через лабораторные вытяжные шкафы. Адсорбция применяется и для удаления радиоактивных газов при эксплуатации ядерных реакторов, в частности, радона и радиоактивного йода.

Адсорбция находит применение и в тех случаях, когда необходимо более или менее избирательное удаление определенных газообразных компонентов из смеси. Помимо использования для осушки газов, модифицированные адсорбенты имеют и другие области применения, связанные с их селективностью, например, для удаления этилена из отходящих газов. Молекулярные сита использовались для удаления паров ртути на предприятиях по производству хлора и щелочи, где применяются электролизеры с ртутным электродом. Адсорбцию можно применять для удаления неорганических загрязнений из топочных газов. Подобные методы были осуществлены на пилотных установках, однако не нашли промышленного применения.

### **Адсорбционное концентрирование перед дожиганием**

В некоторых случаях, в частности при обработке горючих газов, для разрушения токсичных органических веществ может быть использовано дожигание, однако применение этого метода затруднено тем, что концентрации органических примесей, распределенных в большом объеме воздуха, очень низки. Для того чтобы нагреть такие большие количества воздуха до температур, при которых проводится дожигание, расходуется очень большое количество энергии, даже при использовании специальной аппаратуры, обеспечивающей усиленный теплообмен в газовой фазе. Экономичность процесса дожигания может быть значительно повышена благодаря адсорбционному концентрированию загрязнений перед дожиганием. Наибольший экономический эффект достигается в тех случаях, когда объемная концентрация загрязнителей составляет  $20 \dots 100 \text{ млн}^{-1}$ , хотя метод остается эффективным и при концентрациях до  $300 \text{ млн}^{-1}$ . Обработываемые газы пропускают через слой адсорбента обычным образом, а насыщенный адсорбент продувают воздухом, который затем поступает на дожигание. Такой метод позволяет повысить концентрацию загрязнителя в 40 раз.

### **Транспортировка, утилизация и удаление выделенных материалов**

Проблема утилизации или удаления материала, выделенного при адсорбционной очистке, в значительной степени связана с пригодностью этого материала для повторного использования в процессе, однако определенную роль может играть и выбор метода десорбции, применяемого для регенерации отработанного сорбента. Если выделенное вещество может быть использовано в процессе

производства, то оптимальными методами десорбции могут быть простое нагревание или нагревание при частичном вакуумировании, поскольку загрязнитель при выкипании образует концентрированный пар; при конденсации пара образуется концентрированный раствор, который может быть возвращен в процесс. Если одновременно выделяется несколько загрязнителей, например, смесь паров растворителей, и эта смесь не может быть утилизирована как таковая, то необходимо дополнительное разделение, например путем дистилляции. Поскольку адсорбцию часто используют для выделения органических загрязнителей, то во многих случаях выделенный материал можно использовать в качестве топлива или добавки к топливу, если он не находит другого применения. При сжигании замещенных углеводородов необходимо принимать во внимание, что возможно образование продуктов, вызывающих коррозию или наносящих вред окружающей среде.

Для десорбции часто используют обработку водяным паром. В случае органических материалов, хорошо растворимых в воде, применение этого метода связано с трудностями, поскольку требуется проведение дополнительного разделения водного конденсата и органических продуктов. Даже в тех случаях, когда растворимость органических продуктов незначительна и разделение осуществляется простой декантацией несмешивающейся фазы, необходимо принять во внимание проблемы, связанные с удалением получаемых водных растворов. Если их объемы невелики, а растворенные органические вещества подвергаются биологическому разложению, приемлемым вариантом может быть обычная обработка в канализационных сооружениях. Однако при наличии устойчивых органических соединений или в случае больших количеств водных растворов желателен отказ от данного метода десорбции.

Десорбция путем продувания инертного газа, за исключением процесса адсорбционного концентрирования с последующим сжиганием газа, как правило, создает проблем больше, чем решает, поскольку загрязняющее вещество в этом случае снова оказывается диспергированным в газовом потоке.

#### **1.4.5. Конденсация**

Конденсация может быть применена для обработки систем, содержащих пары веществ, при температурах, достаточно близких к их точке росы. Этот метод наиболее эффективен в случае углеводородов и других органических соединений, имеющих достаточно высокие температуры кипения при обычных условиях и присутствующих в газовой фазе в относительно высоких концентрациях. Для удаления

загрязнителей, имеющих достаточно низкое давление пара при обычных температурах, можно с успехом использовать конденсаторы с водяным и воздушным охлаждением. Для несколько более летучих растворителей возможна двухстадийная конденсация с использованием водяного охлаждения на первой стадии и низкотемпературного охлаждения – на второй. Замораживание до очень низких температур только с целью удаления загрязнителей редко является целесообразным; если в замораживании нет необходимости по каким-либо другим технологическим причинам, то для удаления загрязнителей с большей эффективностью могут быть применены другие методы. Максимальное снижение содержания инертных или неконденсирующихся газов в обрабатываемой смеси позволяет облегчить проведение процесса конденсации и повысить ее экономическую эффективность, поскольку дает возможность исключить необходимость охлаждения до очень низких температур, соответствующих точке росы.

Конденсацию нельзя рассматривать как практичный метод в тех случаях, когда необходимо удаление достаточно летучих опасных или ядовитых органических соединений, присутствующих в значительных количествах в потоках неконденсирующихся газов, особенно если объемная концентрация загрязнителей после обработки должна составлять всего лишь несколько миллионных долей. В то же время конденсация может быть применена для предварительной обработки, при которой выделяются ценные растворители и уменьшается количество загрязнителей перед последующей стадией обработки. Парциальная конденсация может найти применение, в частности, в тех случаях, когда обработанный газ не выбрасывается, а снова возвращается в процесс или используется в процессе дожигания (оставшиеся в нем загрязнители при этом сгорают). Предварительная обработка конденсацией целесообразна и в тех случаях, когда перед основной обработкой газовый поток необходимо охладить, например, при осуществлении адсорбции.

### **Типы используемого оборудования**

Конденсацию можно проводить при непосредственном контакте или косвенном охлаждении. В первом случае охлаждаемый пар непосредственно контактирует с охлажденной или с замороженной жидкостью. При косвенном охлаждении используется поверхностный конденсатор с металлическими трубками. Трубки охлаждаются жидким хладагентом с другой стороны стенки. В случае неконденсирующихся газов желательно проводить их сжатие перед охлаждением, что позволяет достичь эквивалентного парциального давления загрязняющего вещества при более высоких температурах. В то же

время сжатие газов только для целей удаления загрязнителей, если отсутствуют какие-либо другие технологические соображения, редко целесообразно.

Когда для достижения точки росы какого-либо конкретного загрязнителя требуется создание низких температур, необходимо принимать во внимание, что в системе могут присутствовать соединения, которые при таких температурах переходят в твердое состояние. Примером таких соединений может служить водяной пар, содержащийся в газовом потоке, загрязненном низкокипящим органическим растворителем, для удаления которого необходима конденсация при температурах ниже 273 К. Образование льда на поверхности конденсатора может привести к его повреждению. В данном случае предпочтительно использовать конденсатор с непосредственным контактом, проводя обработку с помощью жидкого антифриза.

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. В каких случаях применяют очистку газовых выбросов методами абсорбции, адсорбции и конденсации?
2. Что влияет на эффективность очистки газовых выбросов методами абсорбции, адсорбции и конденсации?
3. Что такое водная и неводная абсорбция?
4. Охарактеризуйте систему абсорбционной очистки газовых выбросов.
5. Назовите наиболее известные виды адсорбентов.
6. Опишите устройство и принцип работы адсорбционной установки.
7. Как происходит регенерация отработанных адсорбентов?
8. Как происходит утилизации или удаления уловленных продуктов?
9. Какое оборудование используется при конденсационной очистке газовых выбросов?



### **1.5. Очистка газов дожиганием**

Дожигание представляет собой метод очистки газов путем термического окисления углеводородных компонентов до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .



Это определение полностью может быть отнесено и к жидким отходам. В ходе процесса другие компоненты газовой смеси, например, галоген- и серосодержащие органические соединения, также претерпевают химические изменения и в новой форме могут эффективно удаляться или извлекаться из газовых потоков. С точки зрения охраны окружающей среды очистка газов методом дожигания обеспечивает требуемую чистоту выбросов в атмосферу с минимальным содержанием непрореагировавших углеводородов, оксидов азота и серы, галогенов и других органических соединений. В данной главе рассматривается практическое использование метода термического окисления для эффективного контроля за чистотой газовых выбросов; основное внимание уделено использованию теоретических положений в конкретной практике инженерного проектирования.

### **1.5.1. Основные положения**

С наступлением в промышленности «века углеводородов» проблема очистки газовых выбросов и жидких органических стоков, содержащих углеводороды, стала весьма важной во всем мире. Процессы очистки включают химические (термическое окисление, абсорбцию) и физические (адсорбцию, электростатическое осаждение) методы, которые широко обсуждаются в этой книге.

С экономической точки зрения очистка методом дожигания на месте не должна рассматриваться как стадия, снижающая экономичность всего процесса, поскольку вовлечение углеводородных компонентов в процесс горения позволяет получить дополнительное тепло и делает технологию более эффективной. Современные устройства должны обеспечивать эффективную переработку всех типов выбросов (газовых и жидких), содержащих углеводороды и органические соединения, при условии минимального потребления энергии и возможно большей экономической эффективности.

### **1.5.2. Термическое окисление**

Система термического окисления, или дожигания, должна в полной мере соответствовать условиям конкретного производства, в противном случае проблемы взрывоопасности, сопряжения с основной технологией и технического обслуживания лишь создают дополнительные трудности. При правильном проектировании и подборе оптимального метода использования теплоты сгорания отходящих газов система становится безопасной, надежной и экономически эффективной.

## **Процесс термического окисления**

На стадии проектирования системы термического окисления следует учитывать основные характеристики работы источника газового потока, включая запуск и остановку, а также все возможные отклонения от нормального режима. Для жидких и газообразных потоков используются следующие основные характеристики:

- природа источника отходов;
- скорость массопереноса потоком летучих органических соединений;
- скорость истечения жидких отходов;
- объем;
- температура;
- давление;
- состав;
- теплота сгорания потоков, выраженная в процентах от величины нижнего предела воспламенения (НПВ) или в тепловых единицах на единицу массы или объема потока;
- содержание кислорода (во входящем топочном газе);
- содержание конденсирующихся продуктов или аэрозолей;
- неорганические примеси;
- характеристики аэрозолей (их размер и состав).

Процесс проектирования обычно усложняется необходимостью учитывать реальные условия эксплуатации, нельзя ориентироваться на некоторый «нормальный» режим. В отдельных случаях, помимо перечисленной, необходима дополнительная информация. Проектировщик должен четко представлять технологию и режимы основного производства со всеми его отклонениями от нормы, только при этом условии система переработки отходящих потоков будет безопасной и технологически совершенной. Например, для топочных газов при обычном режиме работы концентрация углеводородов значительно ниже НПВ, однако на той же печи изменение режима может значительно повысить их концентрацию вплоть до превышения нижнего предела воспламенения. Именно поэтому важно знать причины появления в газовом потоке различных органических соединений.

## **Скорость отходящих топочных газов**

Многие процессы сгорания проектируются без обеспечения системой контроля. За основу расчета берут некую скорость подачи воздуха в топку, при которой в отходящем газе уровень содержания углеводородных компонентов значительно ниже соответствующего НПВ. Однако на практике такой режим реализуется редко. Главной

задачей проектировщика является создание процесса с исключением взрывоопасности при минимальной скорости потока и максимально высоком (по отношению к НПВ) содержании органических примесей.

Существенно, чтобы технологически безопасный режим осуществлялся при содержании углеводородов не ниже 25 % относительно НПВ. Дальнейшее повышение этого показателя невозможно без постоянного контроля за их содержанием в потоке.

### **Уровни концентраций углеводородов в потоках**

При проектировании конструкций топок и дымоходов особенно важно обеспечить условия, при которых максимальное количество углеводородов в топочном газе без потерь подается на стадию термического окисления. Неоднократно отмечено, что часто возникают карманы и емкости, в которых концентрируются органические компоненты газового потока. В этих случаях взрывоопасность резко возрастает, так как концентрация этих компонентов может превысить уровень, соответствующий НПВ. Аналогичная ситуация может возникать при наличии в потоке органических жидкостей, плотность паров которых превышает плотность воздуха. Тогда их концентрация сильно возрастает в нижней части печей и других емкостей.

Там, где это возможно, технологическое оборудование должно работать при слабом разрежении по отношению к атмосфере во избежание утечки топочных дымов.

Характеристики газового потока, прежде всего его скорость и содержание углеводородов, во многом обеспечивают экономичность последующей стадии термического окисления. Ниже показана связь этих величин с дополнительным количеством топлива, необходимого для проведения термического окисления топочного газа с исходной температурой 38 °С в камере сгорания при 750 °С.

### **Типы используемого оборудования**

Термическое обезвреживание отходящих газов предприятий химической промышленности осуществляют в основном в устройствах двух типов: факельных установках и печах (камерах) различной конструкции.

К первым предъявляют следующие требования: полнота сгорания, исключая образование вредных газов; отсутствие при горении выделений дыма и сажи; устойчивость факела при переменных расходе и составе газового потока; безопасность и бесшумность работы.

Факельные установки сооружают непосредственно на технологических агрегатах со сбросом газов в факельную трубу, с

отбором факельных газов на переработку или для сжигания в котельных установках либо в виде комбинированных систем.

При сбросе отходящих газов в факельную трубу 2 (см. рис. 1.57) газовый поток направляют через сепаратор 1 на сжигание, а конденсат из сепаратора возвращают в производство либо сбрасывают в

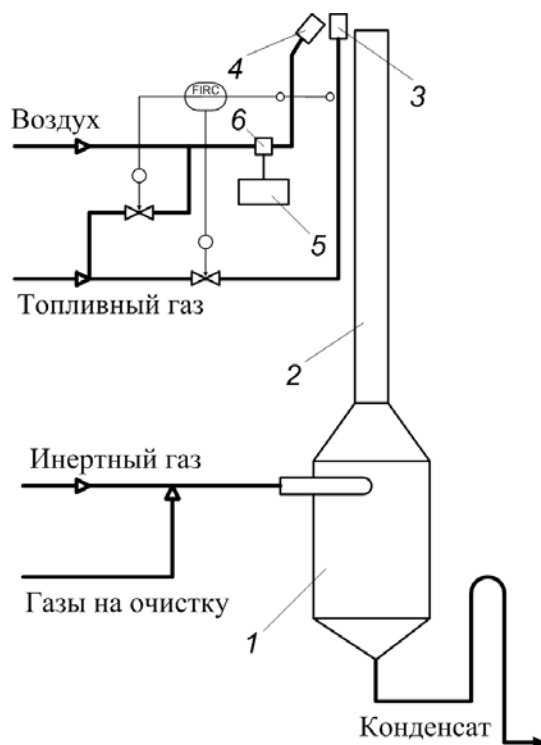


Рис. 1.57. Схема факельной установки со сбросом газов в трубу:  
1 - сепаратор, 2 - факельная труба, 3 - дежурная горелка, 4 - запальная горелка,  
5 - зажигающее устройство, 6 - свечи

канализацию. Факельная труба снабжается дежурными 3 и запальными 4 горелками. Как правило, подобное конструктивное решение применяют в тех случаях, когда давление на технологических установках не может обеспечить подачу факельного газа в газгольдеры, либо когда последние заполнены, или газы не утилизируются вообще.

При отборе газов на переработку газовый поток поступает в сепаратор 1 (рис. 1.58) для отделения конденсата, после чего большая часть его подается потребителю, а избыток сбрасывают в факельную трубу через регулирующий клапан 3.

В факельных установках применяют разнообразные горелки, большинство конструкций которых предусматривает подачу к сжигаемому пламени паров или инертных газов для предотвращения выделения копоти и сажи.

Основные параметры факельной системы (диаметр  $D$  и высота трубы  $H$ ) можно определить, исходя из расходов подлежащих

обезвреживанию газов и скорости газового потока в факельной трубе, которая должна составлять 20...30 % от скорости звука в газе.

Расход сбрасываемого газа выражается соотношением

$$G = 3600 \cdot \rho \cdot v \cdot S,$$

где  $G$  – расход газа, кг/ч;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость газа на выходе из факельной трубы, м/с;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>.

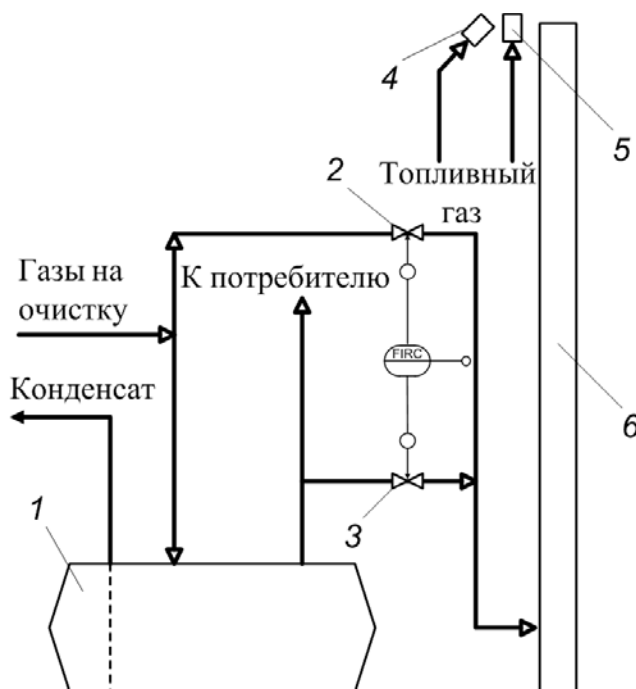


Рис. 1.58. Схема факельной установки с сепаратором:

1 - сепаратор, 2,3 - регулирующие клапаны, 4 - запальная горелка, 5 - дежурная горелка, 6 - факельная труба

Плотность газа

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}, \quad (1.3)$$

где  $M$  – молекулярная масса газа, кг;  $P$  – абсолютное давление газа, Па;  $T$  – температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8314,8 Дж/(кмоль·К).

В идеальном газе скорость звука

$$v_3 = 91,5 \cdot \sqrt{\frac{K \cdot T}{M}}, \quad (1.4)$$

где  $K$  – показатель адиабаты ( $K = c_p/c_v$ ).

Тогда скорость газа на выходе из факельной трубы, принимаемая равной 20 % от скорости звука в данном газе,

$$v = 0,2 \cdot v_3 = 18,3 \cdot \sqrt{\frac{K \cdot T}{M}}. \quad (1.5)$$

Поперечное сечение факельной трубы

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4},$$

где  $D$  – диаметр трубы, м.

Совместное решение уравнений (1.4) - (1.5) приводит к соотношению для диаметра трубы

$$D = 0,4 \cdot \left( \frac{T}{K \cdot M} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{G}{P} \right)^{0,5}.$$

Полученное из этого выражения значение диаметра трубы можно уменьшить на 15 % в случае сжигания без выделения дыма.

Для определения длины факела применяют эмпирическое соотношение  $L = 118 \cdot D$ .

Высоту факельной трубы и зону безопасного расстояния до факела рассчитывают по интенсивности теплоизлучения пламени. Последняя описывается уравнением

$$q = \frac{\psi \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot l^2},$$

где  $\psi$  – коэффициент светового излучения;  $Q$  – общее количество тепла, выделяемого пламенем, МДж/ч;  $l$  – расстояние от центра пламени, м (рис. 1.59), при котором интенсивность теплоизлучения снижается до

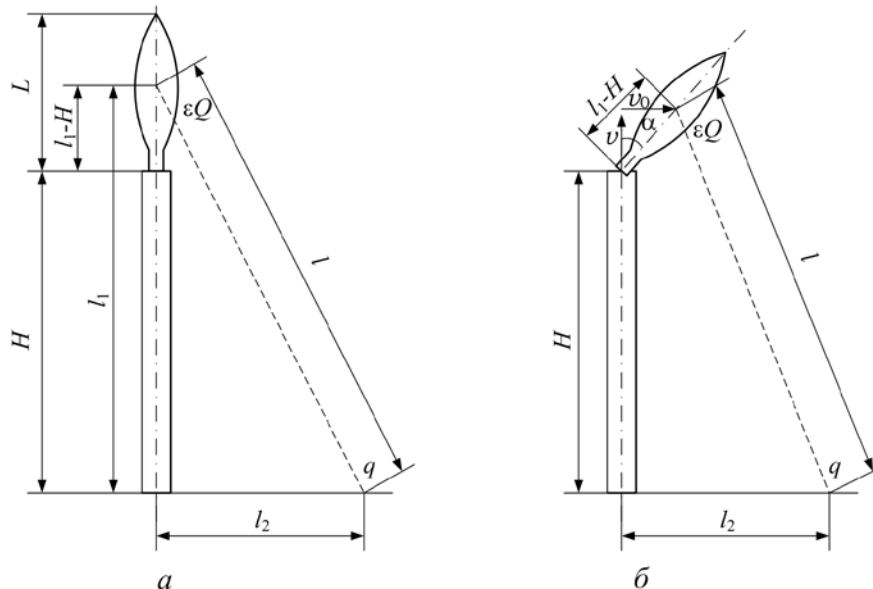


Рис. 1.59. Расположение факела при отсутствии (а) и наличии (б) ветра

безопасных значений порядка  $q = 5$  МДж/(м<sup>2</sup>·ч).

Значение  $\psi$  определяют из эмпирического соотношения

$$\psi = 0,2 \cdot \left( Q_H \cdot \frac{26,9}{900} \right)^{0,5},$$

где  $Q_H$  – низшая теплота сгорания факельного газа, МДж/м<sup>3</sup>;

$$Q_H = \frac{1}{26,9} \cdot (50 \cdot M + 100),$$

где  $M$  – молекулярная масса газа, кг.

Применительно к газовым смесям  $Q_H = \sum (n_i \cdot Q_i)$ , где  $n_i$  – мольная доля компонента  $i$  в смеси;  $Q_i$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го компонента смеси, МДж/м<sup>3</sup>.

Количество выделяемого пламенем тепла

$$Q = Q_{HT} \cdot G,$$

где  $G_T$  – расход факельного газа, м<sup>3</sup>/ч.

Для максимальной интенсивности теплоизлучения  $q_{\max}$  можно записать как

$$q_{\max} = \frac{\psi \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot l_1^2}, \quad (1.6)$$

где  $l_1$  – расстояние от центра пламени до основания факельной трубы, м:

$$l_1 = \sqrt{\frac{H}{H + L}}. \quad (1.7)$$

В этом выражении  $H$  – высота факельной трубы, м.

Решив совместно (1.6) и (1.7), получим

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left[ L^2 + \frac{\psi \cdot Q}{\pi \cdot q_{\max}} \right]^{0,5} - L \right\}.$$

В это уравнение вместо  $q_{\max}$  можно подставить максимальное радиационно-тепловое воздействие, безопасное для обслуживающего персонала (17 МДж/м<sup>2</sup>·ч):

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left[ L^2 + \frac{\psi \cdot Q}{17 \cdot \pi} \right]^{0,5} - L \right\}.$$

В безветренную погоду  $l_2 = \sqrt{l^2 - l_1^2}$ , или  $l_2 = \sqrt{l^2 - H \cdot (H + L)}$ .

При наличии ветра

$$l_2 = \left\{ l^2 - [H + (l_1 - H) \cdot \cos \alpha]^2 \right\}^{0,5} + (l_1 - H) \cdot \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол наклона пламени, град.

Печи для сжигания отходящих газов (камеры) представляют собой установки, в футерованном корпусе которых размещают устройства для инициирования процесса (форкамера с горелками), линии ввода газов, теплопередающие поверхности, а также

оборудование для прокачки газов, контроля и т. д. (рис. 1.60).

Применяют также многокамерные термические устройства для дожигания отходящих газов с предварительным подогревом, в которых

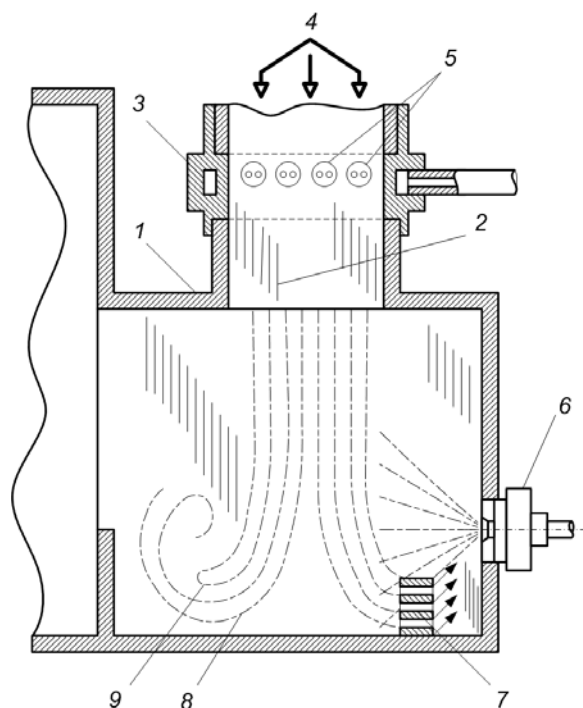


Рис. 1.60. Печь для сжигания отходящих газов:

- 1 – корпус; 2 – отверстия; 3 – коллектор; 4 - патрубок для ввода газов;
- 5 - распределительные трубки; 6 – горелка; 7 - перфорированная стенка; 8 – под;
- 9 - камера горения

скорость газа в сопле горелки достигает 20...40 м/с (в 2...4 раза выше, чем в горелках обычных конструкций).

В связи с довольно высокими капитальными затратами на сооружение и эксплуатацию подобных установок весьма актуальной проблемой в этой области является рекуперация тепла сгорания. В настоящее время за рубежом созданы регенеративные установки для термического обезвреживания газовых выбросов единичной мощностью до 90...100 тыс. м<sup>3</sup>/ч, в которых удается регенерировать 90 % тепловой энергии.

Регенеративные дожигатели конструктивно выполняют как с неподвижной, так и с движущейся насадкой.

На рис. 1.61 показана схема установки для дожигания отходящих газов, разработанной Запорожским филиалом НИИОГаза.

Высокая степень очистки (более 95 %) газов в установке достигается тем, что камеры с насадками б перекрыты дополнительными сводами, обеспечивающими подвод отходящего газа к корням факелов горелок. Расположение последних с двух сторон



форкамеры по ходу движения газов позволяет полезно использовать весь ее рабочий объем и добиться значительной экономии топлива.

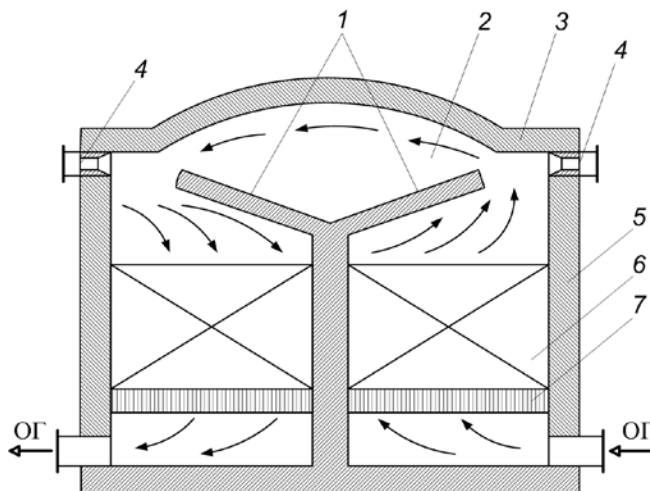


Рис. 1.61. Устройство для термического обезвреживания газов:  
1 - дополнительный свод; 2 - камера дожигания; 3 - основной свод; 4 – горелка;  
5 - теплоизолированный корпус; 6 – насадка; 7 - решетка

Разработаны также установки с движущейся (вращающейся) насадкой, которые состоят из теплообменных секций, выполненных из листов гофрированного металла и установленных на подвижной платформе, выносной камеры дожигания с горелками, подводящих и отводящих патрубков и привода. Насадкой в теплообменных секциях служат керамические элементы с высокой поверхностью теплообмена.

Установки с вращающейся насадкой отличаются сравнительно меньшими габаритами за счет малой длительности теплообменного цикла, однако наличие перетоков в уплотнениях снижает общую эффективность очистки.

Годовой расход топлива на обезвреживание газов по мере увеличения единичной мощности установок в регенеративных аппаратах сжигания значительно снижается, в то время как в других конструкциях наблюдается обратная тенденция. За счет этого и других факторов удастся заметно уменьшить приведенные затраты на обезвреживание газов в установках этого типа производительностью более  $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

### **1.5.3. Процессы теплообмена с целью утилизации тепла**

Отходящие высокотемпературные газы представляют собой значительный энергосберегающий ресурс. Например, тепло топочного газа (поток  $90 \text{ м}^3/\text{мин}$  при температуре  $760 \text{ }^\circ\text{C}$ ) эквивалентно энергии потока пара, подаваемого со скоростью  $450...500 \text{ кг/ч}$  при избыточном давлении  $0,7 \text{ МПа}$ . Расчет показывает, что при затратах 6 у. е. на  $500 \text{ кг}$

пара и 8000 рабочих часов в год такое количество тепла стоит около 50000 у. е. в год или даже более. Большинство предприятий, сталкивающихся с проблемой выброса в атмосферу углеводородов и необходимостью контроля за чистотой окружающей среды, не представляют себе в полной мере, насколько эффективны методы термического окисления с точки зрения экономии топлива. Способы утилизации тепла определяются характером процесса и требованиями технологии.

### Теплообменники

В теплообменниках горячие газы после термического окисления используют обычно для предварительного нагрева поступающих топочных дымов. Эффективность теплообмена (и в итоге выбор типа теплообменника) определяется содержанием углеводородов (% НПВ) и температурой топочных газов. С увеличением концентрации углеводородов и/или с повышением температуры максимально допустимая эффективность теплообмена (без учета перегрева) снижается, благодаря чему в итоге уменьшаются капитальные затраты и текущие расходы. Ниже приведены соответствующие данные:

|                                       |    |    |    |
|---------------------------------------|----|----|----|
| Содержание углеводородов, % к НПВ     | 2  | 25 | 40 |
| Максимальная степень теплообмена*, %: |    |    |    |
| – при 38 °С                           | 91 | 54 | 26 |
| – » 200 °С                            | 88 | 40 | 4  |

---

\* Сжигание при 760 °С без минимизации скорости сгорания.

Таким образом, эффективность предварительного нагрева топочного дыма ограничена даже при высокой теплоте сгорания или исходной температуре. В связи с этим следует изыскивать для утилизации тепла технические устройства.

С практической точки зрения при минимальной скорости сгорания, обеспечивающей стабильность работы системы, происходит дальнейшее снижение максимально допустимой эффективности теплообмена. В случае, когда уровень концентраций углеводородов относительно НПВ сильно меняется по ходу процесса, предусматривается дополнительный путь прохождения части газового потока мимо теплообменника. Это делают для обеспечения максимального теплообмена при низких концентрациях углеводородов и для перегрева смеси при высоких значениях НПВ (в %). Во многоходовых кожуховых и трубчатых теплообменниках эффективность теплопереноса составляет около 80 %. При использовании вращающихся лопастных рекуперативных теплообменников эффективность равна 85 % при одновременном

падении давления. При использовании таких устройств необходимо предотвратить смешение чистого газа с входящим топочным газом, поскольку при таком смешении сильно возрастет загрязненность выброса в атмосферу.

Следует во всех случаях стараться утилизировать максимум тепла при минимальных затратах на оборудование и расходы по обслуживанию.

В рамках общей технологической схемы можно использовать дополнительные теплообменники после теплообменников, описанных выше. Они могут предназначаться для нагрева входящего воздуха. Ясно, что нужно обеспечить максимальное удержание тепла в системе и выброс газа в атмосферу с минимальной температурой. Единственным ограничением при этом является точка росы агрессивных соединений, вызывающих коррозию металлических поверхностей. С учетом всех указанных факторов температура сбрасываемого в атмосферу потока составляет примерно 175 °С (если не принимаются специальные меры против коррозии).

### **Экономайзеры**

Эти устройства целесообразно использовать при необходимости получения пара. При этом значительно снижаются расходы на строительство паровых котлов с дополнительной подачей топлива.

В том случае, когда поступающие в топку газы далеки от точки росы, подаваемую в топку воду можно предварительно нагревать в экономайзере. Возможно также параллельное получение дополнительной электроэнергии и пара с использованием котлов-утилизаторов или турбогенераторов с конденсацией пара, однако это менее эффективно с экономической точки зрения.

### **Теплообменники с органическими теплоносителями**

Такие устройства создаются при необходимости получать высокую температуру при низком давлении, однако они довольно сложны по конструкции и в эксплуатации.

В заключение следует отметить, что для обеспечения безопасной, надежной, эффективной и экономичной работы системы очистки топочных дымов или жидких органических отходов методом термического окисления необходимо учитывать большое число факторов. Однако использование теплового ресурса отходящих потоков и одновременное обеспечение чистоты выброса позволяет значительно уменьшить общие энергозатраты производства при соблюдении требований экологии. Практика подтверждает отмеченные достоинства этого метода.

---

---

## Вопросы для самоконтроля

---

---

1. Назовите условия, влияющие на эффективность очистки газовых выбросов методами дожигания.
2. Какое технологическое оборудование используется при термическом обезвреживании отходящих газов?
3. Назовите основные параметры факельной системы.
4. Перечислите типы конструкций печей для сжигания отходящих газов.
5. Какие устройства утилизации тепла используются при термическом обезвреживании газовых выбросов?



### 1.6. Химические методы очистки отходящих газов

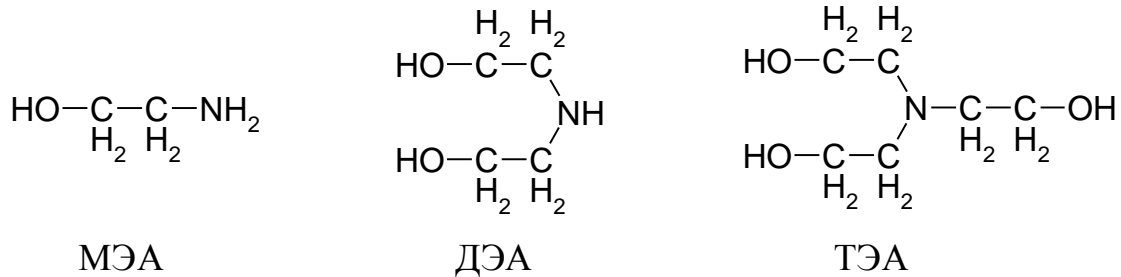
В связи с повышением требований к экологической чистоте производств все больше внимания уделяется развитию химических методов очистки отходящих газовых потоков. Эти методы сами по себе или в совокупности с основанными на других принципах технологии обеспечивают эффективную очистку выбрасываемых в атмосферу газообразных продуктов, надежность всего производства, снижение энергозатрат и себестоимости.

Устранение нежелательных компонентов в газах с использованием химических методов означает, что в основе процесса лежит химическая реакция и ее роль является преобладающей по сравнению с процессами адсорбции, абсорбции, конденсации или сжигания. В большинстве случаев, однако, технология сочетает в себе несколько операций и достаточно сложно классифицировать метод очистки в соответствии с перечисленными выше физико-химическими методами. Например, метод очистки газа от  $\text{SO}_2$  с использованием извести или известкового молока не приводится здесь в качестве химического, поскольку определяющей операцией является абсорбция на стадии скруббирования. Из этого примера видно, что определение, данное «химическому» методу очистки, неоднозначно и вводится для удобства изложения и необходимости классификации.

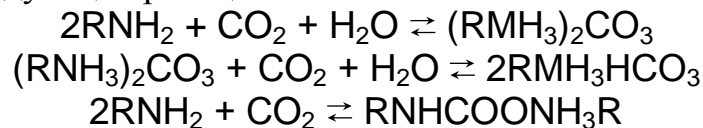
### 1.6.1. Очистка газов от оксидов углерода

Одним из самых распространенных методов улавливания является поглощение водой – способ, не требующий сложной, дорогостоящей аппаратуры, расходов теплоты и основанный на использовании дешевого растворителя. Однако он недостаточно эффективен.

Более эффективными поглотителями  $\text{CO}_2$  являются растворы этаноламинов. Чаще всего для этой цели используют моно-, ди- и триэтаноламины (МЭА, ДЭА и ТЭА):



При пропускании отходящих газов через растворы этаноламинов протекают следующие реакции:



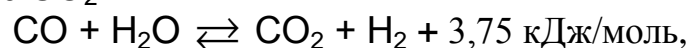
Обычно для поглощения  $\text{CO}_2$  используют растворы МЭА. Он дешев, обладает высокой реакционной способностью, легко регенерируется.

Хорошим поглотителем диоксида углерода является холодный метанол  $\text{CH}_3\text{OH}$ , поглощающая способность которого резко возрастает с понижением температуры и повышением давления в системе «газ – метанол».

Эффективными поглотителями диоксида углерода из отходящих газов являются цеолиты – алюмосиликаты с пористой структурой и высокой емкостью поглощения.

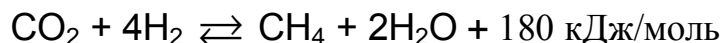
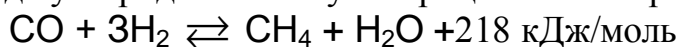
Молекулы  $\text{CO}_2$  достаточно малы, их диаметр составляет 0,31 нм, что позволяет им проникать внутрь структуры цеолитов. С помощью цеолитов  $\text{CO}_2$  извлекают не только из отходящих, но и из природных газов и используют этот процесс для удаления  $\text{CO}_2$  из современных экологически изолированных систем, например из атмосферы космических кораблей.

В отличие от малотоксичного диоксида углерода его оксид – высоко токсичный газ: его ПДК<sub>РЗ</sub> – 20 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sub>МР</sub> – 3 мг/м<sup>3</sup> и ПДК<sub>СС</sub> – 1 мг/м<sup>3</sup>. Для очистки газовых выбросов от СО используют реакцию его доокисления до  $\text{CO}_2$



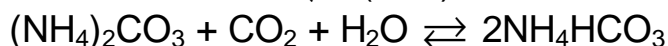
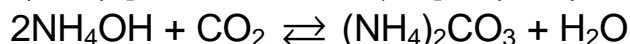
проводимую с использованием оксидных железных катализаторов.

Для удаления небольших остаточных (до 2 % от суммы газов) количеств оксида углерода используют процесс метанирования:



Обычно эти реакции используются как заключительная ступень очистки газа после каталитического окисления CO до CO<sub>2</sub> и выделения последнего растворами этаноламинов. Процесс метанирования проводится на катализаторах, содержащих 76...78% NiO и 20...22% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

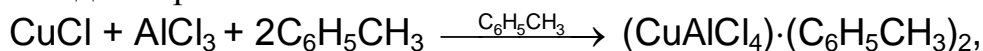
Если оксид углерода необходимо удалить практически полностью, используют метод его абсорбции медно-аммиачным раствором. Оксид углерода под высоким давлением поглощается в противоточном абсорбере раствором медно-аммиачного комплекса:



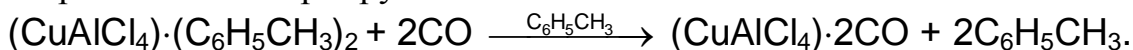
Чтобы улучшить условия очистки, абсорбцию проводят при высоком (32 МПа) давлении и температуре около 0 °С; десорбцию осуществляют при атмосферном давлении и температуре около 80 °С.

Альтернативным методом является абсорбция оксида углерода медь-алюминий-хлоридными растворами. Этот метод применяют при наличии в газе кислорода и больших количеств диоксида углерода. Процесс основан на химической абсорбции оксида углерода раствором смешанной соли гетрахлорида меди и алюминия и различных ароматических углеводородах с образованием комплекса с оксидом углерода. Рекомендуется раствор, содержащий 20...50 % CuAlCl<sub>4</sub> и 80...50 % толуола.

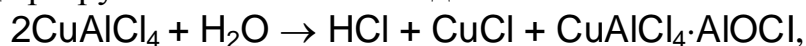
Процесс абсорбции можно представить следующим образом. Сначала идет образование комплекса:



который затем абсорбирует CO:



Другие газы – CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> – не реагируют с комплексом, однако вода разрушает комплекс с выделением HCl:



поэтому перед абсорбцией газ должен быть осушен, что является недостатком процесса. Схема процесса представлена на рис. 1.62.

Предварительно осушенный газ подают в абсорбер, который орошается регенерированным раствором. Насыщенный оксидом углерода раствор, выходящий из абсорбера, подогревают до 100 °С и

направляют в промежуточный десорбер, где поддерживают давление 0,25 МПа. Десорбер орошают регенерированным раствором для поглощения СО, выделяющегося при десорбции.

Частично регенерированный раствор после теплообменника поступает в регенератор, где регенерируется при 135...180 °С. Затем

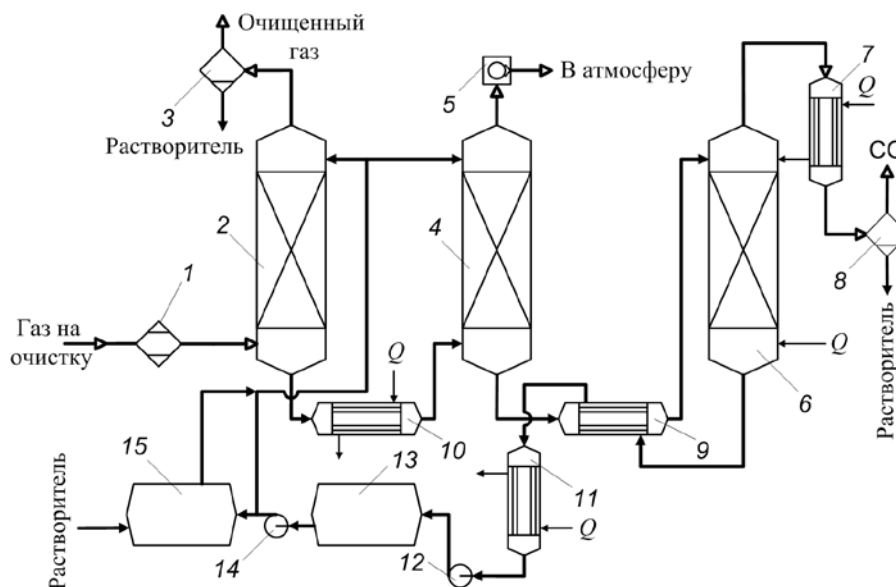


Рис. 1.62. Схема установки очистки газов от оксидов углерода медь-алюминий-хлоридным раствором:

- 1 - блок осушки газа; 2 - абсорбер; 3, 8 - блоки выделения паров толуола;  
4 - промежуточный десорбер; 5 - вакуум-насос; 6 - регенератор;  
7, 9-11 - холодильники; 12, 14 - насосы; 13 - емкость для раствора; 15 - узел приготовления раствора

раствор охлаждают и подают в отстойник, из которого направляют в абсорбер и десорбер. Выделенный из газовых потоков растворитель (толуол) возвращают в систему приготовления раствора.

### 1.6.2. Очистка газов от оксидов азота

Наиболее устойчив в атмосферном воздухе диоксид азота  $\text{NO}_2$ , в который переходят постепенно другие оксиды азота, выброшенные в атмосферу. ПДК<sub>МР</sub> и ПДК<sub>СС</sub> для этого газа составляют 0,085 мг/м<sup>3</sup>, а в воздухе рабочих зон промышленных предприятий ПДК<sub>РЗ</sub>  $\text{NO}_2$  равна 5 мг/м<sup>3</sup>. Из общего количества выбросов оксидов азота на тепловые электростанции приходится 72,5 %, на автотранспорт – 17,3 %, черную металлургию – 6,1 %, промышленность строительных материалов – 1,8 %, химическую промышленность – 1,7 %, нефтеперерабатывающую промышленность – 0,6 %.

В промышленности используется много различных методов очистки газов от соединений азота применительно к различным источникам выброса (рис. 1.63). Согласно этой классификации методы



Рис. 1.63. Методы очистки промышленных газов от оксидов азота

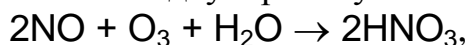


разделены на классы: окислительные, восстановительные, сорбционные и прочие, которые, в свою очередь, подразделяются на группы, объединяющие ряд однотипных методов очистки.

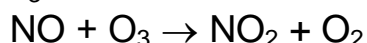
### **Окислительные методы**

Окислительные методы очистки отходящих газов от NO основаны на окислении оксида азота кислородом воздуха, озоном, водными растворами  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{KCO}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  и ряда других. Окисление NO до  $\text{NO}_2$  проводится в газообразной или жидкой фазе с последующим получением азотной кислоты. Окисление NO в жидкой фазе протекает с несколько меньшей скоростью, чем в газообразной, причем лимитирующей стадией процесса является скорость растворения кислорода.

Для интенсификации процесса улавливания оксидов азота целесообразно использовать для их окисления более сильные окислители, чем кислород, например озон или озono-кислородную смесь. При введении озона в жидкую рабочую смесь протекает реакция

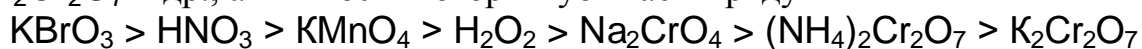


тогда как окисление NO в газовой фазе позволяет использовать лишь один атом O в молекуле  $\text{O}_3$ :



Высокие скорости процесса достигаются в полых распылительных аппаратах за счет развитой поверхности взаимодействующих фаз, и такие аппараты широко используются в очистных сооружениях.

Скорость процесса окисления NO существенно возрастает при замене кислорода или озона жидкими окислителями, т.е. водными растворами  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{KBrO}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  и др., активность которых убывает в ряду



Скорость окисления NO и, следовательно, эффективность очистки отходящих газов от этого соединения существенно возрастают в присутствии катализаторов, в качестве которых используются гранулы полиэтилена, шамот, известняк, динас, кокс, пропитанный солями Mn, Cu, Cr, доломит, оксид алюминия, стекловолокно, силикагель и др.

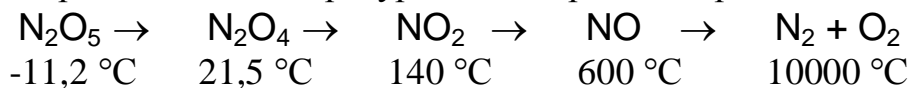
### **Восстановительные методы**

Восстановительные методы основаны на восстановлении до нейтральных продуктов жидкими или газообразными восстановителями в присутствии катализаторов или под действием высоких температур.

При нормальной температуре в присутствии кислорода самопроизвольно протекает процесс окисления оксида азота NO:



С возрастанием температуры идет обратный процесс



Практически полное разложение NO на азот и кислород происходит при температурах порядка 6000...10000°C, однако основная часть оксидов азота диссоциирует уже при температурах 1500...2000 °C, и при нагревании газов до 1800 °C остаточное содержание в них NO может быть снижено до 0,044 %. Для этого требуется определенное время, которое может быть значительно уменьшено применением катализаторов. Наиболее высокой каталитической активностью отличаются катализаторы на основе сплавов платины, родия, палладия. Их содержание в катализаторах колеблется от 0,1 до 2 %, а в качестве носителя применяют оксид алюминия, керамику, силикагель, металлическую ленту и другие материалы. Такие катализаторы обеспечивают высокую степень очистки газов от оксидов азота – их остаточное содержание в газовых выбросах не превышает  $5 \cdot 10^{-4}$  %.

В качестве восстановителей в очистных сооружениях используют метан, водород, природный газ, пары керосина, аммиак, нефтяной и коксовый газы, азотоводородную смесь.

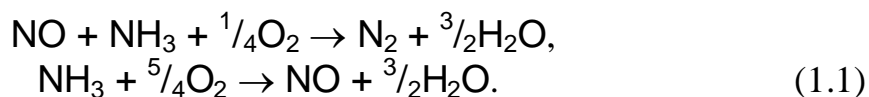
Катализаторы на основе платиновых металлов выдерживают температуры порядка 800...900 °C; обязательным условием их нормальной работы является отсутствие в газе сернистых соединений, отравляющих катализаторы.

Если в атмосферу периодически выбрасывается небольшое количество концентрированных оксидов азота, для них целесообразно использовать компактные очистные сооружения, где нагрев газов происходит в электрических реакторах, а в качестве восстановителя используется кокс. Разложение оксидов начинается на его поверхности уже при 600 °C и достигает 100 % при нагреве до 1000 °C.

Методы очистки газов от NO<sub>x</sub> являются наиболее удачным примером применения химических методов для обеспечения экологической чистоты промышленных выбросов. Особо отмечены два метода: некаталитическое гомогенное восстановление NO<sub>x</sub> добавками аммиака и селективный гетерогенно-каталитический процесс восстановления оксидов азота в присутствии NH<sub>3</sub>.

### **Введение аммиака (некаталитический) процесс**

Метод основан на восстановлении NO до N<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в присутствии кислорода и вводимого восстановителя – аммиака (NH<sub>3</sub>) и предназначен для очистки отходящих газов систем сжигания от оксидов азота. Процесс описывается следующими брутто-уравнениями:



Первая реакция преобладает при температуре газового потока в интервале 880...1000 °С. Начиная с 1100 °С вклад реакции становится существенным и наблюдается нежелательное образование NO. Таким образом, процесс восстановления очень чувствителен к температуре и наиболее эффективен в достаточно узком температурном интервале 970±50 °С. Данные рис. 1.64 (избыток кислорода – 1 %, исходное содержание NO – 300 млн<sup>-1</sup>) наглядно демонстрируют связь селективности процесса с изменением температуры. Добавка водорода снижает нижний температурный предел, и таким образом значительно расширяется допустимый температурный интервал. При мольном отношении H<sub>2</sub> : NH<sub>3</sub> = 2 : 1 восстановление оксидов азота происходит достаточно быстро при температуре около 700°С.

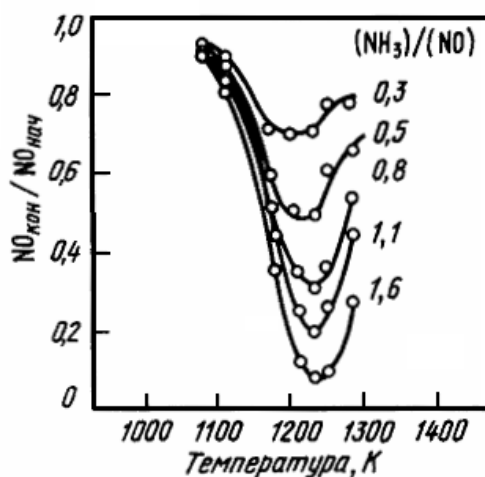


Рис. 1.64. Влияние температуры на степень восстановления NO при добавках аммиака

Очистку газов от оксидов азота описываемым способом можно применять в широком масштабе в различных стационарных сжигающих устройствах, например, в городских и промышленных котельных и при очистке газов металлургических производств (доменные печи, вагранки). На рис. 1.65 дана схема процесса очистки топочного газа котельных путем введения аммиака; в данной конструкции сопло для ввода NH<sub>3</sub> расположено в области конвекционного движения потока. В Калифорнии на ряде устройств подтверждена эффективность очистки отходящих газов с точки зрения допустимой чистоты выброса в соответствии с экологическими требованиями. До настоящего времени метод, однако, не опробован для очистки дымов топок, работающих на угле.

Степень восстановления оксидов азота определяется следующими факторами:

- типом топки, характеристикой топлива;
- временем пребывания газовой смеси в области оптимальной температуры в процессе движения потока;
- распределением температуры в топке;
- отношением  $\text{NH}_3/\text{NO}$  и концентрацией  $\text{NO}$ ;
- перемешиванием в потоке.

С практической точки зрения наиболее важно установить место

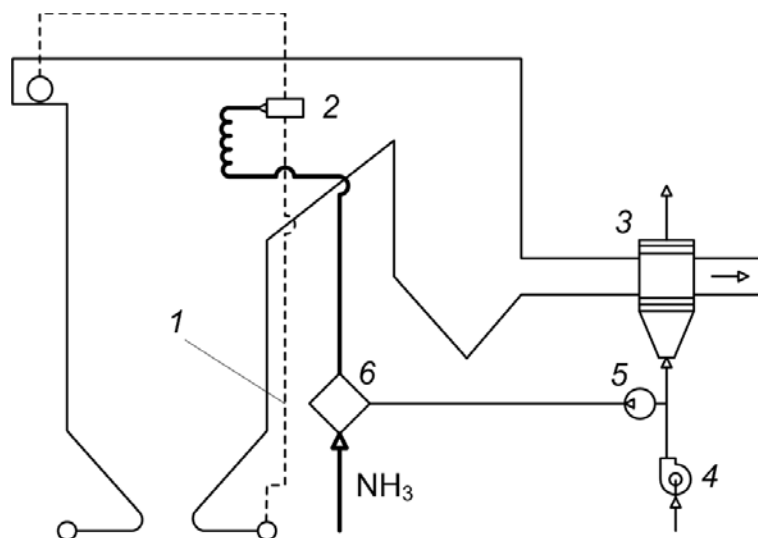


Рис. 1.65. Схема процесса восстановления оксидов азота аммиаком:

- 1 - циркуляционная вода для охлаждения сопла; 2 - сопло для ввода аммиака;  
3 - воздушный теплообменник; 4 - вентилятор принудительной тяги;  
5 - вспомогательный вентилятор для повышения давления; 6 - камера смешения

ввода аммиака в газовый поток, чтобы обеспечить максимально быстрое смешивание аммиака (и в случае необходимости  $\text{H}_2$ ) в оптимальном температурном интервале, совпадающем со стационарным режимом топки. Для этого необходимо иметь профиль распределения температуры по потоку при различных мощностях загрузки топлива. Обычно при правильном выборе температурной области для протекания реакции достаточно  $0,2...0,3$ ; при содержании оксидов азота в количестве не выше  $200 \text{ млн}^{-1}$  используется отношение  $\text{NH}_3:\text{NO}_x = 1,5$ . При дальнейшем увеличении количества  $\text{NO}$  это отношение уменьшается до 1,0. Эффективность восстановления возрастает с уменьшением количества кислорода в газовом потоке, однако лишь до определенного уровня в соответствии с уравнением брутто-реакции (1.1). Следует отметить, что это согласуется с практикой, когда для уменьшения образования оксидов поддерживают небольшой избыток воздуха.

Поскольку данный метод очистки топочных газов находится в стадии развития, необходимо отметить ряд недостатков, нерешенных вопросов и факторов, позволяющих в будущем его усовершенствовать.

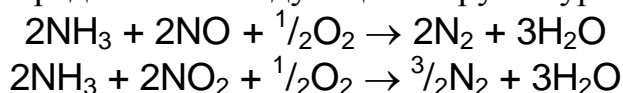
1. Необходимо очень точно устанавливать место ввода аммиака в топочный газ, поскольку процесс восстановления  $\text{NO}$  аммиаком эффективно протекает в узком температурном интервале.
2. Строгие требования к процессу восстановления и зависимость температуры потока от загрузки топлива и его калорийности могут ограничивать мощность сжигающего устройства.
3. Выброс в атмосферу аммиака (обычно не выше  $50 \text{ млн}^{-1}$ ) и других побочных продуктов.
4. При сжигании высокосернистых нефтей или углей теплообменник котла может забиваться бисульфатом аммония.
5. Стоимость очистки может превысить затраты на усовершенствование сжигающего устройства. Большинство указанных недостатков, как было показано экспериментально, может быть устранено путем многофорсуночного ввода аммиака при повышении загрузки топки топливом, путем промывки дымоходов водой и отдува сажи воздухом для предотвращения закупорки газовых магистралей. Главное достоинство метода – возможность снижать концентрацию оксидов азота в топочном дыме на 40...60% и совместимость с техническими решениями по улучшению режимов сгорания с целью снижения в топочном газе содержания  $\text{NO}_x$ . Для более глубокой очистки дыма следует устанавливать дополнительное оборудование.

### ***Метод селективного каталитического восстановления***

В мировой практике проблеме очистки топочных газов уделяется большое внимание и разрабатывается несколько направлений. Однако наиболее перспективен «сухой» (без стадии промывки) способ, так как он прост и отличается более низкой стоимостью. Введение стадии абсорбции оксидов растворами резко усложняет технологию вследствие необходимости очистки сточных вод.

Селективное каталитическое восстановление (СКВ) основано на реакции восстановления оксидов азота аммиаком на поверхности гетерогенного катализатора в присутствии кислорода. Термин «селективный» в данном случае отражает предпочтительное протекание каталитической реакции аммиака с оксидами азота по сравнению с кислородом. В то же время кислород является реагентом в каталитической реакции. Метод СКВ применим в первую очередь к топочным газам в условиях полного сгорания – содержание кислорода в них более 1% и отходящий газ подвергается химической реакции в

окислительных условиях. Ранее описанный процесс некаталитического восстановления (НКВ) применим к топочным газам с высоким процентным содержанием исходного топлива, т.е. когда обеспечиваются восстанавливающие свойства газового потока. Процесс СКВ может быть представлен следующими брутто-уравнениями:



Первая реакция является основной, так как оксид азота NO составляет обычно около 95% в сумме оксидов азота. В соответствии с этими уравнениями с теоретической точки зрения достаточно стехиометрического количества аммиака относительно оксидов азота для перевода их в экономически чистые продукты – молекулярный азот (N<sub>2</sub>) и воду. При мольном отношении NO<sub>2</sub>:NO<sub>x</sub> = 1:1 восстанавливается 80...90 % оксидов азота, и в отходящем газе содержание аммиака не превышает 20 млн<sup>-1</sup>. Метод СКВ используется в широком масштабе для очистки газов городских и промышленных котельных, работающих на газе и нефти. В США и Канаде разновидность метода селективного каталитического восстановления широко используется для очистки хвостовых газов заводов по производству азотной кислоты и других химических производств. В настоящее время разрабатывается ряд процессов, призванных наглядно продемонстрировать эффективность метода СКВ для очистки топочных газов при использовании всех типов топлива: газа, угля, нефти. Эффективность метода СКВ определяется параметрами:

- 1) система сжигания – вид топлива;
- 2) состав катализатора;
- 3) активность катализатора, его селективность и время действия;
- 4) форма катализатора, конфигурация каталитического реактора;
- 5) отношение NH<sub>3</sub>:NO<sub>x</sub> и концентрация NO<sub>x</sub>;
- 6) температура каталитического реактора;
- 7) скорость газового потока.

Метод СКВ предусматривает наличие катализатора, каталитического реактора, емкости для хранения аммиака и систему его подачи в газовый поток. Большое сопротивление каталитического реактора приводит к падению давления потока; для его компенсации предусматривается система вентиляторов.

Наиболее эффективно каталитическое восстановление происходит в области 300...450°C. Для обеспечения именно такой температуры газового потока каталитический реактор располагают между экономайзером котла и теплообменником для подогрева входящего воздуха. Общепринятая схема приведена на рис. 1.66. От конструкции

реактора и типа катализатора зависит качество всего процесса восстановления, что требует детального обсуждения.

Большинство катализаторов формируется на основе диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) и пентаоксида ванадия ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ). Диоксид титана – удобный носитель и не отравляется  $\text{SO}_3$ . Пентаоксид ванадия промотирует реакцию взаимодействия аммиака и оксидов азота и мало чувствителен к действию  $\text{SO}_x$ . Композиция катализатора и соотношение составных частей защищены в большинстве случаев патентами.

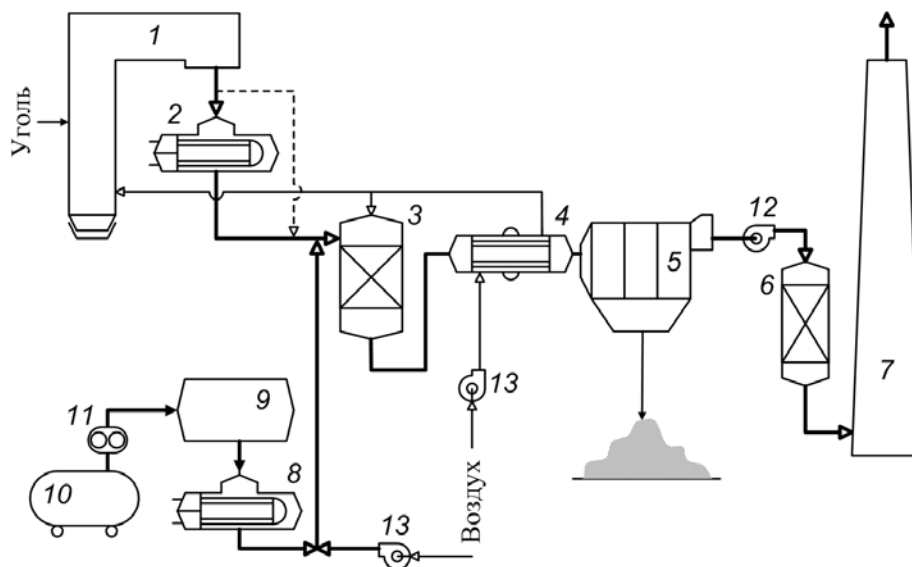


Рис. 1.66. Схема процесса селективного каталитического восстановления  $\text{NO}_x$ :

1 - топка котла; 2 - экономайзер; 3 - реактор; 4 - теплообменник для нагрева воздуха; 5 - электрофильтр; 6 - блок обессеривания топочного газа; 7 - дымовая труба; 8 - испаритель аммиака; 9 - емкость для хранения аммиака; 10 - выгрузка аммиака с железной дороги или автотранспорта; 11 – компрессор; 12 – дымосос; 13 – воздуходувка

Тип реактора и структура катализатора могут изменяться в широких пределах, однако основным фактором при конструировании является содержание мелкодисперсных частиц в топочном газе. Для котельных на газе катализатор используют в виде сферических шариков, колец или цилиндров, расположенных слоем на сетчатом поддоне. Для котельных, использующих в качестве топлива нефть или уголь, характерно большое содержание золы в потоке топочного газа. В этом случае предпочтительны системы с параллельным газовым потоком в каталитической зоне. В этих устройствах топочный газ проходит по открытым каналам, стенки которых параллельны поверхности катализатора. Мелкие частицы остаются в турбулентном потоке, в то время как оксиды азота вступают в каталитическую реакцию с поверхностью катализатора в результате турбулентности и диффузии.

Разновидностью данного типа являются устройства, в которых катализатор удерживается в стенках каналов с помощью специальных сеток или экранов. Типы каталитических ячеек для реакторов с параллельными каналами приведены на рис. 1.67. Катализатор может

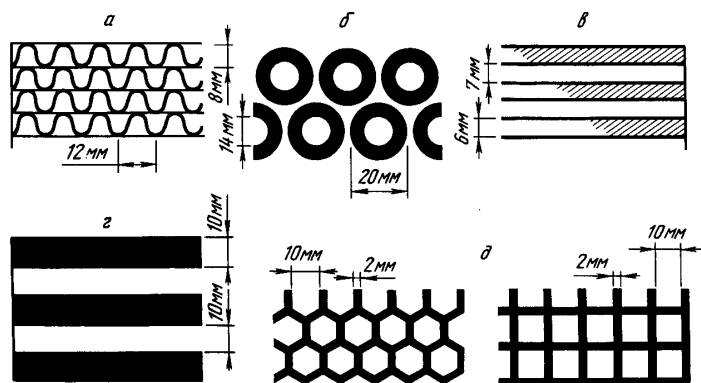


Рис. 1.67. Типы каталитических ячеек реактора с параллельными каналами для процесса СКВ:

*a* - металлические сотовые ячейки; *б* - трубчатые; *в* - параллельные каналы; *г* - параллельные пластины; *д* - керамические сотовые ячейки

быть порошкообразным материалом различной дисперсности или закрепляться на поверхности металлических или керамических носителей. Для удобства изготавливают блоки объемом  $1 \text{ м}^3$  (рис. 1.68), которые послойно соединяют в реакторе (рис. 1.69).

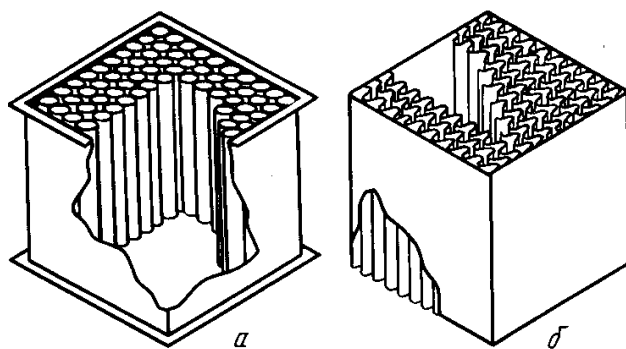


Рис. 1.68. Конструкция сменных блоков реактора СКВ:  
*a* - трубчатая конфигурация; *б* - сотовая, с использованием гофрированных металлических пластин

Несмотря на большую работу по совершенствованию реактора и типа катализаторов, некоторые вопросы требуют дальнейшей доработки. Не во всех случаях можно предотвратить отравление катализатора ядами, присутствующими в топочном газе, а также осаждение крупных частиц золы и сажи на каталитической поверхности. Мелкие частицы размером меньше  $1 \text{ мкм}$  могут закрывать каталитические центры на поверхности носителя. Особенно важно



продлить время работы катализатора и сохранность реактора без закупорки каналов при использовании в качестве топлива угля. Необходимо увеличить продолжительность работы катализатора с 1 до 2 лет при наличии в топочном дыме оксидов серы и сажи.

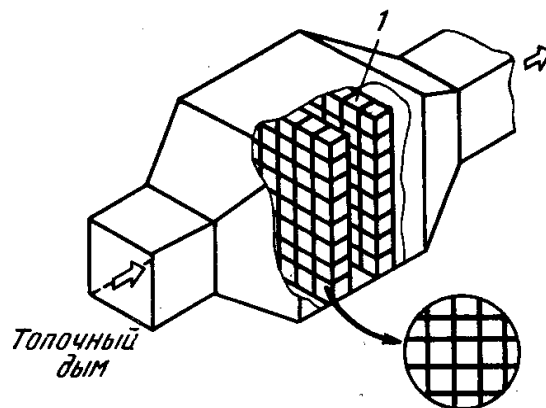


Рис. 1.69. Реактор СКВ с параллельными потоками газа:  
1 - послойное расположение сменных блоков

В методе СКВ эффективность восстановления определяется скоростью потока, мольным отношением аммиака/оксиды азота и температурой. При мольном отношении, равном 1; обычно восстанавливается более 90 % оксидов, содержащихся в исходном дыме. В случае большого отношения степень восстановления увеличивается при одновременном нежелательном увеличении выброса в атмосферу аммиака.

Основной недостаток метода СКВ – образование и осаждение на стенках технологического оборудования твердого сульфата аммония и расплава бисульфата аммония при выходе из каталитического реактора. Эти соединения –  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  – образуются по реакции вводимого аммиака с  $\text{SO}_3$ , который получается при сгорании высокосернистых топлив. Особенно трудно избежать осаждения солей в воздушном теплообменнике. Наиболее острой эта проблема является для технологических линий с использованием устройств электростатической очистки топочного газа перед его подачей в каталитический реактор и далее в воздушный теплообменник, когда в качестве топлива применяются нефть и уголь с высоким содержанием серы. Вероятно, частицы золы в турбулентном газовом потоке способствуют механической очистке стенок от солей или аммонийные соли конденсируются на мелкодисперсных частицах и в таком виде выносятся с потоком из теплообменника.

Тем не менее в большинстве случаев необходимо предусматривать способы очистки от копоти горячих и холодных внутренних поверхностей оборудования и промывку теплообменника

водой для растворения солей. Воду после промывки, как и сточные воды из блока десульфуризации газового потока, необходимо очищать от аммиака перед сбросом. В настоящее время разработаны специальные конструкции теплообменников, не допускающие конденсации солей, однако они не введены в практику.

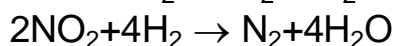
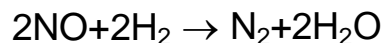
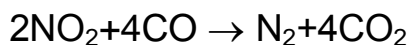
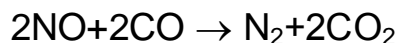
Проблемами являются выбросы в атмосферу аммиака и его соединений, а также иных нежелательных продуктов, например  $\text{SO}_3$ , необходимость использования дополнительных устройств для очистки потока – блок обессеривания и др., отсутствие надежной аппаратуры для определения количества аммиака в отходящем газе, чувствительность каталитического процесса к температурному режиму и связанные с этим ограничения в загрузке топлива, замена и дезактивация катализатора удобными с точки зрения охраны окружающей среды методами, надежность устройств очистки и их экономическая целесообразность.

Несмотря на это, метод СКВ успешно используют для очистки газов котельных, работающих на нефти и газе; в стадии проектирования находится ряд сжигающих устройств на угле. При необходимости восстановить 80 % или более оксидов азота в топочном газе метод СКВ является единственно возможным. Кроме того, метод предполагает совершенствование; его можно успешно сочетать с методами совершенствования системы сжигания для снижения количества оксидов азота.

### ***Неселективное каталитическое восстановление***

В данном методе восстанавливающий агент – аммиак – заменяется другими восстановителями ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ , углеводородами). Эти восстановители действуют неселективно, поскольку взаимодействуют с кислородом и  $\text{SO}_x$  газового потока: это взаимодействие идет параллельно с целевой реакцией восстановления оксидов азота, что требует значительного избытка восстановителей. Чтобы обеспечить неселективное каталитическое восстановление, целесообразно проводить сжигание таким образом, чтобы образующийся топочный газ обладал восстанавливающими свойствами. Практически это означает подачу в камеру сжигания топлива и кислорода в количествах, близких к стехиометрическому отношению (так называемая обедненная горючим смесь). В этих условиях  $\text{CO}$  и непрореагировавшие углеводороды вступают в реакцию каталитического восстановления  $\text{NO}_x$  и отпадает необходимость в дополнительном введении восстановителя в газовый поток. Такому процессу сжигания аналогичен процесс регулирования степени сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания автомобилей.

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  $700^\circ\text{C}$  и более, поэтому возникает необходимость использования термостойких катализаторов или восстановителей с низкой температурой зажигания либо проведения ступенчатого контактирования с промежуточным охлаждением обрабатываемого газового потока.

Используемые технологические схемы обезвреживания отходящих газов различаются в основном способами подвода тепла к обрабатываемым газовым потокам, применяемыми катализаторами, и приемами утилизации энергетического потенциала обезвреженных газов.

Схема высокотемпературного каталитического восстановления  $\text{NO}$  в производстве азотной кислоты представлена на рис. 1.70. Отходящие газы содержат, в % об.  $\text{NO}_x$  – 0,05...0,1;  $\text{N}_2$  – 96,0...96,2;  $\text{O}_2$  – 2,2...3,0 и некоторое количество паров увлекаемой из абсорбционной колонны азотной кислоты.

Для обезвреживания отходящие нитрозные газы подают в подогреватель-сепаратор, где их очищают от паров кислоты и нагревают до  $50^\circ\text{C}$  теплом технологических нитрозных газов, затем нагревают до  $110...135^\circ\text{C}$  в теплообменнике, после чего смешивают с горячими топочными газами, получая газовую смесь при температуре  $390...500^\circ\text{C}$ . В эту смесь вводят природный газ с таким расчетом, чтобы отношение  $\text{CH}_4 : \text{O}_2$  составляло 0,55...0,6. Получаемую смесь направляют в реактор, где на палладийсодержащем катализаторе сжигают водородсодержащие компоненты природного газа и восстанавливают  $\text{NO}_x$  до элементарного азота. Этот процесс проводят при

700...730 °С под давлением  $(4,5...5,7) \cdot 10^5$  Па. Обезвреженные нитрозные газы из реактора направляют в турбину, где рекуперируют их энергию, получая на выходе расширенные газы при 390...410 °С, которые подают в котел-утилизатор, где получают перегретый пар при температуре 230 °С под давлением  $13...10^5$  Па. Температура газа при этом снижается до 185°С, после чего газы выбрасывают в атмосферу через выхлопную 150-метровую трубу. В их составе содержится, в % об.:  $\text{NO}_x$  – 0,005...0,01;  $\text{CO}$  – 0,13;  $\text{CH}_4$  – 0,4;  $\text{O}_2$  – 0,15.

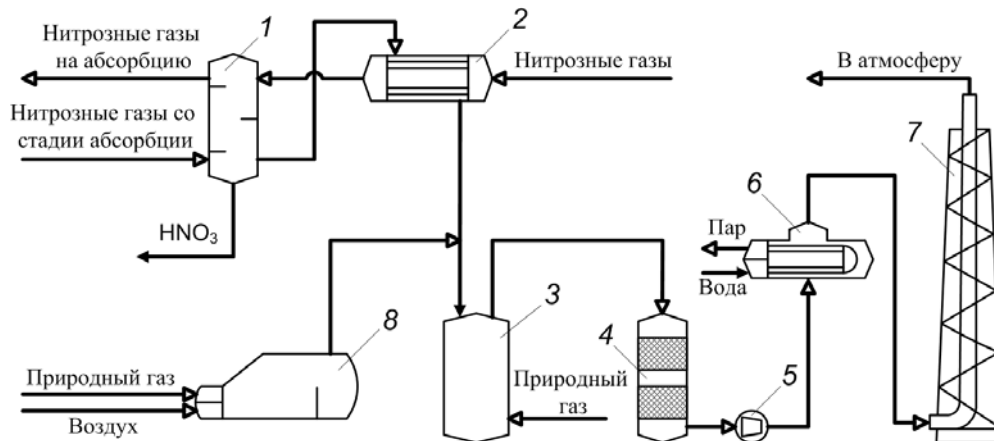


Рис. 1.70. Схема установки каталитического обезвреживания отходящих нитрозных газов производств слабой азотной кислоты под давлением 0,73 МПа: 1 - подогреватель-сепаратор; 2 - теплообменник; 3 - смеситель; 4 - реактор; 5 - рекуперационная турбина; 6 - котел-утилизатор; 7 - выхлопная труба; 8 - топка

Расход метана на каталитическую очистку выхлопных газов азотнокислотных цехов составляет  $120...130 \text{ м}^3$  на 1 т производимой кислоты в виде моногидрата, потери палладия – до 0,05 г/т  $\text{HNO}_3$ .

### Облучение потоком электронов

Другой перспективный метод очистки отходящих газов от оксидов азота – стимулирование химических реакций с помощью электронного пучка. Метод обеспечивает восстановление  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  в реакции с аммиаком в отсутствие катализатора под действием стимулирующего излучения. Возможность использования указанного способа очистки применительно к крупной тепловой станции показана на рис. 1.71. Первоначально поток топочных газов очищается от золы, затем подается аммиак и газовая смесь облучается в реакторе. В результате аммиак и оксиды превращаются в сухой порошок неорганических солей:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{NH}_4\text{NO}_3$ . В настоящее время нет точного описания химического механизма. После отделения солей горячий топочный газ выбрасывается через дымоход. Пилотная установка, работающая на этом принципе, обеспечивает восстановление

85 % оксидов азота и 95 % оксидов серы в сильно загрязненных топочных газах котельных, использующих нефть в качестве топлива.

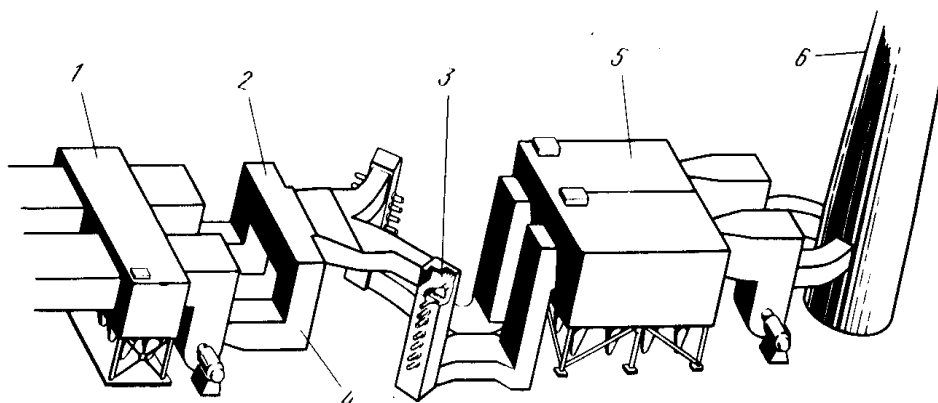


Рис. 1.71. Схема очистки топочного дыма электронным пучком:  
1 - удаление золы; 2 - устройство ввода аммиака; 3 - реактор для восстановления оксидов азота и серы; 4 - устройство температурного контроля потока;  
5 - удаление сухих сыпучих продуктов реакции; 6 - газоход для выброса чистого газа

Метод находится в стадии развития, однако имеет перспективы благодаря высокой эффективности одновременного удаления оксидов азота и серы, а также возможности получения в сухом виде ценного полупродукта для производства удобрений. Экономическую сторону такого способа очистки следует оценить в условиях длительной эксплуатации.

### 1.6.3. Очистка газов от оксидов серы

В настоящее время существует несколько методов очистки топочных дымов от оксидов серы с использованием химических превращений. Все методы предполагают предварительную стадию адсорбции  $SO_x$ , тем не менее обсуждаются в данной главе, поскольку их основу составляет химическое превращение оксидов серы в новое химическое соединение, выделяемое из газового потока.

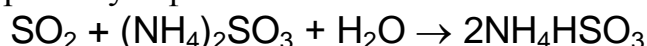
#### Очистка газов от диоксида серы

Диоксид серы  $SO_2$  оказывает сильное токсическое действие уже при концентрации в воздухе  $0,25...0,50 \text{ мг/м}^3$ , а при средней концентрации (более  $0,50 \text{ мг/м}^3$ ) отмечается повышение смертности и числа госпитализаций. В нашей стране на  $SO_2$  установлены следующие предельно допустимые концентрации: ПДК<sub>РЗ</sub> –  $10 \text{ мг/м}^3$ ; ПДК<sub>МР</sub> –  $0,03 \text{ мг/м}^3$ ; ПДК<sub>СС</sub> –  $0,005 \text{ мг/м}^3$ .

Используемые в промышленных масштабах методы очистки отходящих газов от  $SO_2$  можно разделить на три основные группы:

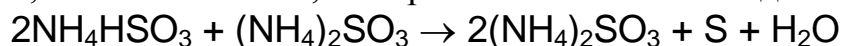
- 1) аммиачные методы, позволяющие получать сульфит и гидросульфит аммония, которые используются как товарные продукты;
- 2) методы нейтрализации, обеспечивающие высокую степень очистки газов, но дающие в качестве побочных продуктов сульфиты и сульфаты, не имеющие широкого спроса в народном хозяйстве;
- 3) методы каталитического окисления  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$  с последующим получением разбавленной серной кислоты.

Аммиачные методы очистки основаны на взаимодействии с водными растворами сульфита аммония:



Полученный гидросульфит аммония подвергается разложению серной, азотной или фосфорной кислотами; при этом образуются товарный диоксид серы и соли аммония, находящие широкое применение в качестве удобрений.

Аммиачно-автоклавный метод сводится к абсорбции  $\text{SO}_2$  раствором сульфит-гидросульфита аммония. По достижении определенной концентрации солей в растворе они поступают на разложение, но не кислотами, а нагреванием в автоклаве до 140...150 °С:

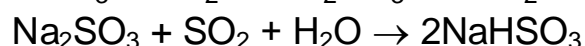
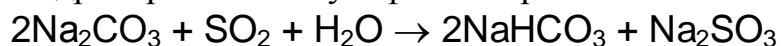


Сульфат аммония и сера используются как товарные продукты.

При аммиачно-циклическом методе очистки газов от  $\text{SO}_2$  он поглощается водными растворами сульфит-гидросульфита аммония при низкой температуре и затем выделяется при нагревании, осушается и используется как товарный продукт или перерабатывается в серу или серную кислоту. Степень очистки газов достигает 92...94%.

Очистка отходящих газов от  $\text{SO}_2$  методами нейтрализации основывается на поглощении диоксида серы щелочными растворами или суспензиями.

Содовый метод очистки осуществляется пропусканием отходящих газов через раствор соды и проходит через стадии образования гидрокарбоната и сульфита натрия:



Принципиальная схема очистки отходящих газов от  $\text{SO}_2$  содовым методом показана на рис. 1.72. Газ последовательно проходит две абсорбционные башни, а орошающий раствор с помощью циркуляционных насосов движется противотоком газу и насыщается диоксидом серы. Очищенный газ выводится в атмосферу, а раствор при достижении требуемой концентрации  $\text{NaHSO}_3$  выводится из системы

циркуляции, в которую подается эквивалентное количество свежего содового раствора.

При очистке отходящих газов сернокислотной промышленности успешно используется известковый метод, основанный на поглощении

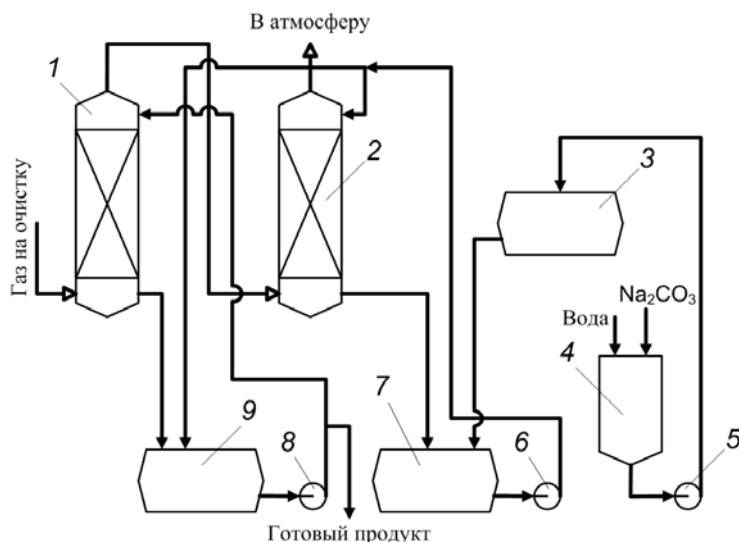
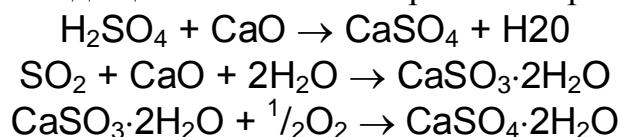


Рис. 1.72. Содовая очистка газов от SO<sub>2</sub>:

1, 2 - абсорбционные башни; 3, 7, 9 - сборники; 4 - растворитель соды;  
5, 6, 8 - насосы

SO<sub>2</sub> и тумана серной кислоты суспензией оксида кальция CaO. При взаимодействии отходящих газов с CaO протекают реакции



Степень очистки газов известковым методом достигает 85 %, а технологическое оборудование отличается простотой и надежностью.

К каталитическим методам очистки газов от диоксида серы относятся методы, обеспечивающие переработку уловленного SO<sub>2</sub> в серную кислоту, которые различаются как по механизму процесса, так и по составу применяемых катализаторов.

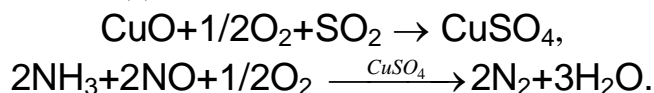
В качестве катализаторов для доокисления SO<sub>2</sub> до SO<sub>3</sub> используются пиролюзит, активированный уголь и ряд других веществ, а в качестве окислителей – кислород воздуха, озон O<sub>3</sub>, надсерная кислота H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Очистка от оксидов серы с использованием оксидов металлов

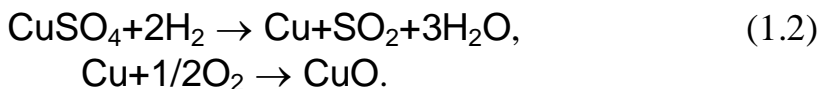
Метод обеспечивает одновременную очистку газов от NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> в присутствии катализатора – оксида меди (CuO), нанесенного на оксид алюминия. Топочный газ подается в реактор с параллельным расположением каналов для прохождения газового потока, заполненных

катализатором. Процесс с учетом последовательности операций может быть представлен брутто-уравнениями.

Поглощение оксидов:



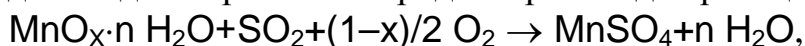
Регенерация:



Топочный газ при 390°C подается в один из реакторов, где оксид серы взаимодействует с CuO с образованием сульфата меди (CuSO<sub>4</sub>). Сульфат меди и в меньшей степени оксид меди служат катализаторами процесса восстановления оксидов азота аммиаком. После насыщения реактора CuSO<sub>4</sub> топочный газ переключается на новый реактор, в то время как отработанный подвергается регенерации. В соответствии с уравнением (1.2) молекулярный водород (H<sub>2</sub>) восстанавливает сульфат меди до меди, при этом выходящий из реактора поток содержит достаточное количество SO<sub>2</sub> для получения серной или сернистой кислоты. После окисления меди в оксид меди (CuO) реактор снова готов к поглощению оксидов из потока. В промежутке между стадиями поглощения и регенерации реактор продувается паром до полной отдувки топочного газа или водорода во избежание взрыва. Установка может использоваться также только для выделения оксидов азота (при этом опускается стадия регенерации) или предназначаться для выделения SO<sub>x</sub> (при этом в газовый поток не вводится аммиак). В настоящее время в США создается проект городской котельной с одновременным 90%-м удалением оксидов азота и серы указанным способом.

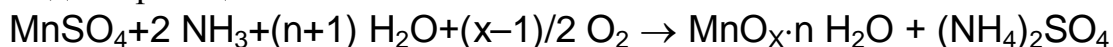
Среди исследованных и опробованных методов некоторую практическую реализацию получил окисно-марганцевый метод (метод фирмы «Мицубиси»).

По этому методу горячие дымовые газы (≈135 °C) обрабатывают оксидом марганца в виде порошка. В процессе контакта оксида марганца с диоксидом серы и кислородом происходит реакция



где  $x = 1,6...1,7$ .

Образующийся сульфат марганца после его выделения из газа обрабатывают в виде водной пульпы аммиаком с целью регенерации оксида марганца:





В соответствии с рис. 1.73 инжестируемый в дымовые газы оксид марганца взаимодействует с содержащимся в них диоксидом серы в адсорбере. Выходящие из адсорбера газы освобождают от взвешенных примесей в циклоне и электрофилтре, после чего через дымовую трубу при  $\approx 115^{\circ}\text{C}$  очищенные газы поступают в атмосферу.

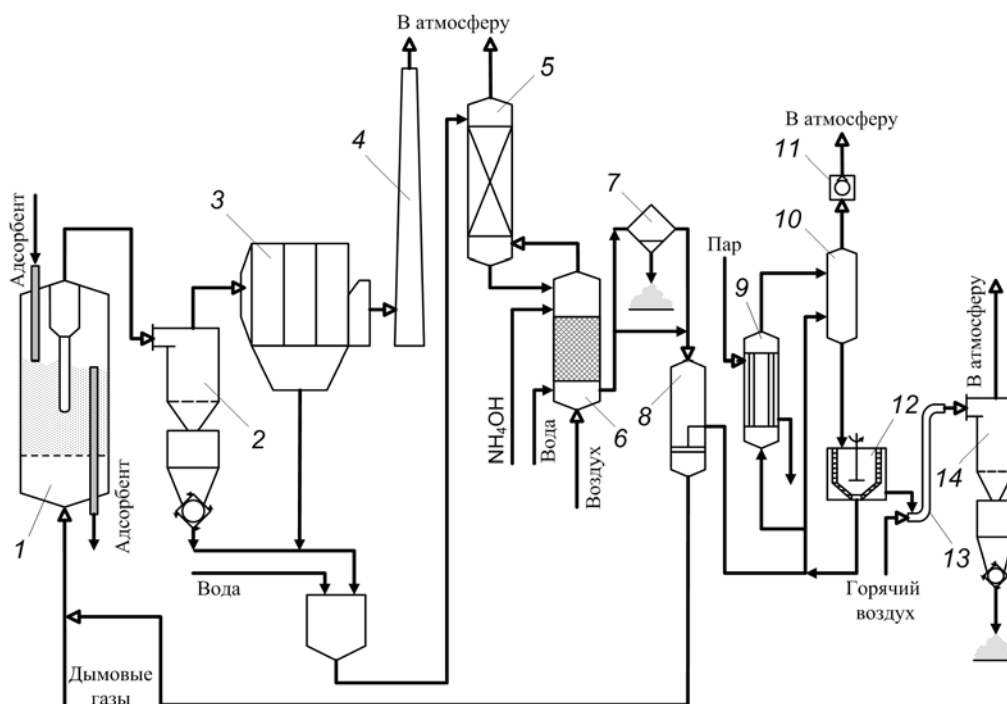


Рис. 1.73. Схема установки оксидно-марганцевой очистки дымовых газов от диоксида серы:

- 1 - адсорбер; 2, 14 - циклон; 3 - электрофилтp; 4 - дымовая труба;  
 5 - аммонийный скруббер; 6 - реактор; 7 - сепаратор; 8 - филтp;  
 9 - кипятильник; 10 - кристаллизатор; 11 - вакуум-насос; 12 - центрифуга; 13 - пневмотранспорт

Основное количество хемосорбента из циклона и электрофилтpа вновь направляют на контактирование с дымовыми газами, а небольшую его часть в виде водной пульпы с целью регенерации оксида марганца последовательно обрабатывают в аммонийном скруббере и реакторе водным раствором аммиака и воздухом. Уловленную в процессе газоочистки сажу, находящуюся в поступающей из реактора пульпе, отделяют в сепараторе. Регенерированный оксид марганца выделяют из раствора на филтpe и направляют в голову процесса. Освобожденный от взвешенных веществ раствор сульфата аммония через кипятильник передают на вакуум-кристаллизацию. Образующиеся кристаллы сульфата аммония отделяют от маточного раствора на центрифуге и после высушивания горячим воздухом отделяют от последнего в циклоне. При содержании диоксида серы в

подаваемом на очистку газе 0,15 % об. окисно-марганцевый метод в соответствии с такой технологией обеспечивает его 90%-е извлечение.

### **Угольное топливо с добавками извести**

Сухие процессы санитарной очистки газов от диоксида серы обеспечивают, как следует из изложенного, возможность реализации обработки газов при повышенных температурах без увлажнения очищаемых потоков, что позволяет снизить коррозию аппаратуры, упрощает технологию газоочистки и сокращает капитальные затраты на нее. Наряду с этим они обычно предусматривают возможность циклического использования поглотителя и (или) утилизацию продуктов процесса очистки газов.

В связи с необходимостью перевода топочных устройств на угольное топливо возникла потребность в разработке новых методов сжигания, обеспечивающих чистоту выбросов в атмосферу в соответствии с экологическими требованиями. Для уменьшения содержания  $SO_2$  разработаны два способа с применением извести: приготовление гранул из угольной крошки с добавкой извести для использования в колосниковых топках и добавление порошкообразной извести к угольной пыли для использования в топках с форсуночным распылением топлива. Проблема уменьшения количества оксидов серы в топочных газах должна решаться параллельно со снижением в них содержания  $NO_x$ . Лабораторные опыты показывают, что меры по снижению концентрации оксидов азота в отходящем дыме (повышенное время пребывания топочного дыма в зоне сгорания и снижение максимальной температуры пламени) также приводят к снижению концентрации  $SO_2$  при введении извести. Реакция связывания  $SO_2$  описывается брутто-уравнением



Использование гранул с добавкой извести при отношении  $Ca : S = 3 : 5$  уменьшает концентрацию оксидов серы на 70% в лабораторных опытах и на 50% при сжигании в колосниковых топках небольшой мощности. Эти показатели несколько ниже, чем для традиционной очистки газов от  $SO_2$  методом промывки, однако если учесть простоту и широкое распространение угольных топок, то этот метод имеет значительные перспективы. Дальнейшее развитие метода предполагает усовершенствование процесса приготовления гранул, повышение их механической прочности, а также детальное изучение процесса их сгорания.

Хорошие результаты получены при добавках извести к угольной пыли в топках форсуночного типа. Данные, полученные на пилотной установке, показали снижение на 80% содержания оксидов серы в

топочном дыме при отношении  $Ca : S = 3 : 1$ . Высокий эффект обусловлен повышенной подачей топлива по отношению к воздуху и снижением максимальной температуры пламени, что одновременно обеспечило хороший показатель по содержанию оксидов азота в отходящем потоке.

Для двух приведенных методов введения в топку извести требуется получение более полной информации в следующих областях: эффективность связывания оксидов серы в зависимости от типа угля, типа известковой добавки и ее количества; конструкция топки и условия эксплуатации; вопросы шлакообразования; засорение топки и забивка дымоходов, сбор твердых отходов и их утилизация. Перспективность этого метода во многом определяется его эффективностью при большей простоте и меньших капиталовложениях по сравнению с традиционной промывкой топочного газа в скрубберах.

### Введение сухого сорбента

Сухой сорбент вводят методом, аналогичным изложенному в предыдущем разделе, при этом концентрацию  $SO_2$  в топочном газе можно снизить на 50 %. Сухой щелочной агент вдвигается под давлением в магистраль отходящего топочного дыма и прореагировавшие твердые продукты отделяются от потока (рис. 1.74).

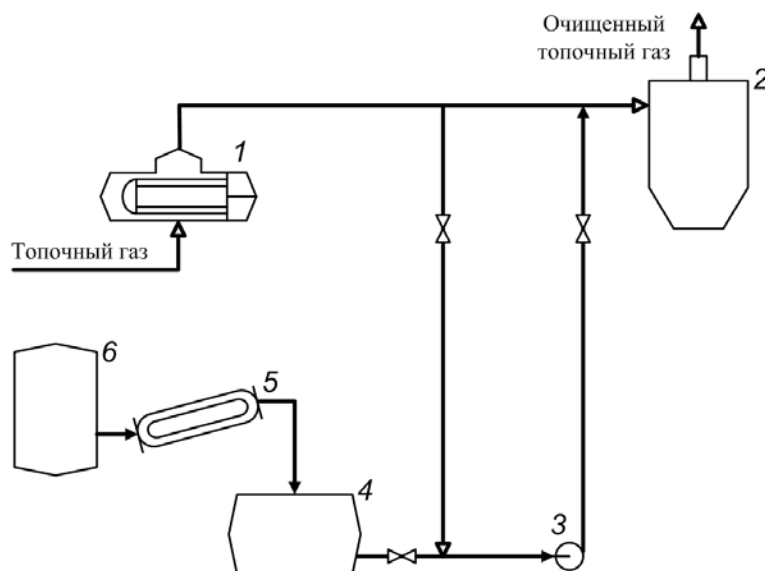
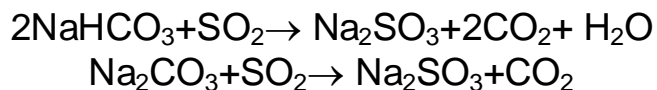


Рис. 1.74. Схема процесса с введением в топочные газы твердого сорбента:  
 1 - теплообменник; 2 - камера пылеуловителя с тканевыми фильтрами;  
 3 - нагнетающий вентилятор; 4 - накопительный резервуар; 5 - транспортер;  
 6 - емкость для хранения сорбента

Для отделения используют тканевые фильтры. Подбором сорбентов установлено, что натриевые соли гораздо эффективнее кальциевых соединений. Реакция с оксидами серы описывается брутто-уравнениями



В качестве сорбента удобно использовать нахколит – природный минерал  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , который доступен, недорог и отличается хорошей реакционной способностью. Реакция протекает с достаточной скоростью при температурах 110...150 °С. Повышение температуры приводит к увеличению степени использования сорбента и снижает содержание  $\text{SO}_2$  в газовом потоке.

Потенциально метод можно использовать во многих сжигающих устройствах, но в данное время опыт накоплен применительно к котельным небольшой мощности. Преимущества метода:

- 1) возможность практического использования;
- 2) низкие капиталовложения по сравнению с устройствами для обессеривания отходящих газов путем промывки;
- 3) более высокая производительность;
- 4) простота удаления отходов.

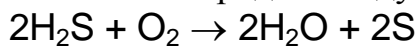
Основные недостатки:

- 1) более низкая степень удаления  $\text{SO}_2$  из газового потока по сравнению с методом промывки в скрубберах;
- 2) нет данных об эффективности при использовании в топках высокой мощности;
- 3) твердые отходы вместе с золой растворимы в воде и при хранении представляют опасность с точки зрения загрязнения грунтовых вод.

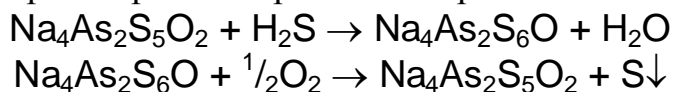
#### **1.6.4. Очистка отходящих газов от сероводорода**

Сероводород – сильный нервно-токсичный яд, при вдыхании которого в концентрации 1 мг/л почти мгновенно развивается отравление, которое оканчивается смертью от остановки дыхания.

Для освобождения отходящих газов от примеси  $\text{H}_2\text{S}$  широко используют окислительные методы, в основе которых лежит поглощение  $\text{H}_2\text{S}$  водными растворами  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  с последующим его окислением кислородом воздуха до элементарной серы:

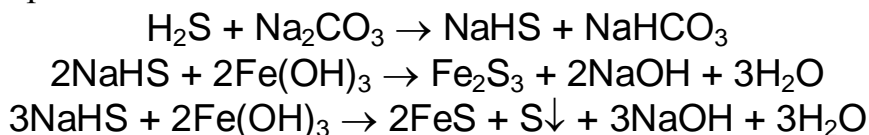


Уже многие годы в промышленности используется мышьяково-содовый метод очистки газов от  $\text{H}_2\text{S}$ , основанный на его поглощении слабощелочным раствором тиоарсената натрия:

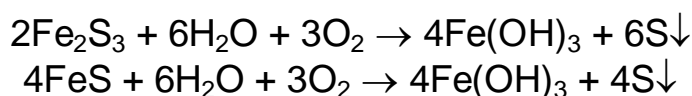


Достоинствами этого метода являются высокая степень очистки (90...98 %) и селективность поглощения  $\text{H}_2\text{S}$  в присутствии больших количеств  $\text{CO}_2$ .

Железо-содовое окисление сероводорода предусматривает использование для поглощения  $\text{H}_2\text{S}$  суспензии  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  в растворе соды, имеющем  $\text{pH}$  8,5...9,0. Поглощение сероводорода характеризуется следующими реакциями:

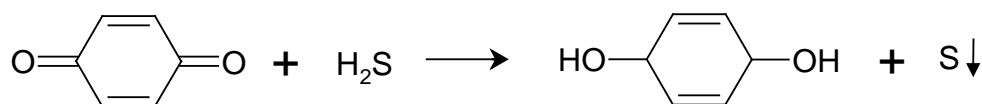


Процесс регенерации поглотительной суспензии описывается реакциями

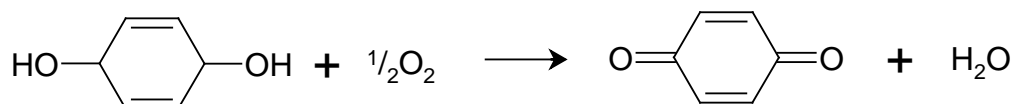


Выделившаяся сера, загрязненная гидроксидом железа (III), отделяется от суспензии на центрифугах.

По щелочно-гидрохиноновому методу окисление сероводорода до элемента серы проводят уже на стадии поглощения:

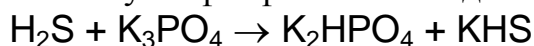


Регенерация поглотительного раствора осуществляется за счет кислорода воздуха:



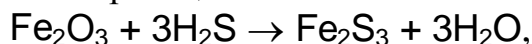
Этот процесс успешно используется на производствах искусственного волокна, специфика которых требует очищения очень больших объемов газовых выбросов, содержащих наряду с сероводородом сероуглерод  $\text{CS}_2$ .

Для очистки газов со значительным содержанием сероводорода и диоксида углерода используют фосфатный метод:

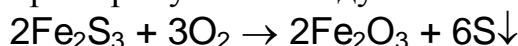


Для очистки газов, не содержащих  $\text{CO}_2$ , обычно используют 40...50%-ный раствор  $\text{K}_3\text{PO}_4$ ; в присутствии  $\text{CO}_2$  во избежание осаждения гидрокарбоната – 35%-ный раствор.

Еще в середине XIX в. для удаления из промышленных газов  $\text{H}_2\text{S}$  использовали болотную руду. При пропускании газов через слой болотной руды протекала реакция

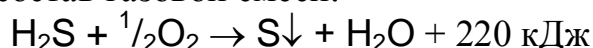


после чего через аппарат пропускали воздух:

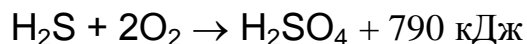


В последующем эти стадии совместили, добавляя необходимое количество кислорода или воздуха. В Европе и в настоящее время широко используется этот способ для извлечения из отходящих дымовых газов сероводорода при его содержании до 20...25 г H<sub>2</sub>S на 1 м<sup>3</sup>; в США чаще удаляют основную массу H<sub>2</sub>S адсорбционными методами и лишь точную доочистку проводят с помощью болотной руды.

Активированный уголь не только адсорбирует H<sub>2</sub>S из отходящих газов, но и катализирует реакцию окисления сероводорода кислородом, если он входит в состав газовой смеси:

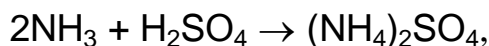


Если очищаемый газ не содержит кислорода, его следует добавлять, однако в присутствии кислорода основной процесс сопровождается побочной сильно экзотермической реакцией образования серной кислоты



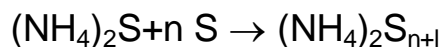
При высоком содержании H<sub>2</sub>S в очищаемых газах выделение теплоты настолько велико, что возникает опасность возгорания слоя угля, особенно при наличии в нем железа или других тяжелых металлов, катализирующих образование H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Образующуюся серную кислоту нейтрализуют газообразным аммиаком:

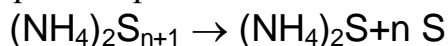


а аммонийные соли легко вымываются водой.

Пропитка сорбирующего угля иодом или иодидом калия существенно повышает его емкость и ускоряет процесс образования элементной серы. Для регенерации насыщенного серой угля используют водный раствор сульфида аммония, который при этом переходит в многосернистый аммоний:



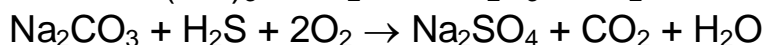
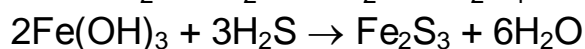
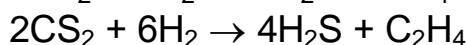
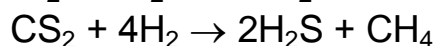
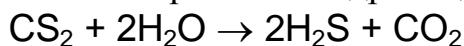
Отработанный раствор разлагают острым паром с выделением чистой (до 99,9%) товарной серы:



Столь же эффективным сорбентом H<sub>2</sub>S из отходящих газов, не содержащих кислорода, являются цеолиты, особенно содержащие Na и Ca, способные селективно извлекать H<sub>2</sub>S из его смесей с диоксидом углерода.

Наряду с сероводородом отходящие газы некоторых производств содержат сероуглерод CS<sub>2</sub>, меркаптаны RSH, например метилмеркаптан CH<sub>2</sub>SH, тиоэфиры RSR, сульфоцианалкилы RCNS и другие органические соединения серы.

Обычные методы сероочистки, за исключением цеолитового, не обеспечивают улавливания органических соединений серы из промышленных газов. Как правило, их удаляют переводом в  $\text{H}_2\text{S}$ , используя в качестве катализатора смесь гидроксида железа и соды:



Обычно процесс ведут при температуре 125...250°C. В качестве контактной массы для выделения органических соединений серы применяют также смесь оксидов железа (катализатор) и цинка (поглотитель  $\text{H}_2\text{S}$ ); на такой контактной массе процесс очистки проводят при температуре 400 °C. Присутствие в отходящих газах жидких углеводородов снижает эффективность очистки, и их следует предварительно удалить пропуская газы через активированный уголь.

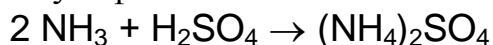
#### **1.6.5. Очистка отходящих газов от аммиака**

Аммиак  $\text{NH}_3$ , являющийся исходным сырьем для производства азотной кислоты и находящий применение во многих химических производствах, обладает токсическими свойствами и вызывает раздражение слизистых оболочек, ожоги, удушье. В воздухе рабочей зоны его ПДК<sub>РЗ</sub> составляет 20 мг/м<sup>3</sup>, а в воздухе населенных пунктов ПДК<sub>МР</sub> и ПДК<sub>СС</sub> не превышают 0,2 мг/м<sup>3</sup>.

В зависимости от вида производства концентрация  $\text{NH}_3$  в газах, подлежащих очистке, может изменяться в широких пределах – от 0,05 до 70...80 %.

Простейшим способом очистки отходящих газов от аммиака является его абсорбция водой.

Иногда водную очистку дополняют доочисткой раствором серной кислоты с получением сульфата аммония:



Этот процесс практически необратим, и его можно проводить в простых одноступенчатых аппаратах. Если доочистку производить с помощью раствора фосфорной кислоты, полученный раствор  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  может быть использован в качестве ценного жидкого удобрения.

### 1.6.6. Очистка отходящих газов от галогенов и их соединений

Основными источниками поступления в атмосферу соединений фтора являются производства фосфорных удобрений, фтороводородной (плавиковой) кислоты и ее солей, фторорганических соединений и металлического алюминия. В дымовые газы фтор поступает в виде HF, SiF<sub>4</sub> и тумана H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. Для их выделения используют методы сухой и мокрой абсорбции.

В качестве сухих хемосорбентов используют известняк CaCO<sub>3</sub>, активированный оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установка для очистки отходящих газов от HF известняком представлена на рис. 1.75. При

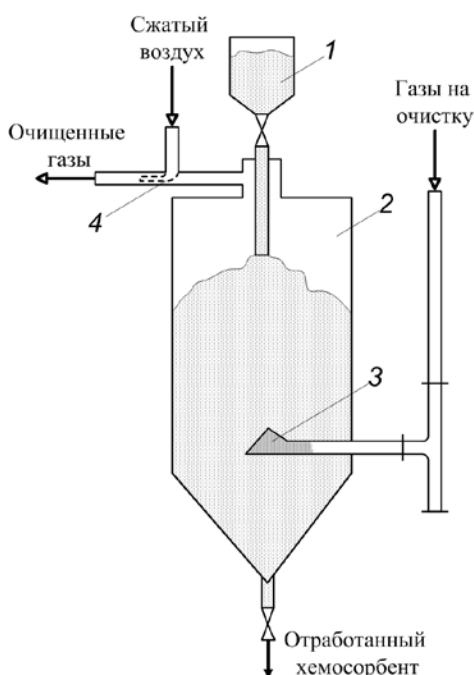


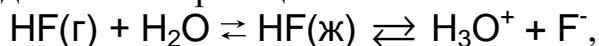
Рис. 1.75. Установка для хемосорбции фтороводорода известняком:  
1 - бункер; 2 - корпус контактного аппарата; 3 - газораспределительное устройство; 4 - пневматический эжектор

пропускании сквозь слой молотого известняка отходящих газов протекает реакция



Отработанный хемосорбент содержит 80...95 % CaF<sub>2</sub> и используется как товарный флюорит. Степень очистки газовых выбросов от HF достигает 95 %.

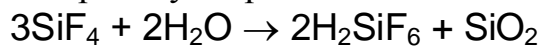
В основе очистки фторсодержащих газов методом мокрой абсорбции лежит улавливание HF и SiF<sub>4</sub> водой в насадочных колоннах, пенных скрубберах, скрубберах Вентури. Газообразный фтороводород растворяется в воде согласно реакции





равновесие которой сильно сдвинуто вправо. Парциальное давление HF над водным раствором очень мало и зависит от температуры и содержания HF в жидкой фазе: при повышении ее до 1 % и выше оршающая жидкость заменяется.

Тетрафторид кремния, улавливаемый из газов при контакте с водой, подвергается гидролизу по реакции



Степень мокрой очистки отходящих газов суперфосфатного производства от HF и SiF<sub>4</sub> в скрубберах Вентури достигает 94,5...97,8%; если же их содержание в атмосферных выбросах превышает предельно допустимый уровень, необходимо применение двухступенчатой очистки. Из разбавленных стоков, образующихся при очистке фторсодержащих газов водой, фторид-ион извлекают неорганическими сорбентами, а образующийся твердый фторид возвращается в цикл производства HF.

При промышленном получении хлора и щелочей методом электролиза хлоридов, переработке руд титана, ниобия, тантала и других металлов методом хлорирующего обжига, получении соляной кислоты и многих хлорорганических соединений в атмосферу выбрасываются газы, содержащие хлор, хлороводород и другие соединения хлора. В последнее время источниками поступления HCl в окружающую среду стали печи сжигания хлорсодержащих промышленных отходов и бытового мусора, содержащего полимерные материалы.

Для очистки атмосферных выбросов от хлора используются абсорбционные и хемосорбционные способы очистки. В качестве сорбентов для хлора используются вода, растворы щелочей, водорастворимых органических соединений и в ряде случаев органические растворители (чаще всего едкий натр, сода, известковое молоко).

Хлороводород выделяется из отходящих газов значительно легче, чем хлор. Его выделение осуществляется за счет абсорбции HCl водой или щелочными растворами в разнообразных аппаратах – насадочных скрубберах, скрубберах Вентури, в аппаратах пенного типа и т.п. Недостатком поглощения хлороводорода водой в насадочных аппаратах является интенсивное образование тумана капельно-жидкой соляной кислоты, улавливание которой происходит менее интенсивно, чем газообразного HCl. Поэтому степень извлечения HCl этим методом не превышает 88%.

Применение для очистки отходящих газов от хлороводорода растворов щелочных реагентов (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CaO) существенно повышает эффективность улавливания и одновременно позволяет

нейтрализовать образующийся сток. Утилизация HCl отходящих газов представляет сложную проблему современной химической промышленности. Предложен ряд направлений возможного использования хлороводорода из промышленных газов, в том числе:

- 1) переработка в концентрированную соляную кислоту;
- 2) получение хлоридов некоторых металлов ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$  и др.);
- 3) использование хлороводорода для целей гидрохлорирования и окислительного хлорирования органических соединений;
- 4) переработка хлороводорода и соляной кислоты в хлор методами простого и каталитического окисления, электролиза и химической конверсии.

Конкретный выбор направления утилизации HCl из продуктов газоочистки решается эколого-экономической оценкой отдельных вариантов.

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Какими показателями характеризуют пористую структуру промышленных адсорбентов?
2. В чем сущность физического поглощения газов и паров в макро-, мезо- и микропорах промышленных адсорбентов?
3. Какие задачи газоочистки можно решать с использованием активных углей, силикагелей, алюмогелей, цеолитов, ионитов?
4. Какую информацию представляет выходная кривая динамического процесса адсорбции?
5. В чем причина низкой эффективности сорбционной очистки слабоконцентрированных нитрозных газов?
6. К чему сводятся преимущества твердофазной хемосорбционной очистки отходящих газов от оксидов азота?
7. Какова область приложения твердофазных хемосорбционных приемов очистки отходящих газов от диоксида серы?
8. Чем ограничено использование адсорбентов в практике очистки отходящих газов от диоксида серы?



9. Назовите твердофазные материалы, способные к фиксации газообразных галогенов и их производных, и охарактеризуйте условия и эффективность использования этих поглотителей.
10. Проведите сопоставительную оценку приемов очистки отходящих газов от сероводорода гидратом окиси железа и активным углем.
11. Перечислите агенты твердофазной некаталитической очистки отходящих газов от сероорганических соединений.



## **Часть 2. Защита гидросферы от промышленных загрязнений (очистка сточных вод)**

---

---

### **2.1. Использование сточных вод в оборотных и замкнутых системах водоснабжения**

#### **2.1.1. Свойства и классификация вод**

Вода играет решающую роль во многих процессах, протекающих в природе, и в обеспечении жизни человека. В промышленности воду используют как сырье и источник энергии, как хладагент, растворитель, экстрагент, для транспортирования сырья и материалов и др.

#### **Ресурсы воды**

Общее количество природной воды на Земле составляет 1386 млн.км<sup>3</sup>. В основном (свыше 97,5 %) это соленые воды. Количество пресной воды – 35 млн.км<sup>3</sup>. Однако подавляющая часть пресной воды является труднодоступной для людей, так как она в основном находится в полярных ледниках и водоносных слоях под землей. В Российской Федерации запас пресных поверхностных вод составляет 40,5 тыс.км<sup>3</sup>. Объем потребления пресной воды в мире достигает приблизительно 3900 млрд.м<sup>3</sup>/год. Около половины этого количества потребляется безвозвратно, а другая половина превращается в сточные воды.

Природная вода – это вода, которая качественно и количественно формируется под влиянием естественных процессов при отсутствии антропогенного воздействия. Ее качественные показатели находятся на естественном среднемноголетнем уровне. В зависимости от степени минерализованности (в г/л) воды делятся: на пресные (с содержанием солей <1), солоноватые (1...10), соленые (10...50) и рассолы (>50). В свою очередь пресные воды подразделяются на воды малой минерализованности (до 200 мг/л), средней минерализованности (200...500 мг/л) и повышенной минерализованности (500...1000 мг/л). По преобладающему аниону все воды делятся на гидрокарбонатные, сульфатные и хлоридные.

Жесткость природных вод обуславливается присутствием в них солей кальция и магния и выражается концентрацией ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в ммоль-экв/л. Различают общую карбонатную и некарбонатную

жесткость. Общая жесткость представляет собой сумму двух последних, карбонатная – связана с присутствием в воде бикарбонатов кальция и магния, а некарбонатная – сульфатов, хлоридов, нитратов кальция и магния.

### **Загрязнение воды**

Вследствие антропогенного воздействия природная вода загрязняется различными веществами, что приводит к ухудшению ее качества. Следует выделить следующие тенденции в изменении качества природных вод под влиянием хозяйственной деятельности людей:

- снижение  $pH$  пресных вод в результате их загрязнения серной и азотной кислотами из атмосферы, увеличение содержания в них сульфатов и нитратов;

- повышение содержания ионов кальция, магния, кремния в подземных и речных водах вследствие вымывания и растворения подкисленными дождевыми водами карбонатных и других гордых пород;

- повышение содержания в природных водах ионов тяжелых металлов, прежде всего свинца, кадмия, ртути, мышьяка и цинка, а также фосфатов ( $>0,1$  мг/л), нитратов, нитритов и др.;

- повышение содержания солей в поверхностных и подземных водах в результате их поступления со сточными водами, из атмосферы и за счет смыва твердых отходов (например, солесодержание многих рек ежегодно повышается на 30...50 мг/л и более);

- из 1000 т городских отходов в грунтовые воды попадает до 8 т растворимых солей;

- повышение содержания в водах органических соединений, прежде всего биологически стойких (ПАВ, пестицидов, продуктов их распада и других токсичных, канцерогенных и мутагенных веществ);

- снижение содержания кислорода в природных водах, прежде всего в результате повышения его расхода на окислительные процессы, связанные с эвтрофикацией водоемов, с минерализацией органических соединений, а также вследствие загрязнения поверхности водоемов гидрофобными веществами и сокращения доступа кислорода из атмосферы (в отсутствие кислорода в воде развиваются восстановительные процессы, в частности, сульфаты восстанавливаются до сероводорода);

- снижение прозрачности воды в водоемах (в загрязненных водах размножаются вирусы и бактерии, возбудители инфекционных заболеваний);

– потенциальная опасность загрязнения природных вод радиоактивными изотопами химических элементов.

Природная вода, подвергаемая антропогенному загрязнению, называется *денатурированной* или *природно-антропогенной*. В случае необходимости перед использованием воды в промышленности ее очищают в соответствии со специфическими требованиями данного производства.

### Классификация вод по целевому назначению

Воду, используемую в промышленности, подразделяют на охлаждающую, технологическую и энергетическую (рис. 2.1).

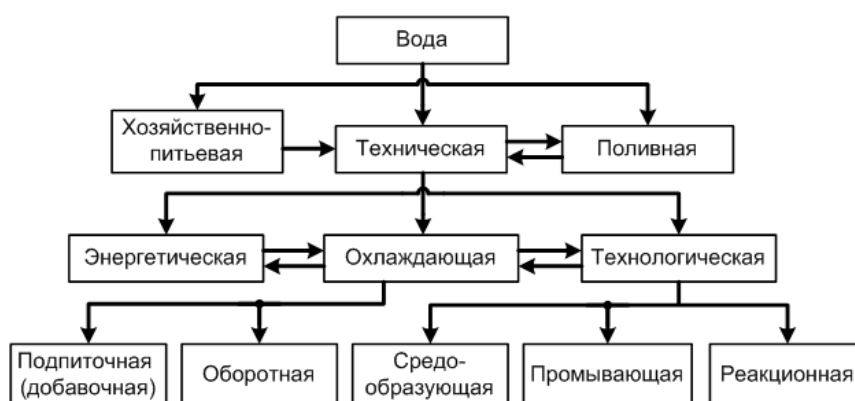


Рис.2.1. Классификация вод по целевому назначению

Вода часто служит для охлаждения жидких и газообразных продуктов в теплообменных аппаратах. В этом случае она не соприкасается с материальными потоками и не загрязняется, а лишь нагревается. В промышленности 65...80% расхода воды потребляется для охлаждения. На крупных химических предприятиях потребление охлаждающей воды достигает 440 млн.м<sup>3</sup>/год. Суммарное количество воды, заключенной в системах охлаждения на предприятиях химической промышленности, составляет 20 млрд.м<sup>3</sup>/год.

Технологическую воду подразделяют на средообразующую, промывающую и реакционную. Средообразующую воду используют для растворения и образования пульп, при обогащении и переработке руд, гидротранспорте продуктов и отходов производства; промывающую – для промывки газообразных (абсорбция), жидких (экстракция) и твердых продуктов и изделий; реакционную – в составе реагентов, а также при азеотропной отгонке и аналогичных процессах. Технологическая вода непосредственно контактирует с продуктами и изделиями.

Энергетическая вода потребляется для получения пара и нагревания оборудования, помещений, продуктов.

## 2.1.2. Обратное водоснабжение

Наиболее перспективный путь уменьшения потребления свежей воды – это создание оборотных и замкнутых систем водоснабжения. Схемы обратного водоснабжения показаны на рис. 2.2. При обратном водоснабжении следует предусмотреть необходимую очистку сточной

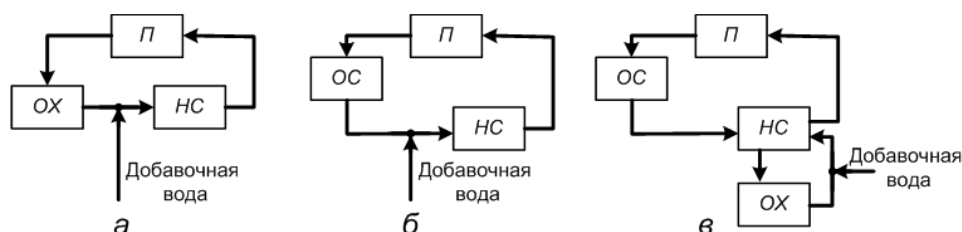


Рис. 2.2. Схемы обратного водоснабжения:

*а* - с охлаждением воды, *б* - с очисткой воды, *в* - с очисткой и охлаждением воды; *П* - производство, *НС* - насосная станция; *ОХ* - охлаждение воды; *ОС* - очистка сточной воды

воды, охлаждение оборотной воды, обработку и повторное использование сточной воды.

В схеме *а* (рис. 2.2) вода является теплоносителем и в процессе использования не загрязняется, а нагревается; перед повторным использованием ее охлаждают в градирнях, прудах. В схеме *б* (рис. 2.2) воду перед повторным использованием очищают изложенными ниже методами. В схеме *в* (рис. 2.2) воду очищают и охлаждают. Во всех случаях свежая вода добавляется лишь на восполнение потерь.

Применение обратного водоснабжения позволяет в 10...50 раз уменьшить потребление природной воды. Например, для выработки 1 т каучука при прямоточном водоснабжении в старых производствах требуется 2100 м<sup>3</sup> свежей воды, а при обратном водоснабжении – лишь 165 м<sup>3</sup>. При обратном водоснабжении значительно уменьшаются капитальные и эксплуатационные затраты. Во всех отраслях промышленности доля оборотной воды непрерывно возрастает. Так, в химической промышленности она возросла до 82,5 %.

Эффективность использования воды в производстве оценивается рядом показателей:

$$\text{процент оборота воды } P_{\text{ОБ}} = \frac{Q_{\text{ОБ}}}{Q_{\text{ОБ}} + Q_{\text{И}}};$$

$$\text{коэффициент использования воды } K_{\text{И}} = \frac{Q_{\text{И}} - Q_{\text{СБ}}}{Q_{\text{И}}} \leq 1;$$

$$\text{кратность использования воды } n = \frac{Q_{\text{СБ}} + Q_{\text{И}} + Q_{\text{С}}}{Q_{\text{И}} + Q_{\text{С}}} \geq 1;$$

безвозвратное потребление воды и ее потери в производстве (в %)

$$K_{\Pi} = \frac{Q_{\text{И}} - Q_{\text{СБ}}}{Q_{\text{ОБ}} + Q_{\text{И}}} \cdot 100,$$

где  $Q_{\text{ОБ}}$  – количество оборотной воды,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_{\text{И}}$  – количество воды, забираемое из источника водоснабжения,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_{\text{СБ}}$  – количество воды, сбрасываемое предприятием,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_{\text{С}}$  – поступление воды из сырья,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Оборотная вода должна соответствовать определенным значениям показателей: карбонатной жесткости, рН, содержанию взвешенных веществ и биогенных элементов, значению ХПК (химическая потребность в кислороде), определяющих термостабильность и интенсивность биообрастаний в оборотной системе и др.

Оборотную воду в основном используют в теплообменной аппаратуре для отведения избыточного тепла. Она многократно нагревается до  $40\text{...}45^{\circ}\text{C}$  и охлаждается в вентилируемых градирнях или брызгальных бассейнах. Значительная часть ее теряется в результате брызгоуноса и испарения. Кроме того, из-за неисправностей и неплотностей теплообменной аппаратуры она загрязняется до определенного предела.

Для предотвращения инкрустации, коррозии, биологического обрастания часть оборотной воды выводят из системы (продувочная вода), добавляя свежую воду из источника или очищенные сточные воды.

При движении воды на поверхностях труб и теплообменников откладывается карбонат кальция по реакции



Растворимость карбоната кальция с ростом температуры уменьшается. Скорость отложения карбоната кальция и других солей не должна превышать  $0,25 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Основным требованием к воде, расходуемой на подпитку оборотных систем, является ограничение и карбонатной, и сульфатной жесткости. Ограничивается также содержание взвешенных веществ, которые тоже отлагаются на отдельных участках трубопроводов и теплообменной аппаратуры.

При содержании в воде растворимых солей щелочных металлов и магния происходит коррозия материалов теплообменных систем, которая растет с температурой. В отсутствие ингибиторов содержание солей в оборотной воде не должно превышать  $2 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Для предотвращения биологического обрастания аппаратов и сооружений в оборотной воде должно быть ограничено содержание органических веществ и соединений биогенных элементов (азота, фосфора), являющихся питательной средой для микроорганизмов. Скорость биологических обрастаний теплообменников не должна



превышать 0,07 г/(м<sup>2</sup>·ч), рост толщины слоя не должен быть выше 0,05 мм в месяц.

Необходимое количество воды для подпитки определяется из материального баланса оборотной системы:

$$Q_{\text{УН}} + Q_{\text{СБ}} + Q_{\text{Ф}} + Q_{\text{ПР.П}} + Q_{\text{ИСП}} = Q_{\text{П}},$$

где  $Q_{\text{УН}}$  – количество воды, уносимой в виде капель ветром на градирнях;  $Q_{\text{СБ}}$  – количество оборотной воды, сбрасываемой для «продувки»;  $Q_{\text{Ф}}$  – потери воды с осадками при фильтровании;  $Q_{\text{ПР.П}}$  – производственные потери воды;  $Q_{\text{ИСП}}$  – количество воды, испаряющейся на градирне;  $Q_{\text{П}}$  – расход подпитывающей воды на компенсацию всех потерь оборотной воды в системе.

Допустимое содержание солей в подпитывающей воде определяется из материального баланса по солям

$$Q_{\text{П}} \cdot c_{\text{П}} = (Q_{\text{УН}} + Q_{\text{СБ}} + Q_{\text{Ф}} + Q_{\text{ПР.П}}) \cdot c_{\text{ОБ}},$$

$$c_{\text{П}} = c_{\text{ОБ}} \cdot \frac{Q_{\text{УН}} + Q_{\text{СБ}} + Q_{\text{Ф}} + Q_{\text{ПР.П}}}{Q_{\text{УН}}},$$

где  $c_{\text{П}}$  – содержание солей в подпитывающей воде;  $c_{\text{ОБ}}$  – общее содержание солей, удаляемое из системы с потерями воды.

Средние потери воды от испарения составляют около 2,5 %; от капельного уноса на градирнях – 0,3...0,5 %; продувочный сброс принимается равным 6...10 %, в среднем 8 %; сумма всех остальных потерь принимается не более 1 % от объема оборотной воды.

При работе без сброса оборотной воды для продувки объем свежей воды для подпитки в три раза меньше, чем при работе со сбросом, но предъявляются более жесткие требования к качеству воды, что связано с увеличением затрат на водоподготовку. Удельные расходы воды и количества сточных вод для некоторых производств приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Удельные расходы воды и объемы сточных вод для некоторых производств химической и нефтехимической промышленности (в м<sup>3</sup> на 1 т продукции)

| Вид продукции                       | Оборотная и последовательно используемая вода | Свежая вода из источника | Всего | Безвозвратное потребление и потери воды | Сточная вода |
|-------------------------------------|---|--------------------------|-------|---|--------------|
| 1                                   | 2   | 3                        | 4     | 5                                       | 6            |
| Сложные удобрения                   | 47  | 5                        | 52    | 2,1                                     | 2,9          |
| Азотные удобрения                   | 57,3  | 4,3                      | 61,6  | 3,4                                     | 0,9          |
| Химические средства защиты растений | 290   | 2                        | 292   | 1,25                                    | 0,75         |

Окончание табл. 2.1

| 1   | 2    | 3   | 4     | 5   | 6    |
|---|------|-----|-------|-----|------|
| Сода:   |      |     |       |     |      |
| – кальцинированная,                               | 120  | 5,0 | 125,0 | 3,0 | 15,2 |
| – каустическая<br>(известковый способ)            | 122  | 1,5 | 123,5 | 1,5 | –    |
| Серная кислота                                    | 72   | 5   | 77    | 2   | 3    |
| Синтетические<br>волокна                          | 2300 | 290 | 2590  | 95  | 195  |
| Поликарбонатные и<br>полиформальдегидные<br>смолы | 1028 | 50  | 1078  | 39  | 11   |
| Нефтехимические<br>производства (на 1 т<br>нефти) | 51   | 1,4 | 52,4  | 1,1 | 0,3  |

### 2.1.3. Технологическая вода и сточные воды

#### Технологическая вода

Качество воды, используемой для технологических процессов, должно быть выше, чем воды, находящейся в оборотных системах. Под качеством воды понимается совокупность физических, химических, биологических и бактериологических показателей, обуславливающих ее пригодность для использования в промышленном производстве.

Качество воды, используемой в производстве, устанавливается в каждом случае в зависимости от ее назначения и требований технологического процесса с учетом состава используемого сырья, применяемого оборудования и особенностей готового продукта производства. В некоторых случаях требуется вода с содержанием солей менее 10...15 г/м<sup>3</sup>, жесткостью, не превышающей 0,01 моль-экв/м<sup>3</sup> и окисляемостью до 2 г О<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>. В табл. 2.2 приведены основные требования к воде, идущей на разные цели.

Таблица 2.2

Требования к качеству технологической воды

| Показатель                             | Промышленность<br>химических<br>волокон | Химическая<br>промышленность<br>(наиболее<br>жесткие<br>требования) | Производство<br>неотбеленной<br>целлюлозы | Производство<br>пара в котлах<br>высокого<br>давления<br>(5...10 МПа) |
|--|---|---|---|---|
| 1                                      | 2                                       | 3   | 4   | 5   |
| Общая жесткость,<br>экв/м <sup>3</sup> | 0,035                                   | 0,012   | 5   | 0,035   |
| Содержание, г/м <sup>3</sup> :         |   |   |   |   |

| 1                              | 2    | 3         | 4      | 5      |
|--------------------------------|------|-----------|--------|--------|
| – диоксида кремния             | –    | 50        | 50     | 0,7    |
| – меди                         | –    | –         | –      | 0,05   |
| – марганца                     | 0,03 | –         | –      | –      |
| – железа                       | 0,05 | 0.1       | 0.1    | 0,05   |
| – кислорода                    | –    | –         | –      | 0,3    |
| – нитратов и нитритов          | –    | –         | –      | –      |
| pH                             | 7-8  | 6,2...8,3 | 6...10 | 8...10 |
| Цветность, град                | 5    | 20        | –      | –      |
| Окисляемость, г/м <sup>3</sup> | 4    | –         | –      | –      |

### Сточные воды

В производстве образуются различные категории сточных вод. Сточная вода – это вода, бывшая в бытовом, производственном или сельскохозяйственном употреблении, а также прошедшая через какую-либо загрязненную территорию. В зависимости от условий образования сточные воды делятся на бытовые, или хозяйственно-фекальные (БСВ), атмосферные (АСВ) и промышленные (ПСВ).

Хозяйственно-бытовые воды – это стоки душевых, бань, прачечных, столовых, туалетов, от мытья полов и др. Они содержат примеси, из которых примерно 58 % органических веществ и 42 % минеральных. К атмосферным относятся сточные воды, образующиеся в результате выпадения атмосферных осадков и стекающие с территорий предприятий. Они загрязняются органическими и минеральными веществами.

Промышленные сточные воды представляют собой жидкие отходы, которые возникают при добыче и переработке органического и неорганического сырья. В технологических процессах источниками сточных вод являются:

- 1) воды, образующиеся при протекании химических реакций (они загрязнены исходными веществами и продуктами реакций);
- 2) воды, находящиеся в виде свободной и связанной влаги в сырье и исходных продуктах и выделяющиеся в процессах переработки; промывные воды после промывки сырья, продуктов и оборудования;
- 3) маточные водные растворы;
- 4) водные экстракты и абсорбенты;
- 5) воды охлаждения;
- 6) другие сточные воды: воды с вакуум-насосов, конденсаторов смешения, систем гидрозолоудаления, после мытья тары, оборудования и помещений.

Количество и состав сточных вод зависит от вида производства (см., например, табл. 2.3).

Таблица 2.3

Количество и характеристика сточных вод отдельных производств

| Производство   | Количество сточных вод, м <sup>3</sup> /т продукции | Загрязняющие вещества   | Концентрация, кг/м <sup>3</sup>                |
|--|---|---|--|
| 1  | 2   | 3   | 4  |
| Аммиака:<br>– после медно-аммиачной очистки                    | 0,17  | аммиак,<br>медь,<br>бикарбонат натрия,<br>аммиак,   | 0,5<br>1,0<br>до 1,0<br>0,8                    |
| – с газовым конденсатом  | 1,17  | метанол и формальдегид,<br>диоксид углерода   | 0,10<br>0,16                                   |
| Азотной кислоты (после продувки котлов-утилизаторов)           | 0,06  | сульфат кальция   | 3,0  |
| Аммиачной селитры (после ионообменного обессоливания воды)     | 0,08  | хлорид кальция,<br>хлорид магния,<br>хлорид натрия  | 2,62<br>1,56<br>5,46                           |
| Карбамида (с конденсатором сокового пара)                      | 0,45  | Аммиак,<br>карбамид   | 0,1<br>1,0                                     |
| Метанола (кубовый остаток после установок ректификации)        | 1,0   | метанол   | 2,0  |
| Кальцинированной соды  | 8,0...10  | взвешенные частицы,<br>хлорид кальция,<br>сульфат кальция,<br>хлорид натрия                       | 20...24<br>110...120<br>0,70...0,80<br>50...60 |
| Двойного суперфосфата:<br>– после упаривания фосфорной кислоты | 0,06...0,08   | гидроксид аммония,<br>кремнефтористоводородная кислота,<br>фосфорная кислота,<br>сульфат кальция; | 0,10...0,12<br>0,10<br>0,5...0,6<br>60...70    |
| – после грануляции   | 0,08...0,12   | взвешенные частицы,<br>фосфорная кислота,<br>кремнефтористоводородная кислота                     | 35...40<br>3...4<br>23...25                    |
| Нитроаммофоски (после получения расплава аммиачной селитры)    | 16...18   | взвешенные частицы,<br>содержание солей   | 0,1...0,2<br>0,6                               |
| Соляной кислоты  | 12...13   | соляная кислота   | до 0,01  |
| Нитробензола   | 50...60   | серная и азотная кислоты,<br>нитробензол  | 1,0...2,0                                      |
| Адипиновой кислоты   | 8,0   | нитрат натрия,<br>оксалат натрия  | 5,0<br>1.5                                     |

Сточные воды загрязнены различными веществами. Комитетом ВОЗ рекомендована следующая классификация химических загрязнителей воды:

- 1) биологически нестойкие органические соединения;

- 2) малотоксичные неорганические соли;
- 3) нефтепродукты;
- 4) биогенные соединения;
- 5) вещества со специфическими токсичными свойствами, в том числе тяжелые металлы;
- 6) биологически жесткие неразлагающиеся органические синтетические соединения.

Сточные воды многих производств кроме растворимых неорганических и органических веществ содержат коллоидные примеси, а также взвешенные грубодисперсные и мелкодисперсные примеси, плотность которых может быть больше или меньше плотности воды. Концентрация примесей весьма различна. Классификация их по фазово-дисперсному состоянию дана в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Классификация примесей по их фазово-дисперсному состоянию

| Группа                      | Размер частиц, мкм | Краткая характеристика   |
|-----------------------------|--------------------|--|
| <i>Гетерогенные системы</i> |                    |  |
| I – взвеси                  | $10^{-1}$          | Суспензии и эмульсии, обуславливающие мутность воды, а также микроорганизмы и планктон                   |
| II–коллоидные растворы      | $10^{-1}-10^{-2}$  | Золи и растворы высокомолекулярных соединений, обуславливающие окисляемость и цветность воды             |
| <i>Гомогенные системы</i>   |                    |  |
| III – молекулярные растворы | $10^{-2}-10^{-3}$  | Газы, растворимые в воде, органические вещества, придающие ей запахи и привкусы                          |
| IV–ионные растворы          | $10^{-3}$          | Соли, основания, кислоты, обуславливающие минерализованность, жесткость, щелочность или кислотность воды |

Имеется несколько путей уменьшения количества загрязненных сточных вод, среди них следующие:

- 1) разработка и внедрение безводных технологических процессов;
- 2) усовершенствование существующих процессов;
- 3) разработка и внедрение совершенного оборудования;
- 4) внедрение аппаратов воздушного охлаждения;
- 5) повторное использование очищенных сточных вод в оборотных и замкнутых системах.

#### **2.1.4. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий**

Основным направлением уменьшения сброса сточных вод и загрязнения ими водоемов является создание замкнутых систем водного хозяйства.

Под замкнутой системой водного хозяйства промышленного предприятия понимается система, в которой вода используется в производстве многократно без очистки или после соответствующей обработки, исключающей образование каких-либо отходов и сброс сточных вод в водоем.

Под замкнутой системой водного хозяйства территориально-промышленного комплекса, района или центра понимается система, включающая использование поверхностных вод, очищенных промышленных и городских сточных вод на промышленных предприятиях, на сельскохозяйственных полях орошения при выращивании сельскохозяйственных культур, для полива лесных угодий, для поддержания объема (уровня) воды водоемов, исключающие образование каких-либо отходов и сброс сточных вод в водоем.

Подпитка замкнутых систем свежей водой допускается в случае, если недостаточно очищенных сточных вод для восполнения потерь воды в этих системах, допускается также расход ее в технологических операциях, в которых очищенные сточные воды не могут быть использованы по условиям технологии или гигиены. Свежая вода расходуется только для питьевых и хозяйственно-бытовых целей.

Необходимость создания замкнутой системы производственной водоснабжения обусловлена дефицитом воды, исчерпанием ассимилирующей разбавляющей и самоочищающей способности водного объекта, принимающего сточные воды, экономическими преимуществами перед очисткой сточных вод до требований, предъявляемых водоохраным контролем. Таким образом, организация замкнутой системы целесообразна, когда затраты на рекуперацию воды и веществ, выделенных из сточной воды и переработанных до товарного продукта или вторичного сырья, ниже суммарных затрат на водоподготовку и очистку сточной воды до показателей, позволяющих сбрасывать ее в водные объекты без загрязнения последних. В тех случаях, когда создание замкнутых систем водоснабжения диктуется экологическими требованиями, должен быть выбран оптимальный вариант с экономической точки зрения.

Замкнутая система должна обеспечить рациональное использование воды во всех технологических процессах, максимальную рекуперацию компонентов сточных вод, сокращение капитальных и эксплуатационных затрат, нормальные санитарно-гигиенические условия работы обслуживающего персонала, исключение загрязнения окружающей среды.

Очищенная вода должна соответствовать качеству технологической воды. Замкнутые системы водного хозяйства следует вводить на вновь строящихся предприятиях и на действующих,

подлежащих реконструкции. В последнем случае внедрение замкнутых систем идет постадийно с постоянным увеличением оборотного водоснабжения по мере усовершенствования технологии.

Оценка систем водного хозяйства проводится путем сравнения следующих показателей:

- удельного расхода воды, в том числе свежей, на единицу продукции;
- удельного расхода реагентов, электроэнергии и тепла на очистку сточных вод;
- абсолютного количества товарного продукта, получаемого при очистке сточных вод;
- экономических показателей, в том числе себестоимости, рентабельности, фондоемкости, фондоотдачи;
- годового экономического эффекта по приведенным затратам;
- экологических показателей (о закачке жидких отходов в подземные горизонты, складировании твердых отходов, о состоянии воздушного бассейна, флоры и фауны).

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Объясните, как изменяется качество воды под влиянием хозяйственной деятельности людей?
2. Какие имеются схемы оборотного водоснабжения предприятий и какими показателями оценивается эффективность использования в них воды?
3. Что такое сточные воды и какие имеются пути уменьшения их образования?
4. Что такое замкнутая система водооборота?
5. Дайте характеристику сточных вод отдельных производств.



## **2.2. Методы очистки сточных вод**

Для создания замкнутых систем водоснабжения промышленные сточные воды подвергаются очистке механическими, химическими, физико-химическими, биологическими и термическими методами до необходимого качества, зависящего от вида производства. Классификация методов очистки приведена на рис. 2.3.

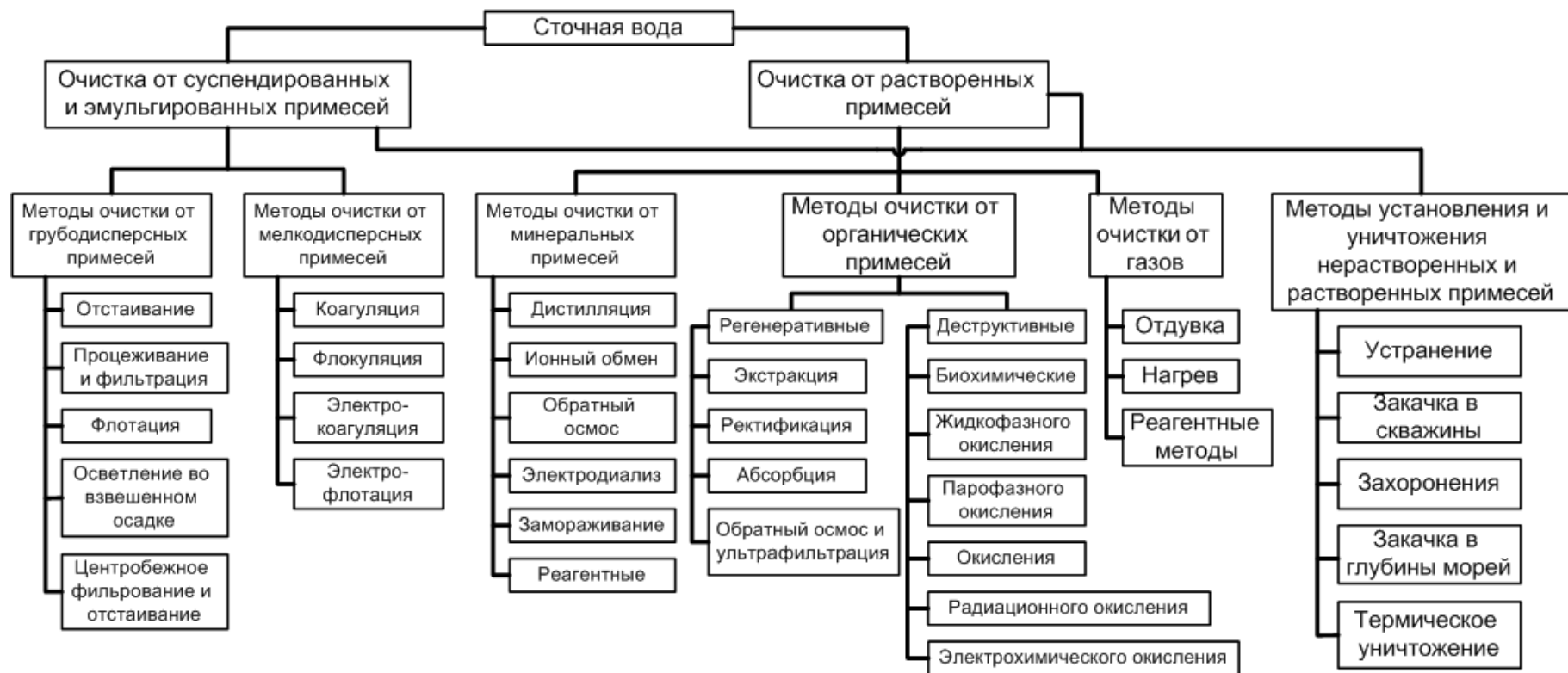


Рис. 2.3. Классификация основных методов обезвреживания сточных вод химических производств



Указанные методы очистки подразделяются на рекуперационные и деструктивные. Деструктивные методы очистки сводятся к разрушению загрязняющих воду веществ путем их окисления или восстановления. Образующиеся при этом продукты распада удаляются из воды в виде осадков или газов или остаются в ней в форме растворимых минеральных солей.

Регенеративные методы, позволяют извлекать и утилизировать содержащиеся в воде ценные вещества. Регенеративные методы далеко не всегда очищают воду до такого состояния, в котором ее можно сбрасывать в водоемы. В этих случаях воду доочищают деструктивными методами.

Выбор метода очистки и конструктивное оформление процесса производится с учетом следующих факторов:

- 1) санитарных и технологических требований, предъявляемых к качеству очищенных вод с учетом дальнейшего их использования;
- 2) количества сточных вод;
- 3) наличия у предприятия необходимых для процесса обезвреживания энергетических и материальных ресурсов (пара, топлива, сжатого воздуха, электроэнергии, реагентов, сорбентов), а также необходимой площади для сооружения очистных установок;
- 4) эффективности процесса обезвреживания.

Типовая схема очистки промышленных сточных вод представлена на рис. 2.4.

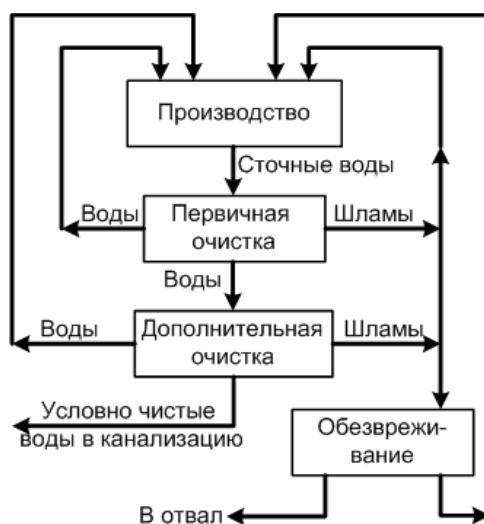


Рис. 2.4. Типовая схема очистки промышленных сточных вод

Во всех случаях очистки стоков первой стадией этого процесса является механическая очистка, предназначенная для освобождения воды от взвешенных и коллоидных частиц. Следующим этапом очистки

является удаление из воды растворенных в ней химических соединений физико-химическими, химическими, электрохимическими, биологическими методами. Во многих случаях приходится применять комбинации из указанных методов.

В качестве наиболее употребительных методов следует указать следующие:

- для удаления грубодисперсных частиц – отстаивание, флотация, фильтрация, осветление, центрифугирование;
- для удаления мелкодисперсных и коллоидных частиц – коагуляция, флокуляция, электрические методы осаждения;
- для очистки от неорганических соединений – дистилляция, ионный обмен, обратный осмос, реагентное осаждение, методы охлаждения, электрические методы;
- для очистки от органических соединений – экстракция, абсорбция, флотация, ионный обмен, реагентные методы; биологическое окисление; жидкофазное окисление, озонирование, хлорирование, электрохимическое окисление;
- для очистки от газов и паров – отдувка, нагрев, реагентные методы;
- для уничтожения вредных веществ – термическое разложение.

Создание на предприятиях эффективно действующих установок для очистки сточных вод позволяет решить две важные задачи: предупредить загрязнение природных вод промышленными стоками и сократить потребление воды, так как возврат очищенной воды в производственный цикл позволяет организовать кругооборот воды на предприятии.

### **2.3. Осветление сточных вод**

Сточные воды многих химических производств наряду с растворенными веществами содержат взвешенные грубодисперсные и мелкодисперсные примеси (твердые или жидкие). Грубодисперсные частицы образуются также в результате коагуляции и флокуляции коллоидных и мелкодисперсных частиц или коалесценции частиц эмульсии.

Сравнительно крупные частицы размером более 15...20 мм задерживают методом процеживания. С этой целью на пути движения сточных вод устанавливают разнообразные решетки, сетки и сита, которые могут быть подвижными или неподвижными; нередко их совмещают с дробилками для измельчения загрязнений.

После процеживания сточные воды поступают в песколовки, предназначенные для отделения более мелких минеральных примесей с относительно высокой плотностью. При движении воды в резервуаре песколовки на ее дно оседают взвеси с диаметром зерен более 0,25 мм. Осадок с помощью скребков перемещается в специальный бункер, откуда удаляется на песковую площадку для обезвреживания.

Песколовки облегчают условия работы сооружений для дальнейшей очистки стоков (отстойников, метантенков и др.) и устанавливаются в схемах, пропускающих не менее 100 м сточных вод в сутки.

Для выделения более мелких органических и минеральных взвесей используется метод отстаивания с использованием первичных и вторичных отстойников: первичные устанавливают перед сооружениями для биологической очистки воды, вторичные используют для осветления сточных вод, уже прошедших биологическую очистку. Отстойники могут быть использованы как самостоятельные очистные сооружения, если по санитарным условиям достаточно выделять из сточных вод только механические загрязнения.

Для отделения масел, жиров, смол, нефти и нефтепродуктов, плавающих на поверхности сточных вод, используют различной конструкции маслоуловители, жироловки, нефтеловушки. Отделение этих примесей от воды осуществляется за счет разности их плотностей.

Грубодисперсные примеси выделяют из сточных вод чаще всего отстаиванием, флотацией и другими методами, мелкодисперсные – фильтрованием, осаждением в центробежном поле и т. д. Выбор методов осветления сточных вод зависит от дисперсности частиц, физико-химических свойств и концентрации примесей, расхода сточных вод, требуемой степени осветления и т. д.

Методы осветления позволяют извлекать ценные примеси и использовать их затем в производстве. С помощью этих методов из сточных вод удаляются обычно взвешенные частицы крупностью более 5...10 мкм. Для удаления частиц меньшей крупности необходимо предварительное их укрупнение коагуляцией, флокуляцией или другими методами.

Необходимо отметить, что механическая очистка сточных вод редко используется сама по себе, но обычно является предварительной и предшествует более глубоким методам очистки стоков.

### **2.3.1. Отстаивание**

Закономерности движения тел в жидкости под действием сил тяжести позволяют определить скорость свободного осаждения частиц монодисперсной взвеси при условии, что частицы в процессе осаждения не слипаются и не изменяют своей формы и размеров. Свободное осаждение частиц, а точнее, слабо стесненное осаждение, проявляется на первых этапах процесса отстаивания, а по мере увеличения концентрации частиц все большее значение приобретает стесненное осаждение частиц и даже коллективное осаждение при значительном сгущении.

Несмотря на то, что процесс стесненного осаждения изучался многими исследователями, в настоящее время отсутствуют уравнения, позволяющие рассчитывать скорость стесненного осаждения с учетом всех влияющих на нее факторов. Для определения скорости стесненного осаждения чаще всего предлагается вносить поправки в уравнение скорости свободного осаждения. Так, вместо плотности жидкости  $\rho_{\text{ж}}$  предлагается подставлять величину средней плотности взвеси  $\rho_{\text{ср}}$  или вводить поправку, заменяющую эффективную плотность  $(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})$  выражением  $[\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}} \cdot (1 + C)]$ , где  $\rho_{\text{т}}$ ,  $C$  – плотность и концентрация твердого вещества в жидкости.

По другому уравнению, зная скорость свободного осаждения  $U_0$  и концентрацию твердых частиц  $C$ , можно рассчитать скорость стесненного осаждения

$$U_{\text{ст}} = U_0 \cdot (1 - C)^4.$$

Имеются и другие уравнения для определения скорости стесненного осаждения частиц.

Взвеси сточных вод состоят, как правило, из полидисперсных частиц скорости осаждения которых различны и, кроме того, изменяются в процессе отстаивания вследствие коагуляции частиц.

Кинетика осаждения полидисперсной взвеси в цилиндре представлена на рис. 2.5. Через некоторый промежуток времени в

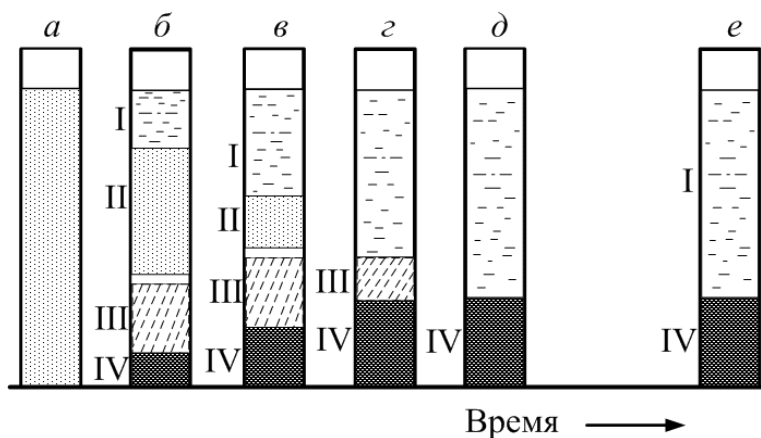


Рис. 2.5. Кинетика осаждения полидисперсной взвеси.

верхней части сосуда появляется граница между осветленной водой и взвесью. Наряду с образованием области осветленной воды (I) и области свободного осаждения (II), на дне сосуда образуется область осадка (IV), в котором идет медленное уплотнение частиц. В очень разбавленных взвесьях граница осветленной воды становится четкой только через значительный промежуток времени. Над осадком образуется слой сгущенной суспензии, в которой твердые частицы

расположены настолько тесно, что дальнейшее уплотнение возможно только путем вытеснения жидкости из пространства между частицами (область стесненного осаждения *III*). Выше находится переходная зона, плотность которой уменьшается снизу вверх. Эта зона затем переходит в область *II*.

По мере отстаивания объемы осветленной зоны в области *I* и осадка в области *IV* возрастают, при этом одновременно происходит уплотнение осадка в области *III*. Отстаивание заканчивается, когда область *II* и переходная зона исчезают и завершается уплотнение сгущенной суспензии, что соответствует полному разделению ее на осадок и осветленную жидкость (рис. 2.5 *e*).

Необходимо отметить, что в процессе непрерывного отстаивания в аппарате образуются те же области, но, в отличие от периодического отстаивания, эти области не изменяются по высоте.

### **2.3.2. Типы отстойников**

Для осветления сточных вод химических производств широко применяют отстойники периодического и непрерывного действия.

Отстойники периодического действия используют обычно при небольших расходах или периодическом поступлении сточных вод. Эти отстойники представляют собой металлические или железобетонные резервуары с коническим днищем. Отстойник заполняют сточной водой, и после отстаивания взвеси производят декантацию осветленной воды с помощью сифонной трубки или кранов, расположенных выше уровня осадка. Осадок выгружают вручную или с помощью специальных спускных устройств. При небольшом количестве грубодисперсных примесей в сточной воде осадок удаляют после нескольких декантаций. Размеры отстойника определяются в основном расходом сточных вод и кинетикой осаждения взвешенных частиц.

При выделении из сточных вод нефтепродуктов отстойники (маслоотстойники, нефтеловушки) часто оборудуются устройствами для подогрева сточной воды. Для осветления сточных вод, содержащих трудноосаждающиеся примеси, используют в некоторых случаях отстойные пруды.

#### **Отстойники непрерывного действия**

Отстойники непрерывного действия (вертикальные, горизонтальные и радиальные) применяют при больших расходах сточных вод.

Вертикальный отстойник – цилиндрический (или квадратный в плане) резервуар с коническим днищем диаметром до 10 м и производительностью до 3000 м<sup>3</sup>/сутки.

Движение осветляемой воды в отстойниках происходит в вертикальном направлении – снизу вверх. Взвешенные частицы оседают в восходящем потоке воды. Расчетная скорость восходящего потока, как правило, не должна превышать 0,5...0,6 мм/с. Высота зоны осаждения обычно составляет 4...5 м.

Сбор осветленной воды осуществляется с помощью периферийных или радиальных желобов через водослив. Осадок, выпавший в иловую часть отстойника, удаляется по иловой трубе. Уклон конической части днища отстойника принимается не менее 45...50° для обеспечения сползания осадка.

Эффективность осветления воды в вертикальном отстойнике обычно на 10...20 % ниже, чем в горизонтальном или радиальном. Вертикальные отстойники применяют в качестве первичных отстойников на общезаводских очистных сооружениях.

Расчет вертикальных отстойников проводят с помощью кривой осаждения взвеси в соответствии с заданной степенью осветления воды по известным методикам.

Горизонтальные отстойники – прямоугольные резервуары глубиной  $H = 1,5...4,0$  м, длиной 8...12 м (в некоторых случаях до 20 м), с шириной коридора 3...6 м. Удаление осадка из них осуществляется гидравлическим методом или движущимися скребками. Равномерное распределение сточной воды по ширине отстойника производится с помощью поперечного лотка с водосливом или дырчатой перегородки. Для задержания плавающих веществ у выхода из отстойника устанавливают перегородку, погруженную в воду на 0,25 м.

Горизонтальная скорость движения воды в отстойнике обычно не превышает 10...12 мм/с, а для сточных вод, содержащих хлопья гидроксидов алюминия и железа, составляет 3...5 мм/с. Продолжительность отстаивания воды от 1 до 3 ч. При коагуляционной очистке сточных вод эти отстойники снабжают встроенными камерами хлопьеобразования.

Для расчета горизонтальных отстойников используют данные о кинетике выпадения взвеси с учетом заданного эффекта задержания взвешенных веществ в отстойнике.

Радиальный отстойник – обычно круглый в плане резервуар диаметром до 60 м (иногда более 100 м), вода в котором движется по радиусу от центра к периферии. Скорость движения воды переменная: в центре – максимальная, на периферии – минимальная. Сточная вода через центральное распределительное устройство поступает в отстойник, а осветленная вода собирается в круговой периферийный желоб.

Радиальные отстойники оборудуются подвижными фермами с центральным или периферийным приводом. Глубина проточной части отстойника составляет 1,5...5 м, а отношение диаметра к глубине – от 6 до 30. Продолжительность пребывания сточной воды в отстойнике составляет 1,5...2 ч.

Существенный недостаток описанных отстойников – наличие повышенных скоростей в зоне впуска воды, что обуславливает неэффективное использование значительной части объема отстойника.

Этот недостаток в значительной мере устранен в радиальных отстойниках с периферийной подачей сточной воды. Сбор осветленной воды осуществляется с помощью кольцевого лотка, расположенного в центре отстойника. Данная конструкция отстойника позволяет в 1,3...1,5 раза повысить его пропускную способность.

На эффективность осветления сточных вод отрицательное влияние оказывает струйность потока. Этот недостаток устранен в конструкции радиального отстойника с подвижным водораспределительным и водосборным устройствами – эффективность осветления возрастает на 10...20 %.

Радиальные отстойники применяют на локальных установках, а также в качестве первичных и вторичных отстойников на биологических очистных сооружениях.

Применение радиальных отстойников большой производительности (диаметром более 30...50 м) связано с отрицательным воздействием ветровой нагрузки на зеркало воды в отстойнике, т. е. на эффективность осветления воды. Под действием ветровой нагрузки нарушается гидравлический режим, так как происходит неравномерное удаление осветленной воды через водосливную стенку отстойника.

Отстойники оборудуют в основном следующими типами водосливов:

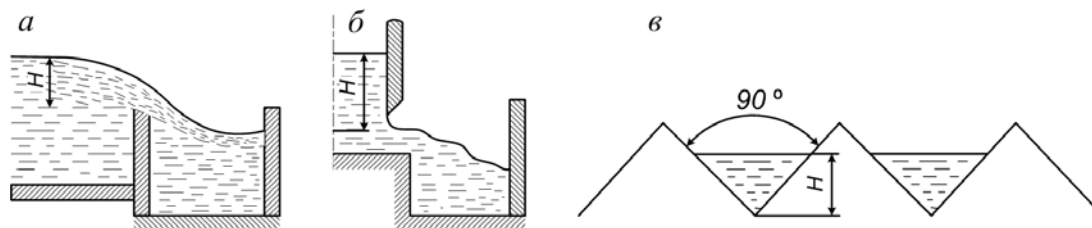


Рис. 2.6. Конструкции водосливных устройств отстойников:  
а - прямоугольный незатопленный с тонкой стенкой; б - с затопленными отверстиями; в - зубчатый

- 1) прямоугольным незатопленным с тонкой стенкой (рис. 2.6 а);
- 2) с затопленными отверстиями (рис. 2.6 б);

3) зубчатым (рис. 2.6 в).

Следует отметить, что увеличение ветровой нагрузки на зеркало воды в отстойнике меньше всего влияет на расход воды через водослив с затопленными отверстиями.

Расчет радиальных отстойников аналогичен расчету горизонтальных отстойников.

### Отстаивание в тонком слое жидкости

Поиски методов интенсификации и удешевления процесса отстаивания привели к созданию седиментационных аппаратов, отличающихся от обычных малой глубиной зоны осаждения. Малая глубина отстойников обеспечивает осветление воды в течение 4...10 мин. Это позволяет резко уменьшить объем отстойника. По конструкции отстойники с малой глубиной зоны осаждения подразделяются на трубчатые и пластинчатые (многоярусные).

Рабочим элементом трубчатого отстойника является трубка диаметром 2,5...5 см, длиной 60...100 см. Возможно применение трубок квадратного, шестиугольного, ромбовидного сечения и др. В настоящее время используют две конструкции трубчатых отстойников: с малым наклоном труб и крутонаклонные.

Равномерное распределение сточной воды по сечению трубок и ламинарность потока воды в трубках обуславливают эффективность осветления сточных вод в трубчатых отстойниках.

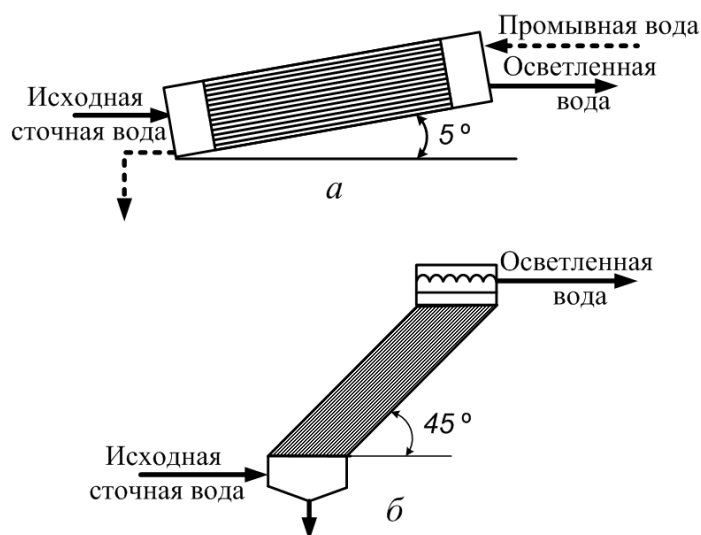


Рис.1.7. Схема трубчатого отстойника:  
а - с малым наклоном труб, б - крутонаклонного

Трубчатый отстойник с малым наклоном труб (рис. 2.7 а) работает по периодическому режиму, включающему периоды осветления воды и промывки трубок. Эти отстойники целесообразно



применять для осветления сточных вод, содержащих небольшое количество взвешенных веществ, и монтировать в схеме с зернистыми фильтрами. Промывка загрузки фильтра совмещается с промывкой трубок отстойника. Небольшой наклон трубок ( $5^\circ$  в направлении движения промывной воды) обеспечивает полноту удаления осадка.

Эффективность осветления составляет 80...85 %. Отстойники рекомендуется использовать при расходах сточных вод 100...10000 м<sup>3</sup>/сутки.

Гидравлические нагрузки на трубчатый отстойник зависят от характеристики взвешенных частиц и составляют 6...10 м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup> входного сечения трубок, что в 2...4 раза превышает нагрузки на обычный отстойник. Продолжительность работы отстойника практически не зависит от диаметра трубок, но возрастает с увеличением их длины

В крутонаклонном трубчатом отстойнике (рис. 2.7 б) осветляемая вода проходит через трубки, расположенные под углом 45...60 °, снизу вверх, а осадок сползает по дну трубок вниз и скапливается в шламовом пространстве. Непрерывное удаление осадка исключает необходимость промывки трубок.

В настоящее время за рубежом эти отстойники изготавливают в виде стандартных блоков из полихлорвинилового или полистирольного пластика. Обычно применяют блоки длиной около 3 м, шириной 0,75 м и высотой около 0,5 м. Размер трубчатого элемента в поперечном сечении составляет 5×5 см. Указанная конструкция позволяет легко монтировать блоки в существующих отстойниках вертикального, горизонтального или радиального типов.

Крутонаклонные трубчатые отстойники используются в качестве первичных осветлителей, с успехом заменяя устаревшие конструкции отстойников. Реконструкция существующих отстойников путем установки в них трубчатых элементов не требует больших затрат и обходится примерно в 15 тыс. у. е. на 3,5...4,0 тыс. м<sup>3</sup> сточной воды в сутки. Весьма перспективно применение трубчатых отстойников в качестве вторичных осветлителей. Малое время отстаивания активного ила в этих отстойниках позволяет избежать недостатков, присущих другим отстойникам: длительного времени пребывания активного ила в анаэробных условиях и обусловленного этим снижения физиологической активности микроорганизмов.

В настоящее время трубчатые отстойники применяют на очистных сооружениях производительностью до 170 тыс. м<sup>3</sup> сточной воды в сутки. Крутонаклонные трубчатые отстойники перспективны для очистки сточных вод от нефтепродуктов.

Пластинчатые отстойники (рис. 2.8) состоят из ряда параллельно установленных наклонных пластин. Вода в отстойнике движется параллельно пластинам. Взвешенные частицы осаждаются на пластины и сползают в шламовое пространство. В зависимости от схемы движения в отстойнике осветляемой воды и выпавшего осадка существует три типа отстойников:

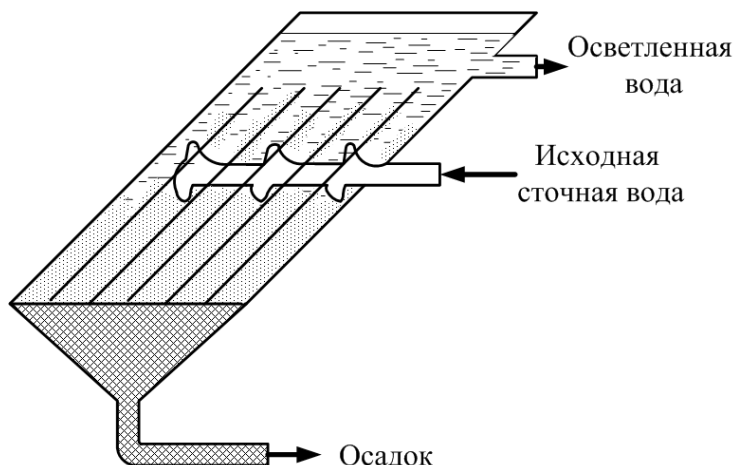


Рис.2.8. Схема пластинчатого (многоярусного) отстойника

- 1) прямоточные, в которых направление движения воды и осадка совпадают;
- 2) противоточные, в которых вода и осадок движутся навстречу;
- 3) перекрестные, в которых вода движется перпендикулярно направлению движения осадка.

Следует отметить, что широкое распространение получили противоточные отстойники как наиболее производительные.

Пластинчатые отстойники могут использоваться в качестве вторичных осветлителей на сооружениях биологической очистки. Они получили широкое распространение для выделения из сточных вод нефтепродуктов.

Достоинства трубчатых и пластинчатых отстойников заключаются в их экономичности вследствие небольшого строительного объема, возможности использования пластмасс, что упрощает их изготовление, уменьшает массу и, следовательно, снижает стоимость. Возможность реконструкции существующих отстойников путем установки трубчатых или пластинчатых блоков – также важное достоинство.

### **2.3.3. Осветление воды в слое взвешенного осадка**

Широкое распространение получил метод осветления воды путем пропускания ее через слой ранее выпавшего осадка со скоростью, обеспечивающей поддержание осадка во взвешенном

(псевдооживленном) состоянии. В настоящее время этот метод рассматривается как коагуляционный, а механизм процесса очистки – как процесс массопередачи мелких частиц из воды на поверхность осадка, т. е. более крупных частиц. Вследствие протекания процессов коагуляции, сорбции, кристаллизации значительно интенсифицируется процесс выделения частиц из воды и повышается эффективность ее осветления.

Осветлители с взвешенным слоем осадка широко используются в практике очистки природных вод, а в последнее время – для осветления сточных вод (производств полистирола, вискозы, бумаги и др.). Применение их позволяет, по сравнению с отстойниками, значительно повысить степень очистки воды при одновременном уменьшении строительного объема сооружений в 2...4 раза.

Использование осветлителей практически целесообразно для очистки сточных вод, содержащих грубодисперсные, мелкодисперсные и коллоидные частицы, характеризующиеся малой агрегативной устойчивостью, или сточных вод после обработки коагулянтами. Осветлители обычно применяют при расходе воды более 5000 м<sup>3</sup>/сутки.

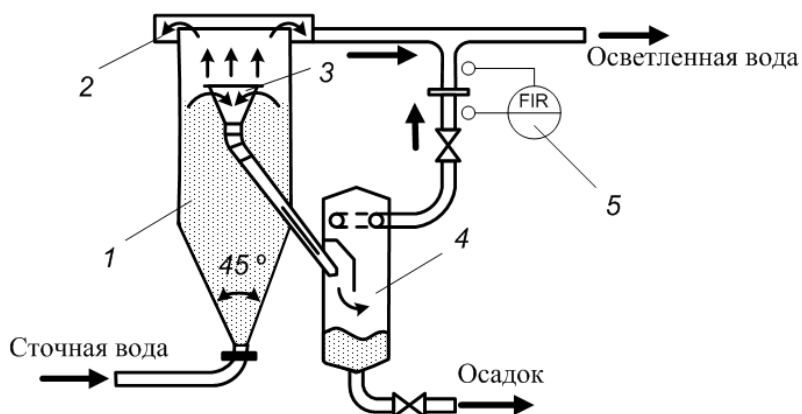


Рис.2.9. Схема осветлителя с выносным осадкоуплотнителем:  
 1 - осветлитель; 2 - круговой желоб; 3 - центральная труба для отвода осадка,  
 4 - осадкоуплотнитель, 5 - расходомер

Схема осветлителя с выносным осадкоуплотнителем приведена на рис. 2.9. Сточная вода после смешения с реагентами (коагулянтами и др.) проходит через воздухоотделитель и поступает в осветлитель 1. Вода движется снизу вверх через слой взвешенного осадка, который находится в состоянии динамического равновесия вследствие равенства скорости восходящего потока воды и средней скорости стесненного осаждения хлопьев осадка. Осветленная вода протекает в круговой желоб 2, из которого отводится на сооружения доочистки или на повторное использование. Образующийся избыточный осадок по

центральной трубе 3 непрерывно перетекает в осадкоуплотнитель 4. Уплотненный осадок отводится снизу, а вода – сверху.

Частицы контактной среды находятся в состоянии стесненного осаждения. Изменение скорости восходящего потока воды приводит к изменению концентрации частиц во взвешенном слое. Благодаря этому взвешенный слой может существовать в широком диапазоне скоростей восходящего потока. В случае приближения скорости потока воды к скорости свободного осаждения частиц слой расплывается и частицы выносятся с водой. Эта скорость является верхним пределом существования взвешенного слоя. Минимальная скорость потока воды, при которой не образуется взвешенного слоя и частицы оседают на дно осветлителя, является нижним пределом существования взвешенного слоя.

Таким образом, явление стесненного осаждения определяет работу осветлителей с взвешенным слоем осадка.

Процесс очистки воды в осветлителях со взвешенным слоем осадка может быть описан уравнением

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{6K_M \cdot C_{OC} \cdot H}{d_{\text{Э}} \cdot C_{\text{ХЛ}} \cdot w}},$$

где  $C$  и  $C_0$  – концентрация взвешенных веществ в осветленной и исходной воде соответственно;  $K_M$  – коэффициент массопередачи мелких частиц к поверхности хлопьев осадка;  $d_{\text{Э}}$  – эквивалентный диаметр частиц;  $C_{\text{ХЛ}}$  – концентрация твердых частиц, входящих в структуру хлопьев;  $C_{\text{OC}}$  – концентрация взвешенных частиц в осадке;  $w$  – скорость восходящего потока в контактной среде осветлителя;  $H$  – высота слоя взвешенного осадка (контактной среды).

Это уравнение учитывает влияние основных факторов на эффективность очистки воды.

### **2.3.4. Фильтрация**

Фильтрация применяют для выделения из сточных вод в основном грубо- и мелкодисперсных примесей. Метод фильтрации приобретает все большее значение в связи с повышением требований к качеству очищенной воды, необходимостью повторного использования сточных вод в технологических процессах, а также системах оборотного водоснабжения. Фильтрация является обычно завершающей стадией очистки сточных вод, прошедших сооружения механической, физико-химической и биологической очистки.

В зависимости от количества и характера примесей, а также расхода сточных вод и требований к осветленной воде применяют фильтры с фильтровальной перегородкой или зернистой загрузкой.

В процессе фильтрования сточных вод через фильтровальную перегородку разность между давлением и гидравлическим сопротивлением осадка с течением времени изменяется.

Фильтры могут работать с постоянной или переменной скоростью фильтрования. При переменной скорости фильтрования (постоянной разности давлений) по мере увеличения объема фильтрата, т.е. продолжительности фильтрования, скорость фильтрования уменьшается. При постоянной скорости фильтрования разность давлений возрастает по мере увеличения продолжительности фильтрования. Следует учесть при этом, что для сжимаемых осадков с повышением давления удельное сопротивление слоя осадка увеличивается.

Постоянство скорости фильтрования обеспечивается специальными устройствами – регуляторами скорости фильтрования.

Для отделения тонкодиспергированных твердых или жидких веществ, не осевших при отстаивании, используется фильтрование. При очистке сточных вод используют фильтры с сетчатыми элементами и фильтры с фильтрующим зернистым слоем. В качестве сетчатых элементов используют металлические перфорированные листы и сетки из кислотоупорной стали, алюминия, никеля, латуни и др., различные тканевые перегородки – асбестовые, стеклянные, хлопчатобумажные, шерстяные, из искусственного волокна, керамические пластины. В качестве зернистого фильтрующего слоя применяют кварцевый песок, мелкоизмельченный гранит, коксовую мелочь, торф, бурый и каменный уголь и т. п. В любом случае фильтрующий материал должен обладать требуемой пористостью, достаточной механической прочностью по отношению к истиранию и химической стойкостью.

Механические примеси нередко отделяют на гидроциклонах и центрифугах, которые сообщают сточной воде вращательное движение, причем частицы взвеси выделяются из воды под действием центробежных сил. Гидроциклоны (рис. 2.10) очень просты по устройству и обслуживанию, компактны, дешевы и имеют высокую производительность. Для осаждения твердых примесей используют напорные (закрытые) гидроциклоны, для отделения всплывающих примесей – открытые (низконапорные).

При фильтровании сточных вод через слой песка или другого зернистого материала могут протекать следующие процессы:

- 1) отложение взвешенных веществ в виде тонкого слоя на поверхности фильтрующего слоя («пленочное» фильтрование);
- 2) отложение взвешенных веществ в порах фильтрующего слоя;
- 3) отложение части взвешенных веществ в пленке и части – в порах фильтрующего слоя.

Извлечение взвешенных частиц из воды и их закрепление на зернах фильтрующей загрузки происходит под действием сил прилипания. Явления прилипания и отрыва частиц определяют ход процесса осветления воды.

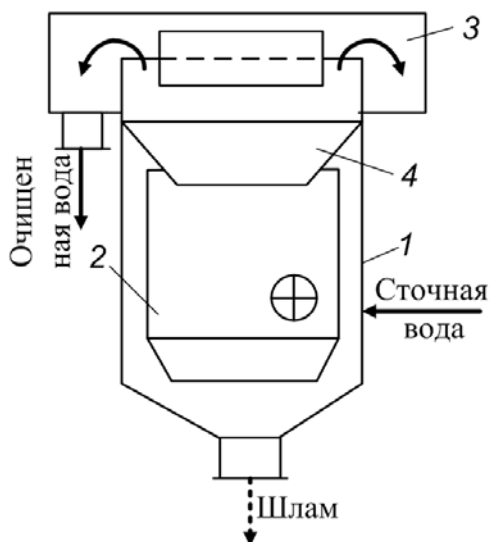


Рис. 2.10. Гидроциклон с внутренним цилиндром и конической диафрагмой:  
1 - корпус; 2 - внутренний цилиндр; 3 - кольцевой лоток; 4 - диафрагма

Продолжительность работы фильтра до «проскока» взвешенных веществ в фильтрат (выше заданной концентрации) можно определить по формуле

$$t = \frac{1}{k} \cdot \left( \frac{h}{v^{1.7} \cdot d^{0.7}} - \frac{S_0 \cdot d}{v} \right),$$

где  $h$  – толщина фильтрующего слоя;  $v$  – скорость фильтрования;  $d$  – крупность зерен загрузки;  $k$  и  $S_0$  – константы, зависящие от концентрации взвеси в исходной и осветленной воде.

Из этого выражения следует, что продолжительность защитного действия возрастает с увеличением толщины слоя загрузки и уменьшается с ростом скорости фильтрования и размера зерен загрузки.

Для сточных вод, загрязненных прочной взвесью, продолжительность цикла фильтрования определяется не по «проскоку» взвеси, а по достижению предельной потери напора:

$$t = \frac{H_{\text{пр}} - H_0}{H_0 \cdot f(A)} \cdot \frac{b}{a} \cdot h,$$

где  $H_{\text{пр}}$  и  $H_0$  – предельная и начальная потери напора в фильтре;  $a$  и  $b$  – постоянные параметры, характеризующие свойства взвеси и фильтрующей загрузки;  $f(A) = \frac{H}{t} \cdot \frac{b}{di_0}$ ;  $\frac{H}{t}$  – темп прироста потери напора;  $di_0$  – гидравлический уклон в чистой фильтрующей загрузке.

## Осветление сточных вод в аппаратах с фильтровальными перегородками

Аппараты с фильтровальными перегородками применяют для осветления сточных вод, загрязненных частицами химических продуктов (например, волокон), активного ила и др. С этой целью чаще всего используют микрофильтры, фильтры Вако, Кинцле и др.

Микрофильтры (рис. 2.11) представляют собой вращающиеся горизонтальные барабаны диаметром 1,5...3,0 м с металлическими сетками, имеющими отверстия размером от 20 до 60 мкм. Барабан на  $\frac{2}{3}$  диаметра погружен в воду. Очищаемая вода поступает внутрь барабана и фильтруется через сетчатые элементы наружу. Промывная вода под давлением 0,03...0,2 МПа подается на sprysки, расположенные над барабаном, по его образующей.

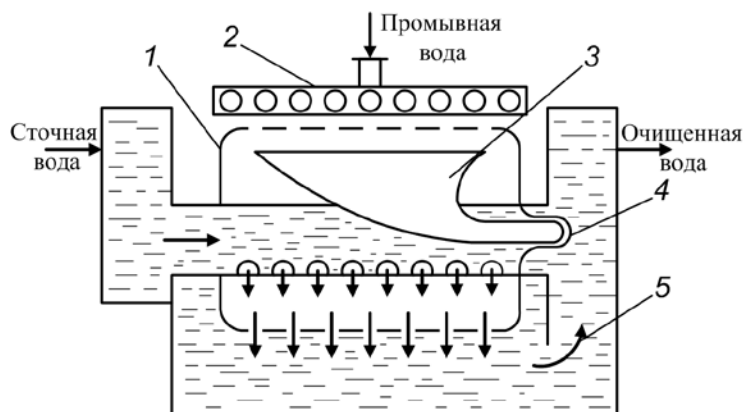


Рис.2.11. Микрофильтр:

1 - вращающийся барабан; 2 - устройство для промывки; 3 - лоток для сбора промывных вод; 4 - труба для отвода промывных вод; 5 - камера для удаления осветленной воды

Удельная производительность микрофильтра – от 10 до 25 л/(м<sup>2</sup>·с) при потере напора 0,2 м. Расход промывной воды составляет 1...3 % от количества профильтрованной воды. Линейная скорость вращения сетки изменяется от 0,1 до 0,5 м/с. При повышении содержания взвешенных веществ в воде скорость необходимо увеличивать. Свободное сечение ячеек микрофильтра составляет 28...36 % от общей площади.

Для очистки сточных вод от волокнистых материалов используют микрофильтры, в которых фильтрация осуществляется через слой сеток с отверстиями размером от 40 до 70 мкм. Скорость фильтрации на таких установках составляет 25...45 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч); при концентрации взвесей 15...20 мг/л эффективность очистки достигает 50...60 %.

Микрофильтры широко используют для осветления природных вод. Эффективность очистки воды от глинистой взвеси составляет

25...35 %, диатомитовых водорослей – 40...75 %, сине-зеленых водорослей – 60...90 %.

При использовании микрофильтров в качестве вторичных отстойников для осветления сточных вод после биофильтров содержание взвешенных веществ снижалось с 46,9 до 12,8 мг/л (после вторичных отстойников – 22,3 мг/л). Нагрузка на микрофильтры составляла 5,75...14,4 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч).

Микрофильтры не рекомендуется применять для осветления сточных вод после коагуляции гидроокисью алюминия вследствие недостаточной прочности хлопьев, разрушающихся на сетке микрофильтра.

Микрофильтры могут быть использованы для очистки сточных вод бумажных фабрик. Микрофильтрация применялась для предварительной очистки сточных вод (перед биологической очисткой), а также для доочистки (после биологической очистки) сточных вод. Так, в первом случае наблюдалось снижение БПК до 25 %, во втором – до 40 %.

Для осветления оборотных и сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности особое распространение получили фильтры Вако, Кингле, типа ЛТ, а также барабанные и дисковые вакуумфильтры.

В фильтре Вако (рис. 2.12) полотно сетки не закреплено на

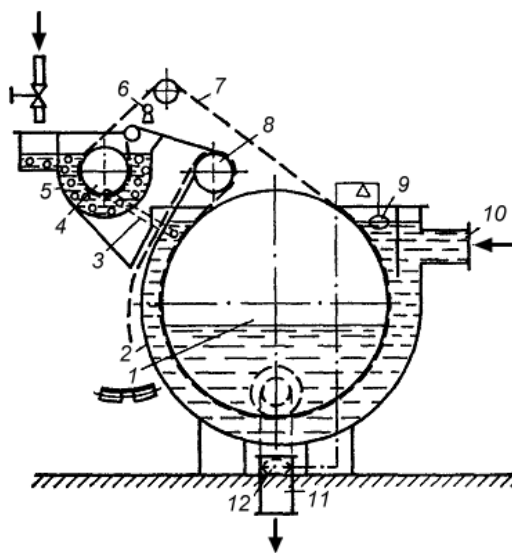


Рис.2.12. Фильтр Вако:

- 1 - фильтровальный барабан; 2 - ванна; 3 - переливная труба; 4 - фильтровальный барабан для нанесения подслоя; 5 - ванна для массы подслоя; 6 - sprыски; 7 - бесконечная сетка; 8 - вал для съема осадка; 9 - поплавковый регулятор уровня; 10, 11 - трубопроводы для исходной и осветленной воды; 12 - дроссельный клапан

барабане, а только огибает его, проходя также по нескольким валикам.



Фильтр оборудован устройством для нанесения на движущуюся сетку вспомогательного фильтрующего слоя (обычно крупного волокна), который позволяет выделять из воды мелкие частицы.

Фильтрация на фильтре Вако происходит только за счет разности уровней воды внутри и снаружи барабана. Эффективность осветления сточной воды, зависящая от многих факторов (характера и количества взвешенных веществ, толщины и качества подслоя и др.), достигает 80 % при содержании взвешенных веществ в осветленной воде 10...20 мг/л.

Вакуум-фильтры со сходящей фильтровальной тканью представляют собой барабан с незакрепленной, а лишь охватывающей его бесконечной сеткой, проходящей вне барабана по нескольким валикам. В результате осветления на этом фильтре сточной воды содержание в ней взвешенных веществ снижалось с 430...20000 до 20...85 мг/л (в среднем до 50 мг/л). Концентрация твердых веществ в осадке составляла 16...25 %. Замена хлопчатобумажных фильтровальных тканей (сеток) на ткани из синтетических волокон (полипропилена, капрона, полиэфирных смол и т. д.) позволяет повысить эффективность осветления воды, увеличить срок службы ткани и снизить эксплуатационные расходы.

Показана перспективность использования метода акустического фильтрования для осветления сточных вод.

### **Осветление сточных вод фильтрованием через зернистые загрузки**

Фильтры с зернистой загрузкой, широко используемые для осветления природных вод, применяют также для доочистки сточных вод, прошедших сооружения биологической очистки, для выделения нефтепродуктов и смол из сточных вод и т. д.

Важными характеристиками пористой среды являются порозность и удельная поверхность. Порозность зависит от структуры пористой среды и связана не только с размером зерен, образующих слой, но и с их формой и укладкой. Если обозначить порозность через  $\varepsilon$ , а объем, занимаемый телом, через  $V_B$ , тогда  $\varepsilon + V_B = 1$ .

При  $\varepsilon = 0$  пористая среда превращается в сплошное тело, а при  $\varepsilon = 1$  в максимально пористое тело (когда размеры стенок твердого вещества так малы, что  $V_B \rightarrow 0$ ).

Удельная поверхность слоя определяется не только порозностью, но и пористостью отдельных зерен, а также зависит от формы зерен (коэффициент формы существенно влияет на емкость фильтрующего слоя и коэффициент гидравлического сопротивления). Удельную объемную поверхность слоя вычисляют по формуле:

$$\alpha = 6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\psi}{d_{\text{э}}}$$

где  $\alpha$  – удельная объемная поверхность фильтрующего слоя,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $\psi$  – коэффициент формы зерен;  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр зерен, м.

Механизмы извлечения частиц из воды сводятся к следующим:

- процеживание, при котором извлечение частиц является чисто механическим;
- гравитационное осаждение;
- инерционное захватывание;
- химическая адсорбция;
- физическая адсорбция;
- адгезия;
- коагуляционное осаждение;
- биологическое выращивание.

В общем случае эти механизмы могут действовать совместно, и процесс фильтрования состоит из трех стадий:

- перенос частиц на поверхность вещества, образующего слой;
- прикреплению к поверхности;
- отрыв от поверхности.

По скорости фильтрования зернистые фильтры подразделяют на медленные (0,5 м/ч), скорые (2...15 м/ч) и сверхскорые (более 25 м/с).

По характеру механизма задерживания взвешенных частиц различают два вида фильтрования:

- фильтрование через пленку (осадок) загрязнений, образующуюся на поверхности зерен загрузки;
- фильтрование без образования пленки загрязнений.

В первом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор материала, а затем образуется слой загрязнений, который является также фильтрующим материалом. Такой процесс характерен для медленных фильтров, которые работают при малых скоростях фильтрования. Во втором случае фильтрование происходит в толще слоя загрузки, где частицы загрязнений удерживаются на зернах фильтрующего материала адгезионными силами. Такой процесс характерен для скоростных фильтров. Величина сил адгезии зависит от крупности и формы зерен, от шероховатости поверхности и ее химического состава, от скорости потока и температуры жидкости, от свойств примесей.

Прилипшие частицы постоянно испытывают влияние движущегося потока, который в результате трения срывает их с поверхности фильтрующего материала. При равенстве числа частиц, поступающих в единицу времени на поверхность фильтрующего слоя и

покидающих ее, наступает насыщение поверхности, и она перестает осветлять сточные воды.

Фильтры бывают открытые и закрытые, мелкозернистые (с размером частиц верхнего слоя загрузки 0,4 мм), среднезернистые (0,4...0,8 мм) и крупнозернистые (более 0,8 мм). Для предотвращения выноса фильтрующего материала с фильтратом применяют специальные дренажные системы (пористые трубы и плиты, колпачки и др.) или укладывают фильтрующие материалы на поддерживающие слои (гравий, щебенку и т. п.), размещаемые по порядку увеличения крупности частиц.

Фильтры с зернистым улавливающим слоем представляют собой резервуары с дренажным устройством для отвода воды в нижней части аппарата; на дренаж укладывают слой поддерживающего материала, а на него – слой фильтрующего материала. Производительность фильтра определяется объемом воды, прошедшим за единицу времени через единицу поверхности. Скорость очистки сточных вод зависит как от вида и размера зерен фильтрующего материала, так и от природы и концентрации примесей, содержащихся в сточных водах.

При ухудшении качества фильтрата или значительном увеличении гидравлического сопротивления фильтра проводится промывка фильтрующего материала загрузки.

Фильтры с зернистым слоем подразделяются на открытые (безнапорные) и закрытые (напорные). В первых высота слоя равна 1...2 м и сточные воды фильтруют за счет гравитационных сил, во вторых зернистый материал имеет толщину слоя 0,5...1 м, а напор воды создается насосами.

По механизму улавливания взвешенных частиц различают фильтрование через пленку (осадок) загрязняющих примесей, образующуюся на поверхности зернистого слоя (загрузки), когда слой загрязнений сам является дополнительным фильтрующим материалом, и фильтрование без образования пленки. Первый механизм характерен для так называемых медленных фильтров, которые используются для фильтрования некоагулированных сточных вод. Как правило, это бетонные или керамические резервуары с дренажным устройством, в которых скорость фильтрования зависит от концентрации взвешенных частиц: при их содержании до 25 мг/л скорость фильтрования сточных вод составляет 0,2...0,3 м<sup>3</sup>/ч, при содержании 25...50 мг/л – 0,1...0,2 м<sup>3</sup>/ч. На таких фильтрах достигается высокая степень очистки, но они громоздки, отличаются невысокой производительностью и сложной очисткой фильтрующего материала от осадка.

Фильтрация без образования поверхностной пленки происходит в толще слоя загрузки за счет прилипания взвешенных частиц к зернам фильтрующего материала. Такой процесс характерен для скоростных фильтров. При очистке сточных вод используют однослойные скоростные фильтры с однородным улавливающим слоем и

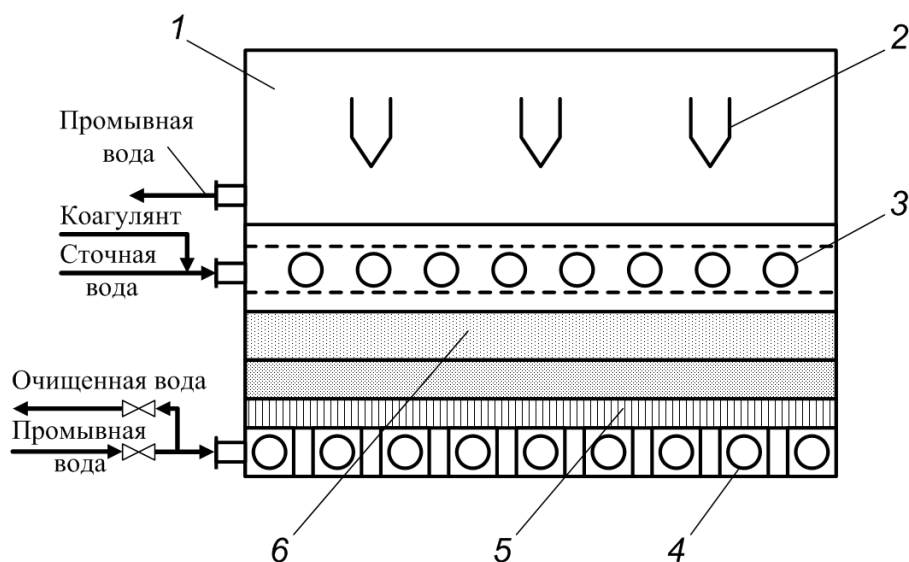


Рис. 2.13. Скоростной контактный фильтр:

1 - корпус; 2 - система удаления промывных вод; 3 - система подачи сточных вод; 4 - система подачи промывных вод; 5 - пористый дренаж; 6 - фильтрующий материал

многослойные, фильтрующий слой которых состоит из зерен разных материалов, например слоев антрацита и песка. Верхние слои состоят из зерен более крупных размеров, нижние – из мелкозернистых материалов. Промывку фильтров ведут очищенной водой (фильтратом), перекачивая ее из нижней части фильтра в верхний резервуар (рис. 2.13). При этом зерна загрузки приходят во взвешенное состояние и освобождаются от налипших частиц загрязнений.

### Фильтрующие материалы

К фильтрующим материалам предъявляется ряд требований. Они должны обладать определенным фракционным составом, механической прочностью (на истирание и измельчение), химической стойкостью к воде и ее примесям, должны быть доступными и иметь невысокую стоимость.

Фракционный состав зерен фильтрующей загрузки определяет производительность фильтров. Использование очень крупного фильтрующего материала приводит к увеличению пропускной способности фильтра и снижению качества фильтрата. И наоборот,

мелкий фильтрующий материал вызывает уменьшение продолжительности цикла фильтрования и перерасход промывной воды. Увеличение степени неоднородности зерен загрузки ухудшает условия промывки фильтрующего материала, а также обуславливает концентрирование мелких частиц на поверхности загрузки вследствие гидравлической классификации частиц при промывке. Последнее приводит к образованию на поверхности фильтрующего слоя пленки, состоящей из взвешенных частиц и препятствующей фильтрованию воды.

Недостаточная механическая прочность фильтрующего материала способствует увеличению гидравлического сопротивления загрузки и уносу материала промывной водой.

Химическая стойкость материала загрузки – одно из основных требований, предотвращающих загрязнение очищаемой воды и изменение свойств фильтрующего материала в процессе эксплуатации фильтров.

Наиболее широко применяются фильтрующие материалы: кварцевый песок, дробленый антрацит, кварц, мрамор, керамическая крошка, доломит, магнетит и др. В последнее время получили распространение керамзит, пористые пластмассы (полистирол, полиуретан и др.), горелые породы и др. Для загрузки фильтров применяют среднезернистый (размеры зерен 0,35...1,5 мм) и крупнозернистый песок (0,5...2 мм).

Антрацитовую загрузку изготавливают из антрацита марок АП, АК и АС-мытый. Антрацит должен иметь плотность 1,6...1,7 т/м<sup>3</sup>, насыпную массу 0,7...0,9 т/м<sup>3</sup>, размер зерен 0,8...1,8 мм. Антрацит слоистого строения непригоден. Зольность антрацита не должна превышать 5 %, а содержание серы – 3 %.

### **Открытые фильтры**

Открытый фильтр представляет собой обычно прямоугольный в плане резервуар, загруженный фильтрующим слоем зернистого материала и поддерживающими слоями, под которыми размещена дренажная система, предназначенная для отвода фильтрованной воды и равномерного распределения промывной воды (рис. 2.14).

В верхней части фильтра укреплены желоба для подачи исходной воды и отвода грязной промывной воды. Вдоль фильтра размещена аппаратура для управления работой фильтра, в том числе регуляторы скорости фильтрования или расходомер с регулятором для фильтрата. Высота слоя воды над загрузкой фильтра принимается равной обычно не менее 2 м.

По мере работы фильтра увеличивается толщина пленки загрязнений на поверхности и в толще фильтрующей загрузки, возрастает глубина проникновения частиц в загрузку, увеличивается сопротивление фильтра и снижается скорость фильтрования. При правильном подборе материала и крупности зерен загрузки, а также толщины фильтрующего слоя предельно допустимое снижение

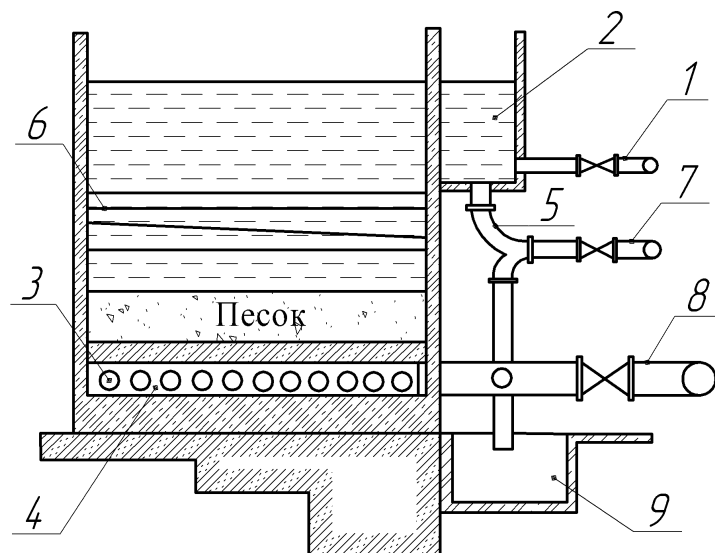


Рис. 2.14. Открытый фильтр:

1 - трубопровод для исходной воды; 2 - карман; 3 - ответвления трубчатого дренажа; 4 - коллектор дренажа; 5 - трубопровод для сброса промывных вод из кармана фильтра в канал; 6 - промывные желоба; 7 - трубопровод для отвода фильтрованной воды; 8 - трубопровод для промывной воды; 9 - канал для сброса промывных вод

скорости фильтрования совпадает по времени с ухудшением качества фильтрата.

Высоту слоя фильтрующей загрузки выбирают в зависимости от гранулометрического состава зерен загрузки, характера загрязняющих гетерофазных примесей, требуемой эффективности очистки воды, принятой скорости фильтрования и т. д. Например, для очистки сточных вод от нефтепродуктов высоту слоя песчано-гравийной загрузки выбирают на основании данных:

| <i>Загрузка</i>              | <i>Высота слоя, мм</i>               |
|------------------------------|--------------------------------------|
| песок крупностью 0,7...2 мм  | 1200                                 |
| гравий крупностью 2...4 мм   | 400                                  |
| гравий крупностью 4...8 мм   | 200                                  |
| гравий крупностью 8...16 мм  | 200                                  |
| гравий крупностью 16...32 мм | для водной распределительной системы |

Для очистки сточных вод, как правило, применяют скорые открытые фильтры. Скорость фильтрования обычно составляет

5...10 м/ч. В процессе фильтрационной очистки сточных вод происходит снижение концентрации кислорода с 3...4 до 1 мг/л за счет жизнедеятельности микроорганизмов, находящихся в загрузке. Потребление кислорода сопровождается снижением ВПК и ХПК сточной воды.

Скорые песчаные фильтры часто работают как поверхностные, т. е. частицы загрязнений задерживаются в тонком верхнем слое песчаной загрузки. В таком случае целесообразно высоту слоя загрузки уменьшить до 27...30 см. Продолжительность цикла фильтрования зависит от многих факторов: содержания и свойств примесей, скорости фильтрования, высоты слоя загрузки, размера частиц загрузки и др. Вследствие этого продолжительность цикла фильтрования, например, составляла 150...200 ч для нефтесодержащих сточных вод при скорости фильтрования 3 м/ч, и 10...12 ч для сточных вод целлюлозно-бумажного производства при скорости фильтрования 8...10 м/ч.

### **Напорные фильтры**

Напорные скорые фильтры представляют собой закрытые резервуары цилиндрической формы. Фильтры оборудованы дренажной системой, предназначенной для отвода осветленной воды и подачи промывной воды, распределительным устройством для сжатого воздуха и т. д. Фильтры рассчитываются на давление 0,4...0,6 МПа. Применяют вертикальные и горизонтальные напорные фильтры. Промышленностью выпускаются вертикальные напорные фильтры диаметром 1...3,4 м, производительностью 50...90 м<sup>3</sup>/ч. Высота слоя фильтрующего материала составляет обычно 1000...1200 мм.

Разработанные в последние годы напорные фильтры с двумя и тремя камерами, практически представляющие два или три фильтра, расположенные один над другим, позволяют повысить в 2...3 раза производительность по воде без увеличения диаметра фильтра.

Предложены конструкции самопромывающихся скорых напорных фильтров. В этих фильтрах промывка фильтрующего слоя производится с помощью сифона, заряжающегося при возрастании напора перед фильтром до определенного предела вследствие загрязнения зернистой загрузки.

Напорные скорые фильтры применяют для осветления сравнительно небольших количеств сточных вод, загрязненных взвешенными веществами, смолами и др. Например, при очистке сточной воды сланцеперерабатывающего комбината содержание сланцевой смолы в воде снижается от 100...150 до 20...40 мг/л. Продолжительность цикла фильтрования составляет около 8 ч.

---

---

## Вопросы для самоконтроля

---

---

1. Приведите классификацию методов очистки сточных вод.
2. Опишите типовую схему очистки промышленных сточных вод.
3. Какие отстойники используются для удаления взвешенных частиц из сточных вод и какова их эффективность?
4. Какие особенности осаждения частиц в тонкослойных отстойниках?
5. Объясните механизм выделения нефти из сточных вод в нефтеловушках.
6. Какие конструкции тканевых фильтров используются в процессах очистки сточных вод? Как определяется скорость фильтрования?
7. Каков механизм фильтрования в фильтрах с зернистой перегородкой?
8. Чем отличаются медленные фильтры от скоростных и микрофильтров?



### 2.4. Физико-химические методы очистки сточных вод

Для освобождения промышленных и коммунальных стоков от тонкодиспергированных взвесей, не улавливаемых фильтрацией, и растворимых газов, неорганических и органических соединений используют физико-химические методы, позволяющие удалять из сточных вод токсичные, биохимически неокисляемые органические соединения и достигать глубокого и стабильного уровня очистки. Физико-химические методы позволяют полностью автоматизировать процесс очистки, а современный уровень знаний в области кинетики многих физико-химических процессов создает основы для их математического моделирования и оптимизации и, как следствие, правильного выбора и расчета параметров аппаратуры. В большинстве случаев использование физико-химических методов выделения загрязняющих веществ из сточных вод позволяет в дальнейшем проводить их рекуперацию.



### **2.4.1. Флотация**

Для удаления из сточных вод тонкодисперсных нерастворимых взвесей, которые самопроизвольно отстаиваются очень медленно, применяют флотацию – метод, основанный на различной смачиваемости частиц. В резервуар с очищаемой водой подают снизу воздух, пузырьки которого адсорбируются на поверхности частиц извлекаемого (гидрофобного) вещества, и выносят его на поверхность воды. Для усиления флотационного эффекта в воду добавляют ПАВ, которые понижают поверхностное натяжение жидкости и ослабляют связь воды с флотируемым веществом, а также вспениватели, увеличивающие дисперсность пузырьков воздуха и их устойчивость.

Флотационные установки широко применяют для очистки сточных вод нефтеперерабатывающих, целлюлозно-бумажных, кожевенных, машиностроительных, пищевых, химических и других производств, при производстве клея и искусственного волокна, рафинировании масел, а также для выделения активного ила после биохимической очистки. Флотационные процессы протекают непрерывно, обладают высокой селективностью выделения примесей при высокой скорости процесса, не требуют сложной и дорогостоящей аппаратуры и обеспечивают степень очистки до 95...98 %.

Для флотационной обработки сточных вод используют вакуумные и напорные установки (последние имеют производительность до 1000...2000 м<sup>3</sup>/ч), установки с механическим диспергированием воздуха и некоторые другие.

Процесс очистки сточных вод от грубо- и мелкодисперсных частиц флотацией заключается в образовании комплексов «частицы – пузырьки», всплывании этих комплексов и удалении образовавшегося пенного слоя с поверхности воды.

В соответствии с методами получения пузырьков воздуха (или любого другого газа) в воде существуют следующие способы флотационной очистки сточных вод:

- 1) флотация пузырьками, образующимися путем механического дробления воздуха (механическими турбинками – импеллерами, форсунками, с помощью пористых пластин и каскадным методом);
- 2) флотация пузырьками, образующимися из пересыщенных растворов воздуха в воде (вакуумная, напорная);
- 3) электрофлотация.

## Флотация пузырьками, образующимися при механическом диспергировании воздуха

Процесс образования комплекса «частицы – пузырьки», протекающий на границе раздела трех фаз (частица – воздух – вода), складывается из стадий:

- 1) сближение частицы с пузырьком воздуха (при всплывании пузырьков);
- 2) контакт частицы с пузырьком;
- 3) закрепление пузырька на частице (прилипание).

Прочность образовавшегося комплекса зависит от размеров частиц и пузырьков, физико-химических свойств частиц и жидкости (гидрофобности поверхности частиц и их плотности, поверхностного натяжения и др.), гидродинамических условий и т. д.

Для разрушения комплексов должна быть затрачена работа

$$A = \sigma_{\text{вг}} \cdot (1 - \cos \theta),$$

где  $\sigma_{\text{вг}}$  – поверхностное натяжение воды на границе с воздухом;  $\theta$  – краевой угол смачивания поверхности частиц.

Для частиц, хорошо смачиваемых водой ( $\theta \rightarrow 0$ ,  $\cos \theta \rightarrow 1$ ), прочность прилипания минимальна, а для гидрофобных частиц – максимальна. Наилучшие условия прилипания создаются при относительно небольших скоростях перемещения частиц и пузырьков и повышении температуры.

Важным показателем является устойчивость пенного слоя. Недостаточная прочность пены не дает возможности своевременно удалить пенный продукт с поверхности воды. Чрезмерная устойчивость пены затрудняет ее дальнейшую обработку.

Кинетика флотационного извлечения примесей может быть описана известным уравнением

$$1 - \varepsilon = e^{-K_{\text{ф}} \cdot \tau},$$

где  $\varepsilon$  – степень извлечения примесей в пенный слой (эффективность очистки) за время  $\tau$ ;  $K_{\text{ф}}$  – коэффициент скорости флотации. Эффективность осветления сточных вод флотацией при закреплении пузырьков на частицах за счет их столкновений может быть оценена по уравнению

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{H \cdot n \cdot \alpha} \cdot (1 - e^{-H \cdot n \cdot \alpha}),$$

где  $H$  – высота слоя воды во флотационном аппарате;  $n$  – число пузырьков в единице объема воды;  $\alpha$  – вероятность закрепления пузырька на частице при подъеме его на 1 см.

Из этого уравнения видно, что с увеличением высоты слоя воды и числа пузырьков эффективность очистки воды повышается.

## Флотация с помощью машин импеллерного типа

Во флотационных машинах диспергирование воздуха в воде производится с помощью мешалки (импеллера). Схема установки очистки сточных вод во флотационной машине импеллерного типа представлена на рис. 2.15. Сточная вода поступает во флотационную камеру 2 через штуцер 3. В центре камеры установлен импеллер 1, приводимый в движение электродвигателем 4. Импеллер закрыт статором 8. При вращении импеллера образуется зона пониженного давления и через центральную трубу 5 подсасывается воздух. Одновременно через отверстия 7 на лопасти импеллера поступает небольшое количество воды, которая перемешивается с воздухом и выбрасывается через боковые отверстия во флотационную камеру. Отбойные перегородки 6 предназначены для гашения энергии турбулентного потока, выходящего из отверстий статора.

Во флотационной камере воздушные пузырьки прилипают к частицам и флотируют их на поверхность воды. Пенный слой удаляется с помощью пеноснимателя 11 в пеносборный бункер 12. Штуцеры 9, 10 и 13 предназначены соответственно для вывода очищенной воды, воздуха и пенного продукта.

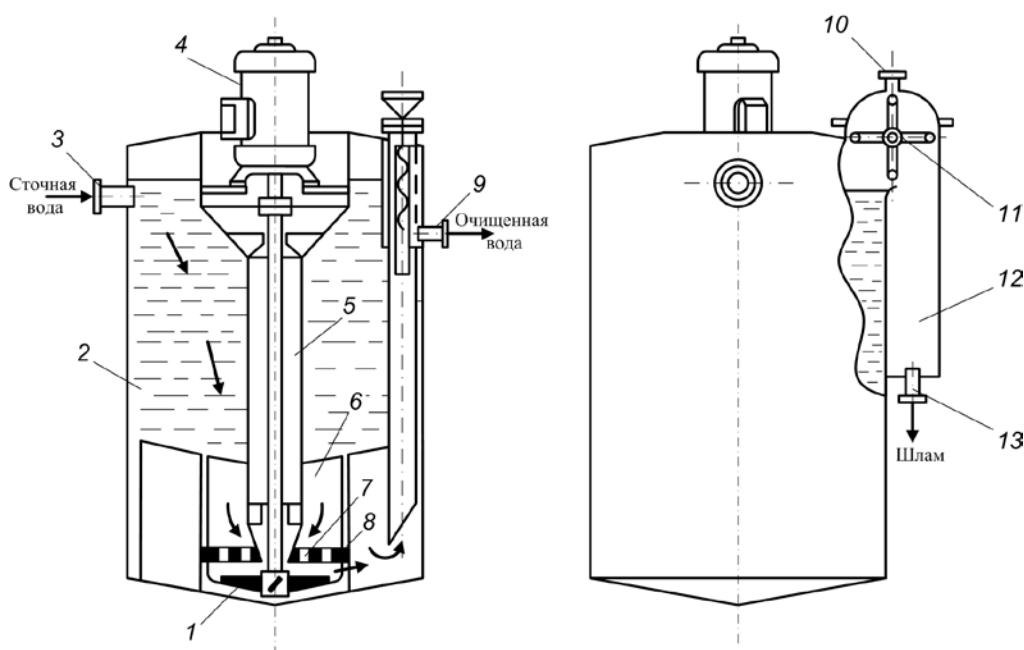


Рис.2.15. Схема установки очистки сточных вод с использованием флотационной машины импеллерного типа:

- 1 – импеллер; 2 - флотационная камера; 3 - штуцер ввода исходной сточной воды; 4 – электродвигатель; 5 - воздушная труба; 6 - отбойные перегородки;
- 7 - отверстия статора; 8 – статор; 9 - штуцер вывода очищенной воды;
- 10 - штуцер вывода воздуха; 11 – пеносниматель; 12 - пеносборный бункер;
- 13 - штуцер вывода пенного продукта

Для осветления сточных вод применяют также многокамерные флотационные машины.

Увеличение окружной скорости импеллера (а следовательно степени дисперсности воздуха) и продолжительности флотации приводит к повышению эффективности очистки сточных вод.

Коэффициент скорости флотации  $K_f$  зависит от вида извлекаемых примесей и, например, для жира примерно в 3 раза больше, чем для взвешенных веществ. С увеличением продолжительности флотации значение коэффициента  $K_f$  уменьшается.

Результаты испытаний флотационной установки производительностью  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , предназначенной для очистки сточных вод от мазута, показали, что при окружной скорости импеллера  $13,7 \text{ м/с}$  и продолжительности  $8\text{--}9$  мин содержание мазута в воде снижалось с  $267\text{--}1855$  до  $0\text{--}94 \text{ мг/л}$ . Для получения удовлетворительных результатов в исходную сточную воду вводили флотореагент ИМ-68 в количестве  $20 \text{ мг/л}$ .

Флотационные установки импеллерного типа находят применение в основном для очистки сточных вод от нефти, нефтепродуктов и жиров, хотя имеются данные о возможности их использования для очистки сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности, производств пластмасс и др. Существенные недостатки данного способа очистки, например: малая эффективность, высокая турбулентность потоков во флотационной камере, приводящая к разрушению хлопьевидных частиц, необходимость применения поверхностно-активных веществ (флотореагентов, вспенивателей), ограничивают его промышленное применение.

### **Напорная флотация**

Метод напорной флотации применяется для очистки сточных вод нефтеперерабатывающих, бумажных и целлюлозных заводов, производств вязкозных волокон, а также для отделения активного ила от биологически очищенных сточных вод и т. д.

Широкое распространение метода обусловило создание различных технологических схем процесса и конструкций аппаратов.

Современные схемы флотационных установок представлены тремя основными группами (рис. 2.16): *а* – с насыщением всего потока сточной воды воздухом; *б* – с насыщением части потока сточной воды воздухом; *в* – с насыщением части очищенной воды воздухом и смешением ее со сточной водой, поступающей на очистку (с рециркуляцией).

Первая схема (рис. 2.16 *а*) является наиболее простой. Сточная вода насыщается воздухом под давлением и поступает в напорный

резервуар 2, в котором воздух растворяется и из воды выделяются нерастворившиеся пузырьки. В случае применения для очистки сточных вод реагентов (коагулянтов и флокулянтов) в напорном резервуаре происходит процесс хлопьеобразования. Далее сточная вода проходит через редукционный клапан 3, в котором давление снижается до атмосферного, и поступает во флотоотстойник 4.

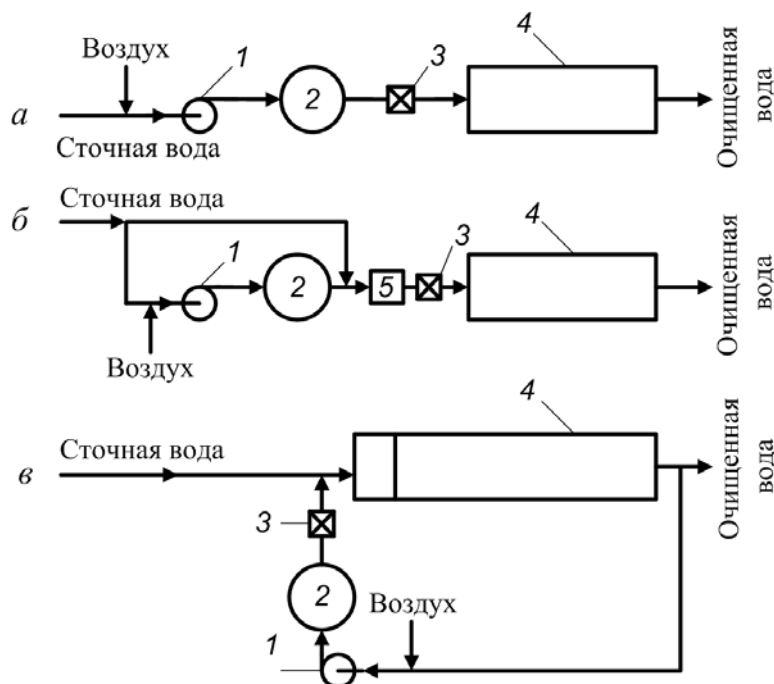


Рис.2.16. Схемы установок очистки сточных вод напорной флотацией:  
 1 – центробежный насос, 2 – напорный резервуар, 3 – редукционный клапан, 4 – флотоотстойник, 5 – камера смешения

Недостатки этой схемы – повышенное эмульгирование нефтепродуктов и смол, присутствующих в сточных водах, при перекачивании центробежными насосами, а также необходимость перекачивания под давлением всего объема сточной воды. Тем не менее эта схема используется на многих отечественных и зарубежных предприятиях.

В сочетании с процессами коагуляции и флокуляции напорная флотация по этой схеме обеспечивает высокоэффективную очистку сточных вод – обычно 80...95 % и более (при остаточном содержании, например, нефтепродуктов в очищенной воде – 10...20 мг/л, взвешенных веществ – 10...30 мг/л). Следует отметить, что содержание взвешенных веществ и нефтепродуктов в очищенной воде обычно мало зависит от содержания их в исходной воде. Основные параметры процесса зависят от свойств примесей и их предварительной обработки (коагуляции, флокуляции коллоидных и мелкодисперсных примесей) и колеблются в пределах:

|  |             |
|--|-------------|
| давление в напорном резервуаре, Мпа  | 0,17...0,39 |
| время пребывания, мин:   |             |
| – в напорном резервуаре  | 1...4       |
| – во флотоотстойнике   | 10...20     |
| количество подсасываемого эжектором воздуха,<br>% от объема очищаемой воды | 1,5...5,0   |

Наряду с очисткой флотацией, вследствие протекания процессов окисления и отдувки, происходит снижение ХПК и БПК сточной воды, содержания сульфидов, фенолов и других примесей. Так, при флотационном отделении сланцевых смол содержание фенолов в сточной воде снижается в среднем на 40 %; содержание сероводорода в сточных водах нефтеперерабатывающих заводов уменьшается, в зависимости от величины рН, на 20...80 %.

Производительность напорных флотационных установок различна – от 5...10 до 1000...2000 м<sup>3</sup>/ч. Небольшое время пребывания сточных вод в аппаратах обуславливает их небольшой строительный объем и невысокую стоимость.

Схема очистки сточных вод флотацией с насыщением воздухом части исходной воды (рис. 2.16 б) распространена значительно меньше. Эта схема более экономична, чем предыдущая. Эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов по данной схеме также высока. Содержание нефтепродуктов в осветленной воде составляет в среднем 15 мг/л, сероводорода – от 12 до 2 мг/л.

Широкое распространение в практике очистки сточных вод получила схема напорной флотации с рециркуляцией части очищенной сточной воды (рис. 2.16 в). По этой схеме часть очищенной сточной воды из флотоотстойника центробежным насосом 1 подается в напорный резервуар 2. Затем сточная вода, насыщенная воздухом, проходит редуцирующий клапан 3, смешивается с исходной сточной водой и поступает во флотоотстойник 4.

Во многих случаях применение этой схемы более целесообразно, так как не происходит разрушения хлопьевидных осадков в редуцирующем клапане или повышенного эмульгирования нефтепродуктов и смол в центробежных насосах. Для эффективной очистки сточных вод на рециркуляцию подается от 20 до 50 % очищенной сточной воды. Недостаток схемы заключается в необходимости увеличения объема флотоотстойника.

Для высокоэффективной очистки сточных вод необходимо получить достаточное число пузырьков, что обеспечивается созданием более высокого давления при насыщении воды воздухом, а также увеличением количества воздуха, растворенного в воде. Рекомендуемое

давление насыщения зависит от свойств примесей сточных вод и количества рециркулируемой воды и составляет обычно 0,3...0,6 МПа.

Эффективность очистки сточных вод флотацией с рециркуляцией части очищенной сточной воды аналогична эффективности очистки по другим схемам.

Возможно применение также схем флотационных установок без напорного резервуара.

Для флотационной очистки сточных вод, содержащих ценные примеси, контакт которых с кислородом воздуха может привести к их окислению, предложено вместо воздуха применять газы, не содержащие кислорода, а также сжиженные углеводородные газы фракций  $C_2 - C_5$ . В случае необходимости одновременного окисления примесей сточных вод в качестве газового агента может быть использован озон.

В процессе флотационной очистки сточных вод образуется пенный слой (пена), количество которого зависит от характера примесей сточных вод. Наличие в сточных водах значительных количеств поверхностно-активных веществ приводит к образованию большого количества устойчивой пены. Например, при очистке производственных сточных вод сланцеперерабатывающего комбината напорной флотацией образуется 1,0...1,5 % об. пены от объема очищенной воды, при очистке мазутных вод – 2,0...3,0 %.

Время жизни пены (устойчивость) для фенольной воды составляет 50...60 мин, мазутной воды – 100...120 мин, а сточной воды производства вспенивающегося полистирола – 24 ч.

Концентрация примесей в воде, полученной после разрушения пены, зависит от загрязненности исходной сточной воды, количества образующейся пены и содержания в пене воды. Например, содержание сланцевой смолы в воде после разрушения пены достигает 10...20 г/л, а содержание взвешенных веществ в воде после разрушения пены от флотационной очистки сточных вод производства сульфатной целлюлозы – 50...60 г/л.

Стоимость очистки сточных вод напорной флотацией зависит от многих факторов (производительности установки, ценности и возможности использования извлекаемых примесей, расхода реагентов).

Вследствие высокой скорости растворения воздуха в воде (константа скорости растворения  $K_p = 20...35$ ) при подаче его через эжектор в центробежный насос этот метод применяется на большинстве установок напорной флотации. Эжектор устанавливается на обводной линии между всасывающим и напорным трубопроводами центробежного насоса. При подаче в эжектор и далее, в центробежный насос, 4...5 % воздуха (от объема сточной воды) производительность и напор насоса снижаются на 10...15 % и более. Дальнейшее увеличение

количества подаваемого воздуха может привести к ухудшению работы насоса.

Напорные резервуары оборудуются предохранительными клапанами, манометрами, уровнемерами, а также устройствами для удаления не растворившегося в воде воздуха. Время пребывания воды в напорном резервуаре чаще всего составляет 1...2 мин.

Образование пузырьков происходит при снижении давления до атмосферного в редукционном клапане, поддерживающем давление «до себя». Для получения достаточного числа пузырьков, обеспечивающих высокоэффективную очистку сточных вод, скорость истечения воды, насыщенной воздухом (газом), в редукционном клапане должна быть не менее 15 м/с. Рост гидравлического сопротивления клапана приводит к необходимости увеличения давления до клапана.

Основным аппаратом, определяющим эффективность выделения комплексов «частицы – пузырьки», является флотационная камера (флотоотстойник). Предложено много различных конструкций флотоотстойников. В промышленности используются два типа флотоотстойников: прямоугольный или цилиндрический (в плане).

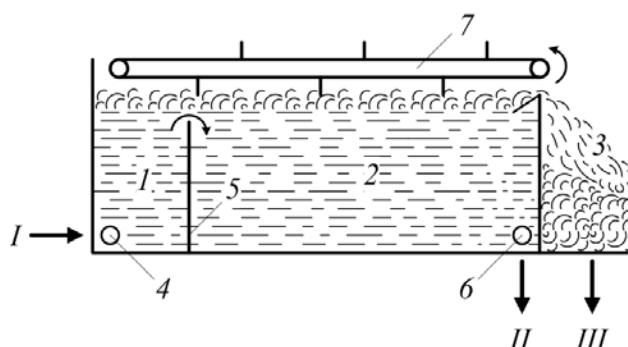


Рис.2.17. Схема прямоугольного (горизонтального) флотоотстойника:  
1 - приемная камера, 2 - отстойная камера, 3 - камера пены, 4 - распределительная перфорированная труба, 5 - струегасящая перегородка, 6 - отводная перфорированная труба, 7 - конвейерное устройство; I - смесь исходной воды с воздухом, II - осветленная вода, III - пена

Схема прямоугольного (горизонтального) флотоотстойника представлена на рис. 2.17. Флотоотстойник имеет приемную 1, отстойную 2 камеры, а также камеру пены 3. Камера пены может быть отделена от флотоотстойника. Смесь сточной воды и воздуха через распределительную перфорированную трубу 4 поступает в приемную камеру, затем переливается через струегасящую перегородку 5 в отстойную камеру. Осветленная вода через отводную перфорированную трубу 6 выводится из флотоотстойника. Пена с поверхности воды удаляется в камеру пены с помощью конвейерного устройства 7. Время



пребывания воды во флотоотстойнике может колебаться от 10 до 30 мин, но чаще всего составляет 15...20 мин.

Время пребывания воды во флотоотстойнике целесообразно определять по скорости движения (подъема) «нижней границы» комплексов «частицы – пузырьки». Для этого в сосуд высотой около 1 м подается смесь исходной сточной воды с пузырьками воздуха. После заполнения сосуда замеряется скорость подъема комплексов, образующих четкую «нижнюю границу». Затем по аналогии с расчетом горизонтальных отстойников определяется площадь отстойной зоны флотоотстойника. Высота флотоотстойника принимается с учетом высоты слоя жидкости, равной 1...1,5 м, а также его конструктивных особенностей.

Применяются флотоотстойники длиной от 2...3 до 30...35 м и шириной до 6 м.

Цилиндрические флотоотстойники более компактны и также широко используются в промышленности. Разработаны различные конструкции цилиндрических флотоотстойников, отличающиеся устройствами для ввода и вывода сточной воды, удаления пенного продукта и т. д. Время пребывания воды в цилиндрических флотоотстойниках составляет 20...30 мин при нагрузке по сточной воде 4...5 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). Типовой флотоотстойник производительностью 600 м<sup>3</sup>/ч имеет диаметр 12 м и высоту 3,5 м.

### **2.4.2. Адсорбция**

Для глубокой очистки сточных вод от растворимых органических соединений (фенолов, пестицидов, ароматических нитросоединений, ПАВ, красителей и т. д.) используют метод адсорбции, эффективность которого колеблется от 80 до 95 % в зависимости от химической природы адсорбента, величины адсорбирующей поверхности, а также от структуры и свойств улавливаемых примесей.

Очищаемую воду пропускают через фильтр, загруженный сорбентом (динамическая адсорбция), или просто добавляют в нее измельченный сорбент, а после его насыщения загрязняющими веществами отделяют сорбент от очищенной воды отстаиванием или фильтрацией (статическая адсорбция). В качестве адсорбентов применяют торф, опилки, коксовую мелочь, золы, шлаки и другие малоценные вещества, которые обычно удаляются или сжигаются после одноразового использования. Если же загрязняющее вещество или адсорбент представляют определенную ценность, то адсорбент регенерируют, извлекая из него поглощенное вещество отгонкой, экстракцией или каким-либо другим методом.

Самым эффективным, но и самым дорогим сорбентом,

применяемым в схемах водоочистки, является активированный уголь. К качеству угля, используемого для очистки сточных вод, предъявляются определенные требования. Он должен быть крупнопористым (с эффективным радиусом адсорбционных пор от 0,8 до 5,0 нм), иметь большую адсорбционную емкость, высокую селективность и малую удерживающую способность при регенерации. Уголь должен иметь высокую механическую прочность на истирание, хорошо смачиваться водой и иметь определенный гранулометрический состав: размер зерен в установках для динамической адсорбции должен быть 0,25...0,50 мм, статической – около 0,1 мм.

Адсорбированные вещества извлекают из угля насыщенным или перегретым паром или экстрагируют органическими низкокипящими и легко перегоняющимися с водяным паром растворителями (метанолом, бензолом, толуолом, дихлорэтаном).

### Основы процесса адсорбции

Вещества, хорошо адсорбируемые из водных растворов активными углями, имеют выпуклую изотерму адсорбции, а плохо адсорбирующиеся – вогнутую. Изотерму адсорбции вещества, находящегося в сточной воде, определяют опытным путем. Ее можно приближенно вычислить без экспериментов по соотношению

$$a = \frac{a_{\infty} \cdot K_B \cdot C_P}{\frac{V_{H_2O}^*}{V_i^*} + K_B \cdot C_P},$$

где  $a$  – удельная адсорбция, ммоль/г;  $a_{\infty}$  – максимальная удельная адсорбция вещества (адсорбционная емкость), ммоль/г;  $K_B = \frac{K_A}{55,5}$  – ионное произведение воды;  $K_A$  – константа адсорбционного равновесия;  $V_{H_2O}^*$  и  $V_i^*$  – молярные объемы воды и адсорбируемого вещества соответственно;  $C_P$  – равновесная концентрация, ммоль/л.

Если в сточной воде присутствует несколько компонентов, то для определения возможности их совместной адсорбции для каждого вещества находят значение стандартной дифференциальной свободной энергии  $\Delta F^0$  и определяют разность между максимальным и минимальным значением. При условии  $\Delta F_{MAX}^0 - \Delta F_{MIN}^0 \leq 10,5$  кДж/моль совместная адсорбция всех компонентов возможна. Если это условие не соблюдается, то очистку проводят последовательно в несколько ступеней.

Скорость процесса адсорбции зависит от концентрации, природы и структуры растворенных веществ, температуры воды, вида и свойств

адсорбента. В общем случае процесс адсорбции складывается из трех стадий: переноса вещества из сточной воды к поверхности зерен адсорбента (внешнедиффузионная область), собственно адсорбционный процесс, перенос вещества внутри зерен адсорбента (внутридиффузионная область). Принято считать, что скорость собственно адсорбции велика и не лимитирует общую скорость процесса. Следовательно, лимитирующей стадией может быть внешняя диффузия либо внутренняя диффузия. В некоторых случаях процесс лимитируется обеими этими стадиями.

Во внешнедиффузионной области скорость массопереноса в основном определяется интенсивностью турбулентности потока, которая в первую очередь зависит от скорости жидкости. Во внутридиффузионной области интенсивность массопереноса зависит от вида и размеров пор адсорбента, от форм и размера его зерен, от размера молекул адсорбирующихся веществ, от коэффициента массопроводности.

Учитывая все эти обстоятельства, определяют условия, при которых адсорбционная очистка сточных вод идет с оптимальной скоростью. Процесс целесообразно проводить при таких гидродинамических режимах, чтобы он лимитировался во внутридиффузионной области, сопротивление которой можно снизить, изменяя структуру адсорбента, уменьшая размеры зерна. Для ориентировочных расчетов рекомендуется принимать следующие значения скорости и диаметра зерна адсорбента:  $w = 1,8$  м/ч и  $d_A = 2,5$  мм. При значениях  $w$  и  $d_A$  меньше указанных процесс лимитируется во внешнедиффузионной области, при больших значениях – во внутридиффузионной.

### **Адсорбционные установки**

Процесс адсорбционной очистки сточной воды ведут при интенсивном перемешивании адсорбента с водой, при фильтровании воды через слой адсорбента или в псевдооживленном слое на установках периодического и непрерывного действия. При смешивании адсорбента с водой используют активный уголь в виде частиц 0,1 мм и меньше. Процесс проводят в одну или несколько ступеней (рис. 2.18).

Статическая одноступенчатая адсорбция нашла применение в тех случаях, когда адсорбент очень дешев или является отходом производства. Более эффективно (при меньшем расходе адсорбента) процесс протекает при использовании многоступенчатой установки. При этом в первую ступень вводят столько адсорбента, сколько необходимо для снижения концентрации загрязнений от  $C_H$  до  $C_1$ , затем адсорбент отделяют отстаиванием или фильтрованием, а сточную воду

направляют во вторую ступень, куда вводят свежий адсорбент. По окончании процесса адсорбции во второй ступени концентрация

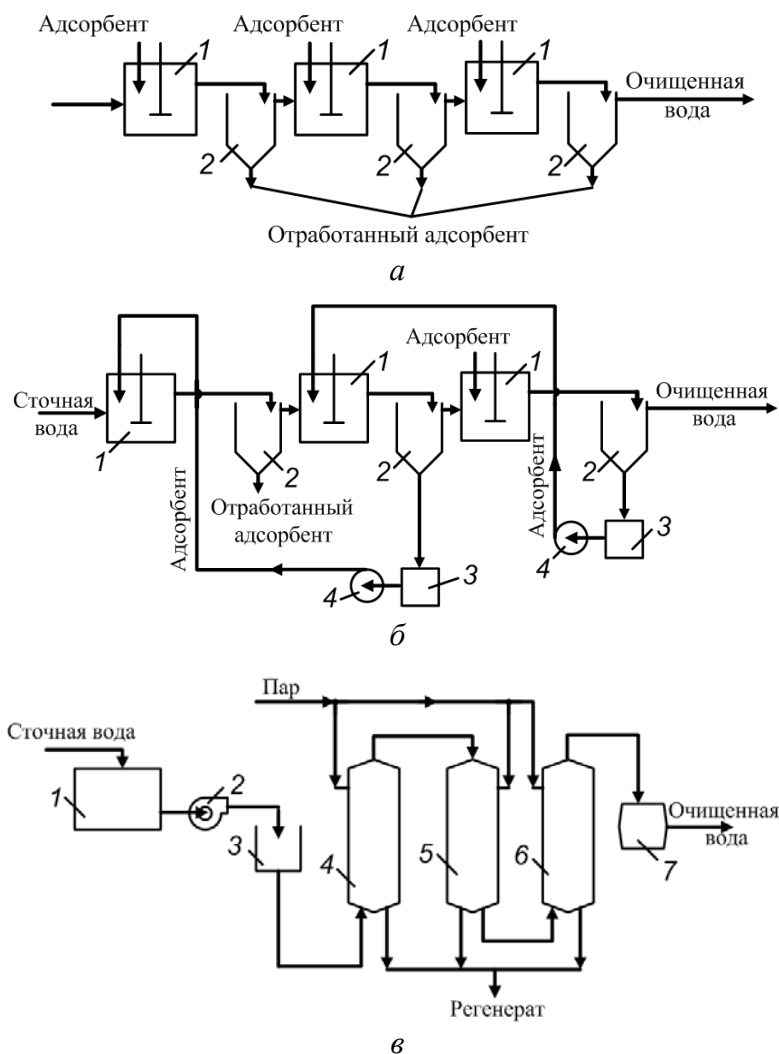


Рис.2.18. Схемы адсорбционных установок:

- а* - с последовательным введением адсорбента: 1 - смесители, 2 - отстойники; *б* - с противоточным введением адсорбента: 1 – смесители, 2 - отстойники, 3 - приемники адсорбента, 4 - насосы; *в* - непрерывного действия: 1 - усреднитель, 2 – насос, 3 – фильтр, 4-6 - колонны, 7 - емкость

загрязнений в воде уменьшается от  $C_1$  до  $C_2$  и т. д. Схема такой установки показана на рис. 2.18 *а*.

Расход адсорбента для одноступенчатого процесса определяют из уравнения материального баланса

$$m = \frac{Q(C_n - C_k)}{a}$$

где  $m$  – расход адсорбента;  $Q$  – объем сточных вод;  $C_n$  и  $C_k$  – начальная и конечная концентрации загрязненной сточной воды;  $a$  – коэффициент адсорбции.

Конечная концентрация загрязнений в сточной воде после очистки в установке с  $n$  ступенями равна

$$C_n = \left( \frac{Q}{Q + k \cdot m} \right)^n \cdot C_H,$$

где  $k$  – коэффициент распределения, равный

$$k = \frac{aC}{aC} = \frac{C_H - C_P}{C_H - C_P} \approx 0,7 - 0,8,$$

где  $a_\tau$  – значение удельной адсорбции за время  $\tau$ ;  $C_P$  – равновесная концентрация вещества.

Расход адсорбента на каждую ступень находят по формуле

$$m_n = \frac{Q}{k \cdot \sqrt{\frac{C_H}{C_n} - 1}},$$

необходимое число ступеней

$$n \in \ln \frac{C_H}{C_n} - \frac{\ln C_H}{\ln(Q + k \cdot m_1) - \ln Q}.$$

В противоточной схеме адсорбент вводят однократно – в последнюю ступень, и он движется навстречу сточной воде (рис. 2.18 б). По этой схеме процесс очистки ведут непрерывно при значительно меньшем расходе адсорбента, чем по схеме с последовательным введением сорбента. Однако эта установка дороже и сложнее в эксплуатации.

Концентрация вещества в сточной воде после  $n$  ступеней вычисляется по формуле

$$C_K^n = \frac{\left( \frac{k \cdot m}{Q} - 1 \right) \cdot C_H}{\left( \frac{k \cdot m}{Q} \right)^n - 1}.$$

Дозу адсорбента, вводимого в последнюю ступень, можно вычислить по уравнению  $\alpha \cdot m^{n+1} - \beta \cdot m - \gamma = 0$ ,

$$\text{где } \alpha = \left( \frac{k}{Q} \right)^{n-1}; \beta = \frac{kC_H}{kC_n}; \gamma = \frac{C_H}{C_n} - 1.$$

Число ступеней устанавливают по зависимости  $n = K - 1$ ,

$$\text{где } K = \frac{\ln \left[ C_H \cdot \left( \frac{k \cdot m}{Q} - 1 \right) + C_n \right] - \ln C_n}{\ln(m - Q) \cdot k}.$$

В динамических условиях процесс очистки проводят при фильтровании сточной воды через слой адсорбента. Скорость фильтрования зависит от концентрации растворенных веществ и колеблется от 2...4 до 5...6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). Вода в колонне движется снизу вверх, заполняя все сечение. Адсорбент применяют в виде частиц размером в пределах 1,5...5 мм. При более мелких зернах возрастает сопротивление фильтрованию жидкости. Уголь укладывают на слой гравия, расположенного на решетке. Во избежание забивки адсорбента сточная вода не должна содержать твердых взвешенных примесей.

В одной колонне при неподвижном слое угля процесс очистки ведут периодически до проскока, а затем адсорбент выгружают и регенерируют. При непрерывном процессе используют несколько колонн (рис. 2.18 в). По такой схеме две колонны работают последовательно, а третья отключена на регенерацию. При проскоке в средней колонне на регенерацию отключают первую колонну.

В момент проскока в колонне появляется слой адсорбента высотой  $L_0$ , который не работает. Этот слой называют «мертвым» слоем. Если одновременно выводить из колонны «мертвый» слой и вводить в нее такой же слой свежего адсорбента, то колонна будет работать непрерывно. Для подачи адсорбента имеются специальные дозаторы.

Скорость перемещения работающего слоя равна

$$u = \frac{C_H \cdot w_{CP}}{a_{0D}},$$

где  $w_{CP}$  – средняя скорость воды в колонне;  $a_{0D}$  – динамическая емкость адсорбента.

Длина работающего слоя

$$L_p = \frac{\mu}{S\beta \cdot \Delta C_{CP}},$$

где  $\mu$  – количество поглощенного вещества;  $S$  – площадь поперечного сечения слоя;  $\beta$  – коэффициент массопередачи;  $\Delta C_{CP}$  – средняя движущая сила-адсорбции.

При небольших концентрациях загрязнений в сточной воде средняя движущая сила процесса может быть вычислена как средняя логарифмическая из движущих сил на концах адсорбера.

Установки с псевдооживленным слоем (периодического или непрерывного действия) целесообразно применять при высоком содержании взвешенных веществ в сточной воде. Размер частиц адсорбента при этом должен быть равным 0,5...1 мм. Скорость потока для частиц указанных размеров находится в пределах 8...12 м/ч.

## **Регенерация адсорбента**

Важнейшей стадией процесса адсорбционной очистки является регенерация активного угля. Адсорбированные вещества из угля извлекают десорбцией насыщенным или перегретым водяным паром либо нагретым инертным газом. Температура перегретого пара при этом (при избыточном давлении 0,3...0,6 МПа) равна 200...300 °С, а инертных газов – 120...140 °С. Расход пара при отгонке легколетучих веществ равен 2,5...3 кг на 1 кг отгоняемого вещества, для высококипящих – в 5...10 раз больше. После десорбции пары конденсируют и вещество извлекают из конденсата.

Для регенерации углей может быть использована и экстракция (жидкофазная десорбция) органическими низкокипящими и легко перегоняющимися с водяным паром растворителями. При регенерации органическими растворителями (метанолом, бензолом, толуолом, дихлорэтаном и др.) процесс проводят при нагревании или без нагревания. По окончании десорбции остатки растворителей из угля удаляют острым паром или инертным газом. Для десорбции адсорбированных слабых органических электролитов их переводят в диссоциированную форму. При этом ионы переходят в раствор, заключенный в порах угля, откуда их вымывают горячей водой, раствором кислот (для удаления органических оснований) или раствором щелочей (для удаления кислот).

В некоторых случаях перед регенерацией адсорбированное вещество путем химического превращения переводят в другое вещество, которое легче извлекается из адсорбента. В том случае, когда адсорбированные вещества не представляют ценности, проводят деструктивную регенерацию химическими реагентами (окислением хлором, озоном или термическим путем). Термическую регенерацию проводят в печах различной конструкции при температуре 700...800 °С в бескислородной среде. Регенерацию ведут смесью продуктов горения газа или жидкого топлива и водяного пара. Она связана с потерей части адсорбента (15...20 %). Разрабатываются биологические методы регенерации углей, при которых адсорбированные вещества биохимически окисляются. Этот способ регенерации значительно удлиняет срок использования сорбента.

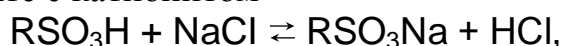
### **2.4.3. Ионный обмен**

Для извлечения из сточных вод металлов (цинка, меди, хрома, никеля, свинца, ртути, кадмия, ванадия, марганца), а также соединений мышьяка, фосфора, цианидов используется ионообменная очистка, позволяющая не только освобождать воду от загрязнения токсичными

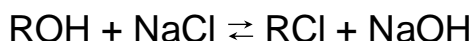
элементами, но и улавливать для повторного использования ряд ценных химических соединений.

В процессах водоочистки используют природные неорганические и органические иониты. К природным минеральным ионитам относятся цеолиты, глинистые минералы, фторапатит  $[Ca_{10}(PO_4)_6]F_2$ , гидроксилapatит  $[Ca_{10}(PO_4)_6](OH)_2$ , к органическим – гуминовые кислоты почв и углей. В процессах водоочистки находят применение синтетические иониты: неорганические (силикагели и труднорастворимые оксиды и гидроксиды алюминия, хрома, циркония) и органические (главным образом ионообменные смолы). Наибольшее практическое применение в водоочистных сооружениях нашли синтетические ионообменные смолы – высокомолекулярные соединения, радикалы которых образуют пространственную сетку (каркас) с фиксированными на ней ионообменными функциональными группами. В общем виде реакции ионного обмена протекают по схеме:

– при контакте с катионитом



– при контакте с анионитом



В воде иониты не растворяются, но набухают, причем размеры их микропор возрастают от 0,5...1,0 нм до 4 нм, а объем ионита увеличивается в 1,5...3,0 раза. Набухание влияет на селективность ионита, так как при малом размере его пор крупные ионы не могут достичь внутренних функциональных групп.

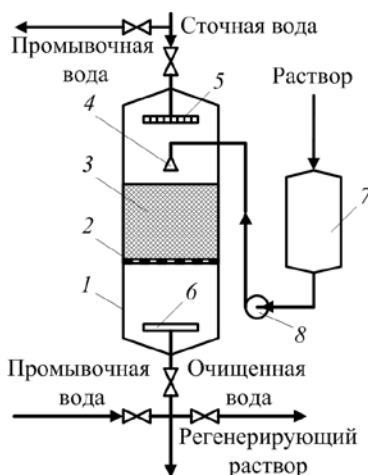


Рис.2.19. Схема ионообменной установки периодического воздействия:  
1 – колонка; 2 – решетка; 3 – слой ионита; 4–6 – распределители; 7 – бак с регенерирующим раствором; 8 - насос

Процесс ионообменной очистки сточных вод осуществляют на установках периодического (рис. 2.19) и непрерывного действия.



## Регенерация ионитов

Катиониты регенерируют 2...8%-ми растворами кислот. При этом они переходят в Н-форму. Регенерационные растворы – элюаты – содержат катионы. Затем, после взрыхления и промывки, катиониты заряжаются, например, в Na-форму, путем пропускания через них раствора поваренной соли. Тогда Н-функциональные группы, получающиеся при регенерации катионита кислотой, заменяются на Na-группу, а используемый для зарядки раствор поваренной соли подкисляется до соляной кислоты.

Отработанные аниониты регенерируют 2...6%-ми растворами щелочи. Аниониты при этом переходят в ОН-форму.

Элюаты содержат в сконцентрированном виде все извлеченные из сточных вод анионы. При необходимости регенерируемый анионит из ОН-формы можно перевести в Cl-форму, пропуская раствор NaCl. В отработанном заряжающем растворе накапливается едкий натр. Элюаты, представляющие собой растворы кислот и щелочей, нейтрализуют или обрабатывают с целью рекуперации ценных продуктов. Нейтрализацию проводят смешением кислых и щелочных элюатов, а также дополнительным введением кислоты или щелочи.

Степень регенерации (в %) определяют по формуле

$$\alpha = \frac{100 \cdot \theta_{\text{В}}}{\theta_{\text{П}}}$$

где  $\theta_{\text{В}}$  – восстановленная обменная емкость;  $\theta_{\text{П}}$  – полная обменная емкость.

На степень регенерации влияет тип ионита, состав насыщенного слоя, природа, концентрация и расход регенерирующего вещества, температура, время контакта и расход реагентов.

## Схемы ионообменных установок

Процессы ионообменной очистки сточных вод проводят на установках периодического и непрерывного действия. Первые состоят из аппаратов (фильтров или колонн) периодического действия, насосов, емкостей и контрольно-измерительных приборов.

Схемы установок с одним аппаратом приведены на рис. 2.20. Они отличаются системой регенерации ионита. По схеме *a* (рис. 2.20) регенерирующий раствор готовят непрерывно при подаче в эжектор воды и концентрированного раствора кислоты или щелочи. Подачу кислоты или щелочи прекращают после пропускания через ионит заданного объема регенерационного раствора. Однако подачу воды продолжают для отмычки ионита от регенерационного раствора. Элюат и промывные воды после нейтрализации сбрасывают в канализацию.

По схеме *б* (рис. 2.20) регенерирующий раствор готовится в специальной емкости. В этом случае достигается сокращение расхода регенерирующего агента и объема регенератора, так как регенерационный раствор готовят путем добавления к первой порции промывной воды концентрированного реагента. В результате часть реагента находится в обороте.

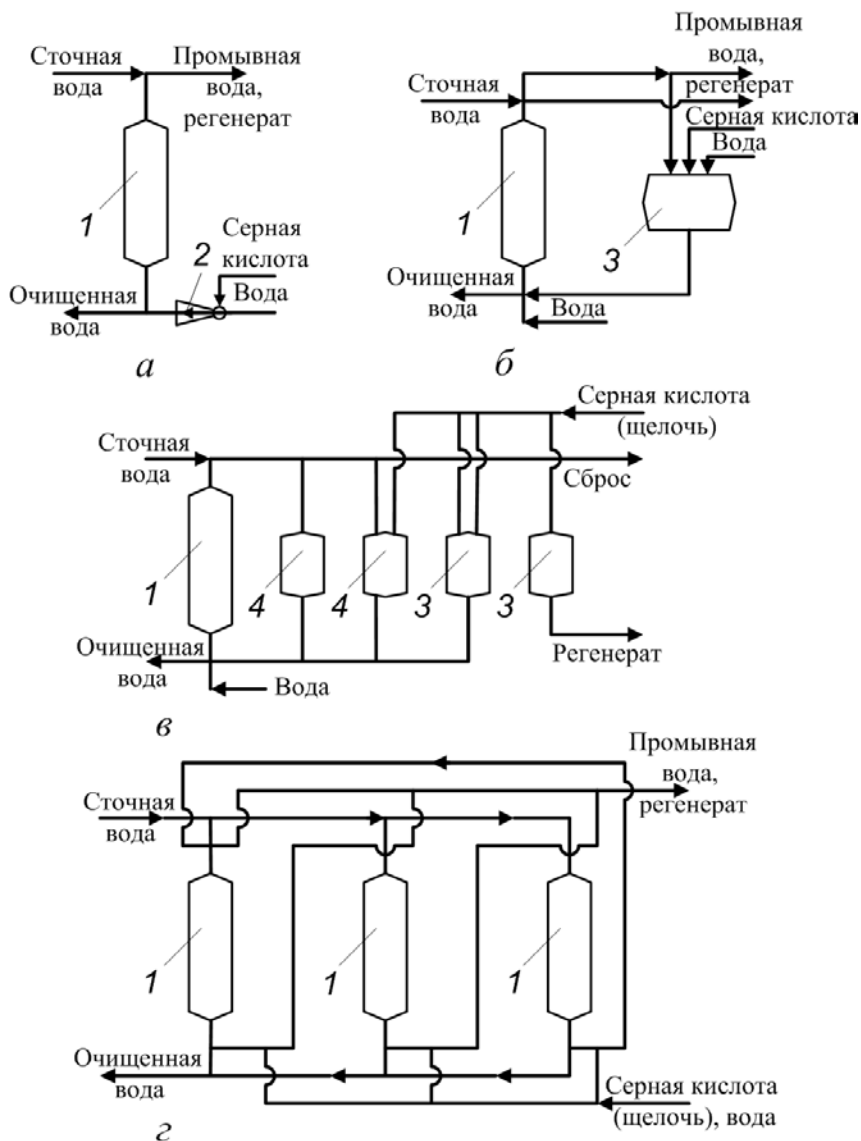


Рис. 2.20. Схемы ионообменных установок периодического действия:  
*а* – с проточной регенерацией, *б* – с оборотом части регенерата,  
*в* – с фракционированием регенерата, *г* – с «плавающим» фильтром; 1 – фильтры,  
 2 – эжектор, 3 – емкости для регенерата, 4 – емкости для промывных вод

Наименьший расход реагентов достигается в схеме с фракционированием регенерата (рис. 2.20 *в*). Регенерат разделяют на отдельные фракции и собирают в емкости. Первую фракцию, более концентрированную, направляют на переработку. Промывную воду

собирают также в две емкости. При следующей регенерации в качестве первой фракции регенерационного раствора используют вторую фракцию от предыдущей регенерации, доукрепленную до заданной концентрации реагентом.

В схеме 2 с «плавающим» фильтром получают более концентрированные регенераты. Очищаемую воду последовательно пропускают через два фильтра. При начале проскока во втором фильтре подключают отрегенированный третий фильтр, а первый по ходу воды выводят на регенерацию и т. д. Регенерацию отработанного фильтра можно производить по описанным выше вариантам.

Недостатки установок периодического действия: большие объемы аппаратов, значительный расход реагентов, большая единовременная загрузка сорбента, сложность автоматизации процесса.

Непрерывный ионообмен дает возможность уменьшить затраты смолы, реагентов для регенерации, промывной воды, а также применять более компактное оборудование по сравнению с периодическим ионообменником. Колонны непрерывного действия могут работать как с движущимся слоем смолы, так и с кипящим слоем. Установки непрерывного действия содержат несколько ионообменных аппаратов с катионитом и анионитом.

#### **2.4.4. Экстракция**

Для очистки сточных вод от фенолов, масел, органических кислот и других вредных органических примесей применяется метод экстракции. В качестве экстрагентов для очистки сточных вод обычно используют органические растворители, нерастворимые в воде: бензол и некоторые его производные, сероуглерод, тетрахлорид углерода, минеральные масла.

Хороший экстрагент должен удовлетворять ряду требований:

- 1) растворять извлекаемое вещество гораздо лучше, чем вода, т. е. обладать высоким коэффициентом распределения;
- 2) обладать хорошей селективностью по отношению к извлекаемым примесям;
- 3) иметь низкую растворимость в сточной воде и не образовывать с ней устойчивых эмульсий;
- 4) существенно отличаться от сточной воды по плотности, так как значительная разность плотностей обеспечивает быстрое и полное разделение фаз;
- 5) регенерироваться простым и дешевым способом;
- 6) не взаимодействовать с извлекаемым веществом, так как это может затруднить регенерацию экстрагента и увеличить его потери;

7) по возможности не быть токсичным и взрывоопасным и не вызывать коррозии материала аппарата.

Экстракция осуществляется в колонках и других аппаратах с насадкой, куда подаются сточные воды и экстрагент. Если плотность экстрагента меньше плотности воды, его подают в аппарат снизу, в противном случае – сверху. После насыщения извлекаемой примесью экстрагент направляют в отстойники, где происходит разделение жидкостей, а воду – на дальнейшую обработку.

Целесообразность использования экстракции для очистки сточных вод определяется ценностью извлекаемых примесей и их концентрацией. Для каждого вещества существует «концентрационный предел» рентабельности его экстрагирования; последнее считается экономически выгодным, если стоимость извлекаемых веществ компенсирует все затраты на его проведение. Обычно принято считать, что при концентрациях выше 3...4 г/л примеси целесообразно извлекать экстракцией.

Для очистки сточных вод наиболее часто применяют процессы противоточной многоступенчатой экстракции и непрерывной противоточной экстракции.

Схема многоступенчатой экстракционной установки представляет собой батарею смесителей и отстойников (рис. 2.21 *а*). Каждая ступень состоит из смесителя воды с экстрагентом и отстойника. Свежий экстрагент и сточная вода поступают с противоположных сторон. В первой ступени сточная вода с небольшим содержанием примесей перемешивается со свежим экстрагентом, а в последней ступени исходная сточная вода смешивается с экстрагентом, который уже содержит значительное количество извлекаемого вещества. Такое движение потоков способствует созданию большой движущей силы процесса экстракции и эффективной очистке сточных вод.

Схема непрерывной экстракции в противоточной колонне с регенерацией экстрагента показана на рис. 2.21, *б*. Экстракция производится в аппаратах различной конструкции: распылительных, насадочных, тарельчатых колонках, а также в центробежных экстракторах.

Для экстракции фенолов из сточных вод применяют простые и сложные эфиры. Простые эфиры: диэтиловый, дибутиловый, диизопропиловый; сложные эфиры: этилацетат, *n*-амилацетат, *изо*-бутилацетат, *изо*-амилацетат.

Подсмольные воды полукоксования бурых углей очищаются экстракцией фенсольваном либо трикрезилфосфатом. Фенсольван – смесь сложных алифатических эфиров – труднорастворим в воде, но обладает высокой растворяющей способностью по отношению к

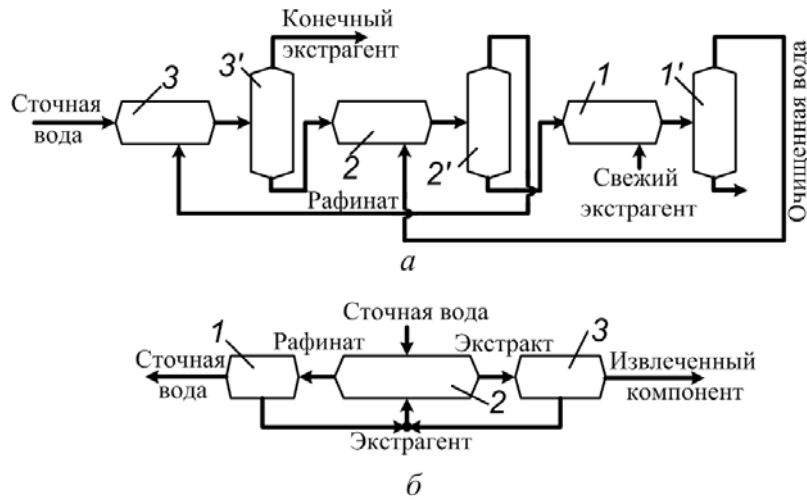


Рис.2.21. Схемы экстракционных установок:  
*а* - схема многоступенчатой противоточной экстракции: 1-3 – смесители, 1'-3' - отстойники; *б* - схема непрерывной противоточной экстракции с регенерацией экстрагента из экстракта и рафината: 1 - система для удаления экстрагента из рафината, 2 – колонна, 3 - система для удаления экстрагента из экстракта

фенолам. Коэффициент распределения для 2%-го раствора фенола (карболовая кислота) составляет 49. Плотность его  $0,88 \text{ кг/м}^3$ . После регенерации экстракционная способность фенсольвана восстанавливается полностью.

Схема установки показана на рис. 2.22. Фенолсодержащие сточные воды охлаждаются до  $20...25 \text{ }^\circ\text{C}$  в холодильнике, продувают газом, содержащим  $\text{CO}_2$  (дымовыми газами) для перевода фенолятов в свободные фенолы. После этого они поступают на экстракцию. Из

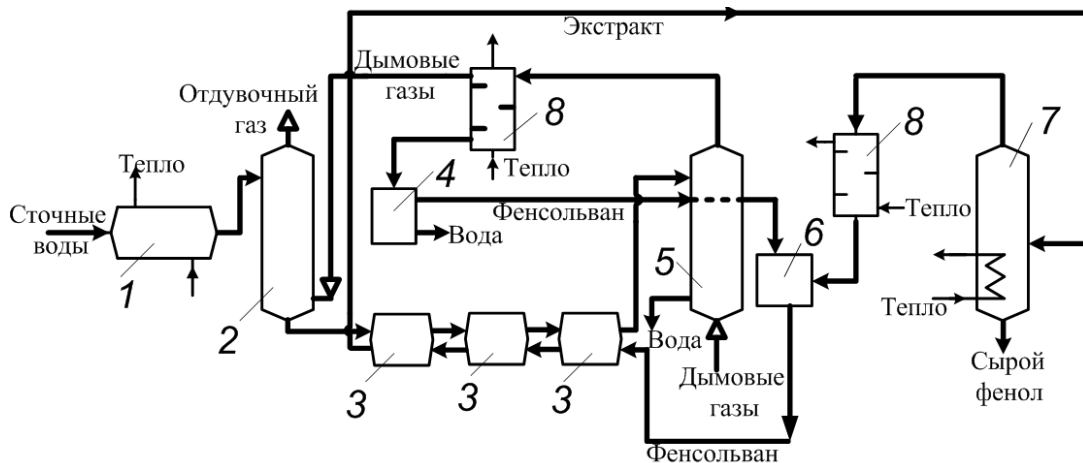
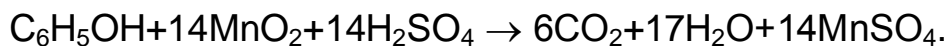


Рис. 2.22. Схема установки для извлечения фенолов из сточных вод:  
 1 - холодильник; 2 - колонна продувки; 3 - экстракторы; 4 - декантатор;  
 5 - ректификационная колонна; 6 - сборник фенсольвана; 7 - регенерационная колонна; 8 - конденсаторы

первой ступени экстракт поступает в ректификационную колонну, где отгоняется фенсолван. После конденсации он поступает в сборник, а фенол направляют на использование. Обесфеноленную воду из последней ступени экстрактора направляют в колонну, где паром отдувают фенсолван, который направляют в сборник.

Степень извлечения фенолов из сточной воды достигает 92...97 %. Остаточное содержание фенолов составляет до 800 мг/л. Доочистку сточных вод проводят окислением диоксидом марганца (пиролюзитом) в серной кислоте:



Имеются экстракционные установки и для извлечения нитропродуктов из сточных вод. Такие воды содержат 1,5...2,2 % нитропродуктов и 0,25...0,5 % свободной азотной кислоты.

Нитропродукты экстрагируют бензолом. В процессе экстракции азотная кислота нитрует бензол, и ее концентрация в сточных водах снижается до 0,01...0,03 %. Экстракцию проводят в двухступенчатой установке. Экстракт идет на ректификацию. После ректификации бензол возвращают на повторное использование, а выделенные нитропродукты (кубовый остаток) перерабатывают в готовую продукцию.

#### **2.4.5. Десорбция, дезодорация и дегазация**

Многие сточные воды загрязнены летучими неорганическими и органическими примесями: сероводородом, сероуглеродом, аммиаком и др. Для освобождения сточных вод от летучих примесей используются методы эвапорации и десорбции. Эвапорацию (отгонку с водяным паром) сточных вод осуществляют в периодически действующих аппаратах или в дистилляционных колоннах непрерывного действия. Десорбцию летучих примесей инертными малорастворимыми газами (азотом, диоксидом углерода) обычно проводят в тарельчатых, насадочных и распылительных колоннах. Степень удаления летучих веществ из сточных вод увеличивается с ростом температуры газожидкостной смеси и поверхности контакта фаз.

Если сточные воды содержат дурно пахнущие вещества – меркаптаны, амины, сероводород, альдегиды, некоторые углеводороды, они обязательно подвергаются дезодорации, т. е. устранению неприятного запаха. Дезодорация осуществляется различными методами, среди которых наибольшее распространение получил метод аэрации, заключающийся в продувании воздуха через сточную воду.

На рис.2.23 представлена схема удаления плохо пахнущих веществ на тарельчатой колонне каскадного типа. Сточная вода

растекается в виде пленок по тарелкам, на которых происходит ее контакт с воздухом. Затем воздух с выделенными из сточных вод веществами поступает в насадочную колонну, которая орошается раствором щелочи.

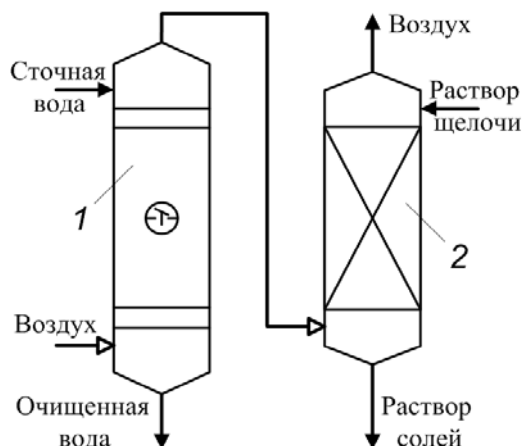


Рис. 2.23. Схема установки для дезодорации сточных вод:  
1 - тарельчатая колонна; 2 - насадочная колонна

Для достижения 85...90%-ной степени очистки расход воздуха на  $1 \text{ м}^3$  сточной воды составляет  $12...15 \text{ м}^3$  при числе тарелок не менее 10, плотности орошения  $20...80 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}$  в  $1 \text{ ч}$  и концентрации щелочи не менее  $40 \text{ г/л}$ . Недостаток метода заключается в том, что не все загрязнения удаётся удалить и часть их остается в сточной воде.

Присутствие в сточных водах растворенных газов затрудняет очистку и использование сточных вод, усиливает коррозию трубопроводов и аппаратуры, придает воде неприятный запах. Растворенные газы из воды удаляют дегазацией, которую осуществляют химическими, термическими и десорбционными (аэрационными) методами.

Для удаления из воды диоксида углерода используют методы аэрации, проводимые в пленочных, насадочных, барботажных и вакуумных дегазаторах (рис. 2.24).

Пленочные дегазаторы – колонны с различного вида насадками, работающие в условиях противотока дегазируемой воды и воздуха, подаваемого вентилятором. Дегазаторы струйно-пленочного типа представляют собой градирни без принудительной подачи воздуха. Из дегазаторов барботажного типа наиболее эффективны пенные аппараты.

Вакуумные дегазаторы – насадочные колонны, работающие под вакуумом, в которых вода равномерно распределяется по поверхности насадки. Наиболее полная дегазация достигается при разбрызгивании в вакууме и одновременном подогреве воды (рис. 2.24 а). Воду нагревают паром в котле. Пар из змеевика попадает в теплообменник, где вода

подогревается. Вакуум создают отсасыванием дегазированной воды насосом.

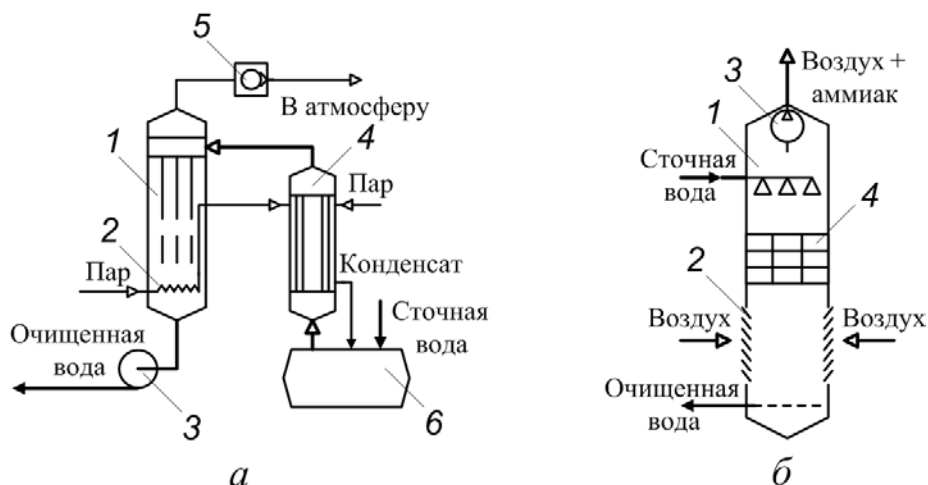


Рис. 2.24. Схемы установок для дегазации:

*а* - схема установки для дегазации в вакууме с подогревом: 1 - котел, 2 - змеевик, 3 - насос; 4 - теплообменник. 5 - вакуум-насос, 6 – емкость; *б* - схема установки для отдувки аммиака: 1 - ввод сточной воды, 2 - ввод воздуха, 3 - вентилятор, 4 - хордовая насадка

Выбор типа дегазатора зависит от производительности установки, концентрации удаляемого газа и необходимой степени дегазации. Для удаления  $\text{CO}_2$  при ее содержании в воде не более 150 мг/л и производительности до 150 м<sup>3</sup>/ч используют дегазаторы с хордовой насадкой. Плотность орошения насадки 40 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч), удельный расход воздуха 20 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>. При глубоком удалении газа применяют барботажные или пенные дегазаторы производительностью до 20 м<sup>3</sup>/ч.

При термической дегазации воды от растворенного диоксида углерода или кислорода пропускают пар через воду и нагревают ее до температуры кипения при внешнем давлении. В этом случае парциальное давление газа над водой снижается до нуля и растворимость его также падает до нуля. Вследствие нарушения равновесия в системе происходит выделение избыточных газов из воды (физическая десорбция).

Для интенсивной дегазации необходимо, чтобы вода непрерывно контактировала с новыми порциями пара при большой поверхности контакта фаз в течение достаточного времени. Температура воды должна быть близка к температуре насыщенного пара при данном давлении. Процесс проводят в аппаратах, называемых *деаэраторами*. Они имеют разную конструкцию и работают под вакуумом, при атмосферном или повышенном давлении.

Аммиак из сточных вод удаляют продувкой водяным паром или воздухом. Ионы аммония в воде находятся в равновесном состоянии с



аммиаком и ионами водорода ( $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ ). При  $p\text{H} = 7$  в воде могут находиться ионы аммония в истинном растворе; при  $p\text{H} = 12$  – только растворенный аммиак, который можно выделить из воды.

Скорость перехода газообразного аммиака из воды в атмосферу зависит от поверхностного натяжения на границе «воздух – вода» и от разности концентраций аммиака в воде и воздухе. Для осуществления процесса отдувки аммиака из воды повышают  $p\text{H}$  воды до значений 10,8...11,5 и создают большую поверхность контакта между воздухом или паром и водой. Отдувку аммиака производят на установке, изображенной на рис. 2.24 б.

---

---

### Вопросы для самоконтроля

---

---

1. Объясните механизм коагуляции и назовите наиболее распространенные коагулянты. Как устанавливается доза коагулянта?
2. Что такое флокуляция? Каков механизм этого процесса?
3. Назовите стадии очистки сточных вод коагуляцией и флокуляцией и основную аппаратуру для проведения этого процесса.
4. Объясните механизм элементарного акта флотации и укажите, как определить энергию образования комплекса пузырек-частица.
5. Дайте характеристику способов флотации с выделением воздуха из растворов. Какой способ является наиболее распространенным и почему?
6. Чем отличается напорная флотация от флотации с механическим диспергированием воздуха в воде?
7. Рассмотрите физико-химические основы процесса очистки сточных вод адсорбцией.
8. Рассмотрите основные схемы адсорбционной очистки сточных вод.
9. Назовите область применения и объясните сущность ионообменной очистки сточных вод.
10. Объясните стадии очистки сточных вод экстракцией. Укажите требования, предъявляемые к экстрагенту.
11. Рассмотрите основы удаления примесей из сточных вод методами десорбции, дезодорации и дегазации. Укажите области их применения и эффективность.



## **2.5. Электрохимические методы очистки сточных вод**

Электрохимические методы очистки сточных вод (электрофлотация, электрокоагуляция, электродиализ, анодное окисление и катодное восстановление). Эти методы позволяют проводить очистку сточных вод непрерывно или периодически, использовать автоматизированные технологические схемы и извлекать из промышленных стоков ценные продукты.

### **2.5.1. Электрокоагуляция**

При прохождении сточной воды через межэлектродное пространство электролизера происходят электролиз воды, поляризация частиц, электрофорез, окислительно-восстановительные процессы, взаимодействие продуктов электролиза друг с другом.

При использовании нерастворимых электродов коагуляция может происходить в результате электрофоретических явлениях и разряда заряженных частиц на электродах, образования в растворе веществ (хлора, кислорода), разрушающих сольватные соли на поверхности частиц. Такой процесс можно использовать для очистки вод при невысоком содержании коллоидных частиц и низкой устойчивости загрязнений.

Для очистки промышленных сточных вод, содержащих высокоустойчивые загрязнения, проводят электролиз с использованием растворимых стальных или алюминиевых анодов. Под действием тока происходит растворение металла, в результате чего в воду переходят катионы железа или алюминия, которые встречаясь с гидроксидными группами, образуют гидроксиды металлов в виде хлопьев. Наступает интенсивная коагуляция.

На процесс электрокоагуляции оказывает влияние материал электродов, расстояние между ними, скорость движения сточной воды между электродами, ее температура и состав, напряжение и плотность тока. С повышением концентрации взвешенных веществ более 100 мг/л эффективность электрокоагуляции снижается. С уменьшением расстояния между электродами расход энергии на анодное растворение металла уменьшается. Теоретический расход электроэнергии для растворения 1 г железа составляет 2,9 Вт·ч, а 1 г алюминия – 12 Вт·ч. Электрокоагуляцию рекомендуют проводить в нейтральной или слабощелочной среде при плотности тока не более 10 А/м<sup>2</sup>, расстоянии между электродами не более 20 мм и скорости движения воды не менее 0,5 м/с.

Достоинства метода электрокоагуляции – компактность установок и простота управления, отсутствие потребности в реагентах, малая

чувствительность к изменениям условий проведения процесса очистки (температуры, pH среды, присутствия токсичных веществ), получение шлама с хорошими структурно механическими свойствами. Недостатком метода является повышенный расход металла и электроэнергии. Электрокоагуляция находит применение в пищевой, химической и целлюлозно-бумажной промышленности.

Технологическая схема очистки сточных вод электрокоагуляцией показана на рис. 2.25. Обезвоживание осадка проводят в фильтр-прессе или центрифуге. Выделяющийся в процессе газообразный водород можно использовать для флотации гидроксида. С этой целью в схеме очистки используют электрокоагуляторы-флотаторы, или специальные флотационные аппараты, например гидроциклоны-флотаторы. Замена отстойника на флотаторы позволяет значительно уменьшить габариты установки, сократить капитальные затраты и получить менее влажный осадок гидроксида.

Электрокоагуляционную очистку сточных вод можно использовать для очистки от эмульсий нефтепродуктов, масел, жиров (электрокоагулятор представляет собой ванну с электродами). Эффективность очистки от нефтепродуктов составляет: от масел – 54...68 %, от жиров – 92...99 % при удельном расходе электроэнергии 0,2...3,0 Вт·ч/м<sup>3</sup>.

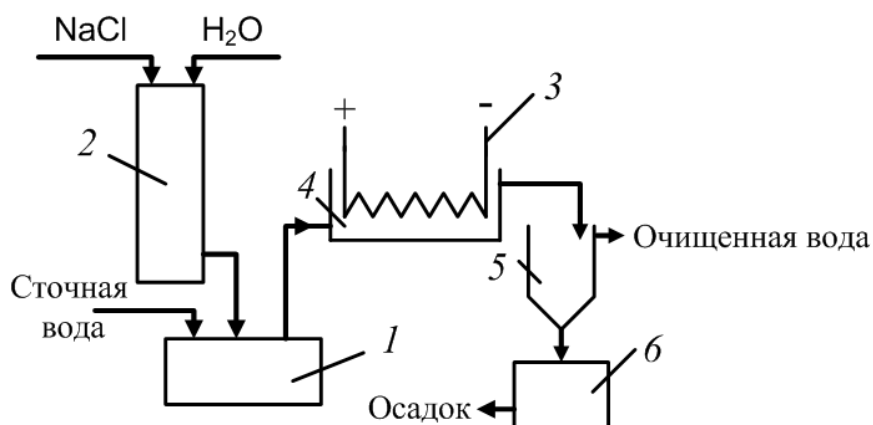


Рис.2.25. Схема электрокоагуляционной установки:

1 - усреднитель; 2 - бак для приготовления раствора; 3 - источник постоянного тока; 4 - электрокоагулятор; 5 - отстойник; 6 - аппарат для обезвоживания осадка

На практике наиболее широко используют безнапорные пластинчатые электрокоагуляторы, направление движения жидкости в которых может быть горизонтальным и вертикальным. Они могут быть однопоточными, многопоточными и смешанными. При многопоточной схеме движения вода проходит одновременно через промежутки между электродами (параллельное соединение каналов). При однопоточной схеме вода проходит между электродами последовательно

(последовательное соединение каналов), что уменьшает пассивацию электродов. Скорость движения воды у однопоточных электрокоагуляторов в  $n-1$  раз больше, чем у многопоточных ( $n$  – число электродов).

### **2.5.2. Электрофлотация**

Сущность электрофлотационного способа очистки сточных вод заключается в переносе вещества из жидкости на ее поверхность с помощью пузырьков газа, образующихся при электролизе воды. Газовые пузырьки поднимаются в жидкости, сталкиваются со взвешенными частицами, прилипают к ним и флотируют их на поверхность жидкости.

Для питания электролизеров применяется постоянный ток. При прохождении через ячейку количества электричества, равного 96500 Кл, на электродах выделяется по 1 г-экв водорода и кислорода при полном использовании тока. В современных электролизерах потери по току составляют 2...3%.

В процессе электролиза воды на катоде выделяется водород, а на аноде – кислород. При прохождении через ячейку 3600 Кл электричества (при выходе по току  $\eta = 98\%$ ) разлагается 0,3293 г воды, выделяется 0,0366 г (0,41 л) водорода и 0,2927 г (0,205 л) кислорода.

Основную роль в процессе флотации частиц выполняют, как правило, пузырьки, выделяющиеся с поверхности катода. Плотность тока на катоде составляет обычно 100...300 А/м<sup>2</sup>. Пузырьки газа возникают на поверхности электрода, растут и, по достижении определенного диаметра, отрываются от поверхности. Возникновение пузырьков на электродах, как и при кипении жидкости, происходит в некоторых точках – центрах газообразования (выступах, шероховатостях и т. п.).

Размер пузырьков, отрывающихся от поверхности электрода, зависит не только от величины краевого угла смачивания, но и от кривизны поверхности электрода. Замена пластинчатых катодов на проволочную сетку приводит к уменьшению крупности пузырьков и, следовательно, к повышению эффективности очистки воды. С увеличением толщины проволоки размеры пузырьков возрастают. Крупность пузырьков водорода, выделяющихся на проволочном катоде из меди или нержавеющей стали диаметром 0,2...1,5 мм, с увеличением толщины проволоки катода возрастает от 17...62 до 120...140 мкм и более. Увеличение кривизны поверхности электрода обуславливает сужение пределов диаметров образующихся пузырьков.

Таким образом, эффективность процесса флотационной очистки сточных вод зависит от числа и крупности пузырьков. Для получения

требуемого числа пузырьков определенного размера необходим правильный подбор материала и диаметра проволоки катода, а также плотности тока. Изменяя плотность тока, можно варьировать степень насыщенности пульпы пузырьками и таким образом регулировать скорость флотационной очистки сточных вод.

Исследования показали, что с увеличением степени насыщения пульпы пузырьками скорость электрофлотационного процесса повышается до некоторого предела, соответствующего оптимальному значению плотности тока ( $200...260 \text{ А/м}^2$ ) и газосодержанию 0,1 %. Дальнейшее увеличение газосодержания не приводит к ускорению процесса флотации вследствие образования в пульпе потоков, способствующих отрыву пузырьков от взвешенных частиц. Оптимальная плотность тока при очистке сточной воды от жира составляет  $100...150 \text{ А/м}^2$ , что соответствует степени насыщения воды пузырьками водорода, равной 0,05 %. С повышением плотности флотируемых частиц значение оптимальной плотности тока возрастает. С увеличением времени обработки сточной воды эффективность очистки также повышается.

Очистка сточных вод, загрязненных мелкодисперсными и коллоидными частицами, связана с необходимостью применения коагулянтов. Воздействие электрического поля обуславливает ослабление или нарушение агрегативной устойчивости дисперсных систем. Одновременное введение коагулянта в сточную воду приводит к коагуляции частиц и флотации их пузырьками газа, выделяющимися при электролизе воды. Введение коагулянтов в воду (солей алюминия, железа) можно осуществлять путем электрохимического растворения электрода – анода, изготовленного из алюминия или железа.

Принципиальная схема электрофлотационного аппарата с растворимым анодом приведена на рис. 2.26. Аппарат представляет собой прямоугольный трехсекционный резервуар, в нижней части которого расположены электроды. В секции 1 электроды изготовлены в виде вертикальных алюминиевых пластин – катода 11 и растворимого анода 12. В секции 2 расположена графитовая пластина – анод 10, параллельно ей установлена проволочная сетка – катод 9. В секции 3 графитовые пластины 8, выполняющие роль анода, установлены вертикально под катодом 7.

Сточная вода из канала 13 поступает в секцию 1, где происходит растворение металла анода в воде, образование гидроокиси металла с одновременной коагуляцией примесей и флотацией их на поверхность жидкости. Установленные в секциях 2 и 3 графитовые аноды интенсифицируют процесс очистки, способствуя более тщательному выделению из сточной воды взвешенных частиц.

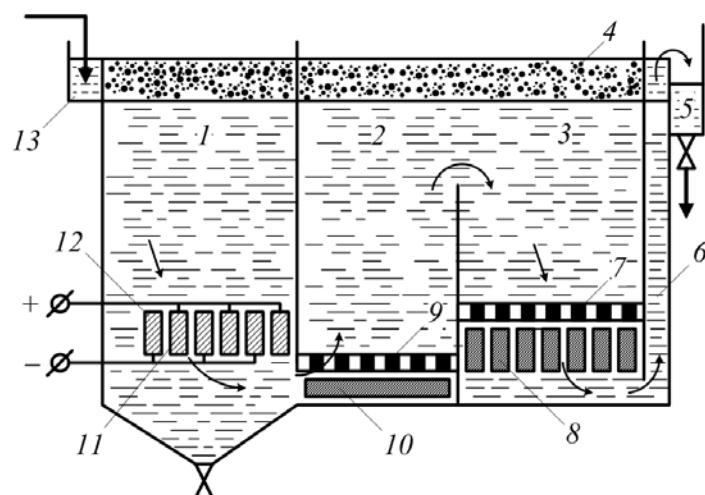


Рис.2.26. Принципиальная схема электрофлотационного аппарата с растворимыми электродами:  
 1-3 - секции аппарата; 4 - пенный продукт; 5 - канал для очищенной воды;  
 6 - корпус; 7-12 - электроды; 13 - канал для исходной сточной воды

Вертикальное расположение графитовых пластин в секции 3 позволяет увеличить поверхность контакта сточной воды с поверхностью анода для повышения эффективности обеззараживания воды. В случае отсутствия необходимости в обеззараживании воды аппараты изготавливают без секции 3.

Испытания аппарата показали, что содержание взвешенных веществ в сточной воде снижается в 10...12 раз, а прозрачность увеличивается с 1 до 15...20 см. Оптимальная плотность тока при этом составляет 160...240 А/м<sup>2</sup>, в зависимости от содержания взвешенных веществ и температуры воды. С повышением температуры эффективность очистки возрастает. Рабочая высота слоя жидкости в аппарате должна составлять 1...1,2 м.

Недостатком указанной конструкции является образование в процессе разложения воды гремучего газа (смеси  $\frac{2}{3}$  водорода и  $\frac{1}{3}$  кислорода). Смеси кислорода и водорода взрывоопасны в широком интервале концентраций водорода:

|                             | Нижний предел<br>взрываемости, % H <sub>2</sub> | Верхний предел<br>взрываемости, % H <sub>2</sub> |
|-----------------------------|---|--|
| Смесь водорода с кислородом | 4,5   | 95   |
| Смесь водорода с воздухом   | 4,1   | 74,5   |

По этой причине в промышленности применяют электролизеры с разделением газов.

Применение электролиза для очистки сточных вод синтеза алифатических углеводородов обеспечивало снижение содержания взвешенных веществ на 50...70 % и одновременное уменьшение

загрязненности воды органическими продуктами. Эффект очистки воды по ХПК составил 40...57 %, по углеводородам – 55...82 %.

В результате электрофлотационной очистки сточных вод целлюлозных заводов концентрация взвешенных веществ в воде без применения коагулянтов снижалась от 1000 до 10 мг/л. Рекомендованы следующие параметры обработки: плотность тока – 100 А/м, напряжение – 8...10 В, высота столба воды – 0,5...1 м, движение сточной воды сверху вниз со скоростью 4 м/ч в направлении электродов (плоских листов), расположенных на дне электрофлотатора. Отмечаются преимущества процесса: эффективность, простота регулировки, небольшие габариты, высокая плотность осадка, простота эксплуатации.

В процессе электрофлотационной очистки сточных вод целлюлозных производств уменьшается цветность вод на 94,5...97,5 % и ХПК на 40...74 %.

Высокий эффект получен при электрофлотационной очистке сточных вод кожевенного завода от хрома, а также сточных вод текстильных и пищевых предприятий.

Расход электроэнергии на очистку сточных вод зависит не только от характера загрязнений, состава и расхода сточных вод, но и от конструкции аппаратов, материала электродов и параметров процесса. На обработку 1 м<sup>3</sup> сточной воды пищевой промышленности расходуется 0,15...0,50 кВт·ч электроэнергии, а 1 м<sup>3</sup> сточной воды целлюлозно-бумажного производства – 3...4 кВт·ч.

### **2.5.3. Анодное окисление и катодное восстановление**

Процессы анодного окисления разработаны для очистки сточных вод от цианидов, тиоцианатов, аминов, спиртов, альдегидов, нитросоединений, азокрасителей, меркаптанов. В процессе электрохимического окисления все эти, в том числе и достаточно сложные органические соединения полностью распадаются с образованием CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> или переходят в более простые и нетоксичные вещества, которые можно удалить из сточных вод другими методами.

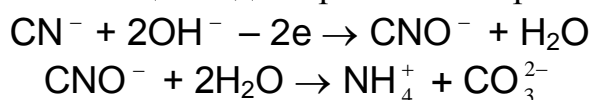
Эти процессы разработаны для очистки сточных вод от растворенных примесей (цианидов, роданидов, аминов, спиртов, альдегидов, нитросоединений, азокрасителей, сульфидов, меркаптанов и др.). В процессах электрохимического окисления вещества, находящиеся в сточных водах, полностью распадаются с образованием CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>O или образуются более простые и нетоксичные вещества, которые можно удалять другими методами.

В качестве анодов используют различные электролитически нерастворимые материалы: графит, магнетит, диоксиды свинца, марганца и рутения, которые наносят на титановую основу.

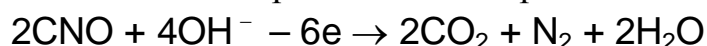
Катоды изготавливают из молибдена, сплава вольфрама с железом или никелем, из графита, нержавеющей стали и других металлов, покрытых молибденом, вольфрамом или их сплавами. Процесс проводят в электролизерах с диафрагмой и без нее. Кроме основных процессов электроокисления и восстановления, одновременно могут протекать электрофлотация, электрофорез и электрокоагуляция.

Сточные воды, содержащие цианиды, образуются на предприятиях машиностроения, приборостроения, черной и цветной металлургии, химической промышленности и др. В состав вод, кроме простых цианидов (KCN, NaCN), входят комплексные цианиды цинка, меди, железа и других металлов, концентрация которых колеблется от 10 до 600 мг/л. Обычно *pH* таких стоков колеблется в пределах 8...12.

Анодное окисление цианидов протекает по реакциям



Окисление может быть проведено и с образованием азота:



Для повышения электропроводности сточных вод и снижения расхода энергии к водам добавляют NaCl. При концентрации CN ≈ 1 г/л добавляют 20...30 г/л NaCl. В этом процессе используют графитовый анод и стальной катод. Оптимальные условия окисления: анодная плотность тока – 3...4 А/дм<sup>2</sup>, межэлектродное пространство – 3 см, скорость воды – 30 дм<sup>3</sup>/ч, *pH* – 8...9. Степень очистки приближается к 100 %.

Разрушение цианидов происходит в результате электрохимического окисления на аноде и окисления хлором, выделяющимся на аноде в результате разложения NaCl. Этот процесс описывается следующими реакциями:

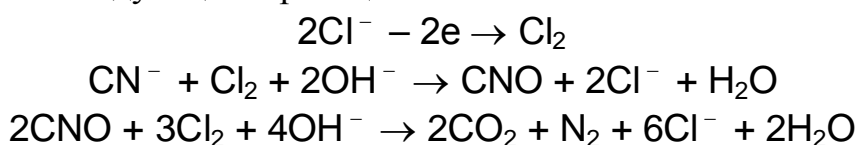


Схема установки для электрохимической очистки сточных вод от цианидов приведена на рис. 2.27. При использовании электролизеров проточного типа целесообразно разделять их перегородками на несколько отсеков. В процессе электролиза сточные воды перемешивают сжатым воздухом. Обработанные сточные воды содержат до 200 мг/л активного хлора и должны быть обезврежены.



Металлы, которые выделяются на катоде, утилизируют. Установка компактна и проста в эксплуатации.

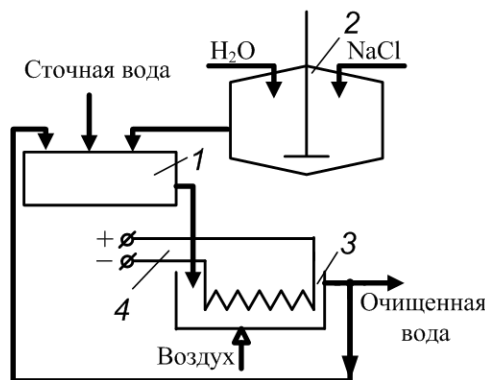
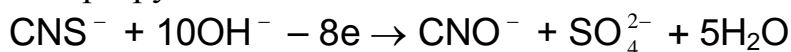


Рис.2.27. Схема установки электрохимической очистки сточных вод от цианидов соединений:

1 - усреднитель; 2 - бак для приготовления раствора хлорида натрия;  
3 - электролизер; 4 - источник постоянного тока

Роданиды разрушаются по схеме

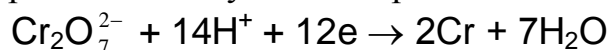


Сульфид-ионы при  $pH=7$  окисляются до сульфатов. При меньших значениях  $pH$  может образоваться элементарная сера.

Катодное восстановление применяют для удаления из сточных вод ионов металлов с получением осадков, для перевода загрязняющего компонента в менее токсичные соединения или в легко выводимую из воды форму (осадок, газ). Его можно использовать для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов:  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Sn}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ . Катодное восстановление металлов происходит по схеме



При этом металлы осаждаются на катоде и могут быть рекуперированы. Например, при восстановлении соединений хрома была достигнута высокая степень очистки: концентрация снижалась с 1000 до 1 мг/л. Расход электроэнергии на очистку составил 0,12 кВт·ч/м<sup>3</sup>. При электролизе сточных вод, содержащих  $\text{H}_2\text{CrO}_7$ , оптимальное значение  $pH=2$ , а плотность тока – 0,2...2 А/дм<sup>2</sup>. Реакция восстановления протекает следующим образом



Очистку сточных вод от ионов  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  проводят на катодах, состоящих из смеси угольного и сернистого порошков в соотношении С : S от 80 : 20 до 20 : 80 при  $pH < 7$  и плотности тока – 2,5 А/дм<sup>2</sup>. Осаждение этих ионов происходит в виде нерастворимых сульфидов или бисульфидов, которые удаляют механически.

Процессы анодного окисления используются также для

обесцвечивания сточных вод от различных красителей, а также для очистки сточных вод целлюлозно-бумажных, нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других заводов.

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Объясните основы процесса очистки электрокоагуляцией.
2. Каковы закономерности процесса электрофлотации?. Опишите используемое в этом методе оборудование.
3. Объясните основы процесса очистки сточных вод методами анодного окисления и катодного восстановления.
4. Назовите области применения, достоинства и недостатки электрохимических методов очистки сточных вод.



## **2.6. Химические методы очистки сточных вод**

К химическим методам водоочистки относят коагуляцию и флокуляцию, нейтрализацию загрязняющих примесей, их окисление и восстановление. Все эти методы требуют расхода реагентов, и потому дороги. Они используются либо для предварительной очистки стоков перед основной биохимической очисткой, либо после нее как метод доочистки сточных вод.

### **2.6.1. Коагуляция**

Коагуляция – это процесс укрупнения диспергированных частиц и объединения их в агрегаты под влиянием физических и химических процессов, самопроизвольно протекающих в растворе, или под влиянием внесенных в раствор специальных веществ – коагулянтов. Это процесс укрупнения дисперсных частиц в результате их взаимодействия и объединения в агрегаты. В очистке сточных вод ее применяют для ускорения процесса осаждения тонкодисперсных примесей и эмульгированных веществ. Коагуляция наиболее эффективна для удаления из воды коллоидно-дисперсных частиц, т. е. частиц размером 1...100 мкм. Коагуляция может происходить самопроизвольно или под влиянием химических и физических процессов. В процессах очистки сточных вод коагуляция происходит под влиянием добавляемых к ним специальных веществ – коагулянтов. Коагулянты в воде образуют

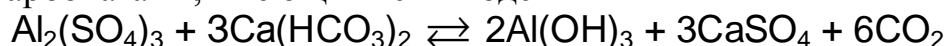
хлопья гидроксидов металлов, которые быстро оседают под действием силы тяжести. Хлопья обладают способностью улавливать коллоидные и взвешенные частицы и агрегировать их. Так как коллоидные частицы имеют слабый отрицательный заряд, а хлопья коагулянтов – слабый положительный заряд, то между ними возникает взаимное притяжение.

Для коллоидных частиц характерно образование на поверхности частиц двойного электрического слоя. Одна часть двойного слоя фиксирована на поверхности раздела фаз, а другая создает облако ионов, т. е. одна часть двойного слоя является неподвижной, а другая – подвижной (диффузный слой). Разность потенциалов, возникающая между неподвижной и подвижной частями слоя (в объеме жидкости), называется *дзета-потенциалом*  $\xi$  или *электрокинетическим потенциалом*, отличным от термодинамического потенциала  $E$ , который представляет собой разность потенциалов между поверхностью частиц и жидкостью. Дзета-потенциал зависит как от  $E$ , так и от толщины двойного слоя. Его значение определяет величину электростатических сил отталкивания частиц, которые предохраняют частицы от слипания друг с другом. Малый размер коллоидных частиц загрязнений и отрицательный заряд, распределенный на поверхности этих частиц, обуславливает высокую стабильность коллоидной системы.

Чтобы вызвать коагуляцию коллоидных частиц, необходимо снизить величину их дзета-потенциала до критического значения добавлением ионов, имеющих положительный заряд. Таким образом, при коагуляции происходит дестабилизация коллоидных частиц вследствие нейтрализации их электрического заряда. Эффект коагуляции зависит от валентности иона коагулянта, несущего заряд, противоположный знаку заряда частицы. Чем выше валентность, тем более эффективно коагулирующее действие.

Для начала коагуляции частицы должны приблизиться друг к другу на расстояние, при котором между ними действуют силы притяжения и химического сродства. Сближение частиц происходит в результате броуновского движения, а также при ламинарном или турбулентном движении потока воды. Коагулирующее действие солей есть результат гидролиза, который проходит вслед за растворением.

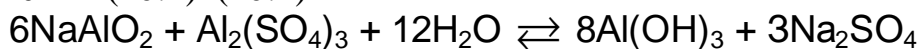
В качестве коагулянтов обычно используют соли алюминия, железа или их смеси. Из них наиболее распространен сульфат алюминия, который эффективен в интервале значений  $pH = 5...7,5$ . Он хорошо растворим в воде и имеет относительно низкую стоимость. Его применяют в сухом виде или в виде 50%-го раствора. При коагулировании сульфата алюминия он взаимодействует с гидрокарбонатами, имеющимися в воде



Алюминат натрия применяют в сухом виде или в виде 45%-го раствора. Он является щелочным реагентом, при  $pH = 9,3...9,8$  образует быстроосаждающиеся хлопья. Для нейтрализации избыточной щелочности можно использовать кислоты или дымовые газы, содержащие  $CO_2$ ,

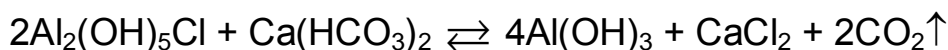


В большинстве случаев используют смесь  $NaAlO_2 + Al(SO_4)_3$  в соотношении (10:1)–(20:1)



Совместное употребление этих солей дает возможность повысить эффект осветления, увеличить плотность и скорость осаждения хлопьев, расширить оптимальную область  $pH$  среды.

Оксихлорид алюминия обладает меньшей кислотностью и поэтому пригоден для очистки слабощелочных вод; ввиду высокого содержания в нем водорастворимого алюминия ускоряется хлопьеобразование и осаждение коагулированной взвеси, например, по реакции



Из солей железа в качестве коагулянтов используют сульфаты железа  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$ ,  $Fe(SO_4)_3 \cdot 3H_2O$  и  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , а также хлорное железо  $FeCl_3$ . Наибольшее осветление происходит при использовании солей трехвалентного железа. Хлорное железо применяют в сухом виде или в виде 10...15%-х растворов. Сульфаты используют в виде порошков. Доза коагулянта зависит от  $pH$  сточных вод. Для  $Fe^{3+}$   $pH = 6...9$ , а для  $Fe^{2+}$   $pH = 9,5$  и выше. Для подщелачивания сточных вод используют  $NaOH$  и  $Ca(OH)_2$ .

Соли железа как коагулянты имеют ряд преимуществ перед солями алюминия: лучшее действие при низких температурах воды; более широкая область оптимальных значений  $pH$  среды; большая прочность и гидравлическая крупность хлопьев; возможность использовать для вод с более широким диапазоном солевого состава; способность устранять вредные запахи и привкусы, обусловленные присутствием сероводорода. Однако имеются и недостатки: образование при реакции катионов железа с некоторыми органическими соединениями сильно окрашивающих растворимых комплексов; сильные кислотные свойства, усиливающие коррозию аппаратуры; менее развитая поверхность хлопьев.

При использовании смесей  $Al_2(SO_4)_3$  и  $FeCl_3$  в соотношениях от 1 : 1 до 1 : 2 достигается лучший результат коагулирования, чем при отдельном использовании реагентов. Происходит ускорение осаждения хлопьев. Кроме названных коагулянтов, для обработки сточных вод

могут быть использованы различные глины, алюминийсодержащие отходы производства, травильные растворы, пасты, смеси, шлаки, содержащие диоксид кремния.

Оптимальную дозу реагента устанавливают на основании пробного коагулирования.

Скорость коагуляции зависит от концентрации электролита. При малых концентрациях электролита эффективность соударений частиц, т.е. отношение числа столкновений, окончившихся слипанием, к общему числу столкновений, близка к нулю ( $\psi = 0$ ). По мере роста концентрации скорость коагуляции увеличивается, но не все столкновения эффективны – такую коагуляцию называют медленной. При  $\psi = 1$  наступает быстрая коагуляция, при которой все столкновения частиц заканчиваются образованием агрегатов.

В полидисперсных системах коагуляция происходит быстрее, чем в монодисперсных, так как крупные частицы при оседании увлекают за собой более мелкие. Форма частиц также влияет на скорость коагуляции. Например, удлиненные частицы коагулируют быстрее, чем шарообразные.

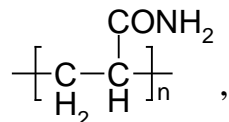
Метод коагулирования широко применяется при очистке сточных вод текстильных предприятий, фабрик искусственного волокна, нефтеперерабатывающих заводов и заводов химической промышленности, а также стоков банно-прачечных предприятий.

### **2.6.2. Флокуляция**

Флокуляция – это процесс агрегации взвешенных частиц при добавлении в сточную воду высокомолекулярных соединений, называемых флокулянтами. В отличие от коагуляции при флокуляции агрегация происходит не только при непосредственном контакте частиц, но и в результате взаимодействия молекул адсорбированного на частицах флокулянта.

Флокуляцию проводят для интенсификации процесса образования хлопьев гидроксидов алюминия и железа с целью повышения скорости их осаждения. Использование флокулянтов позволяет снизить дозы коагулянтов, уменьшить продолжительность процесса коагуляции и повысить скорость осаждения образующихся хлопьев.

Для очистки сточных вод используют природные и синтетические флокулянты. К природным флокулянтам относятся крахмал, декстрин, эфиры, целлюлозы и др. Активный диоксид кремния ( $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ) является наиболее распространенным неорганическим флокулянтом. Из синтетических органических флокулянтов наибольшее применение в нашей стране получил полиакриламид (ПАА)



технический (ПАА) и гидролизованый (ГПАА). Технический ПАА получают при взаимодействии акрилонитрила с серной кислотой с последующей полимеризацией акриламида. Гидролизованый полиакриламид получают омылением технического ПАА щелочью.

При выборе состава и дозы флокулянта учитывают свойства его макромолекул и природу диспергированных частиц. Оптимальная доза ПАА для очистки промышленных сточных вод колеблется в пределах 0,4...1 г/м<sup>3</sup>. ПАА действует в широком диапазоне рН среды. Однако скорость осаждения сфлокулированных хлопьев при рН > 9 уменьшается.

Механизм действия флокулянтов основан на следующих явлениях: адсорбции молекул флокулянта на поверхности коллоидных частиц; ретикуляции (образования сетчатой структуры) молекул флокулянта; слипанию коллоидных частиц за счет сил Ван-дер-Ваальса. При действии флокулянтов между коллоидными частицами образуются трехмерные структуры, способные к более быстрому и полному отделению от жидкой фазы. Причиной возникновения таких структур является адсорбция макромолекул флокулянта на нескольких частицах с образованием между ними полимерных мостиков. Коллоидные частицы заряжены отрицательно, что способствует процессу взаимной коагуляции с гидроксидом алюминия или железа. При добавлении активированного силиката увеличивается в 2...3 раза скорость осаждения и повышается эффект осветления.

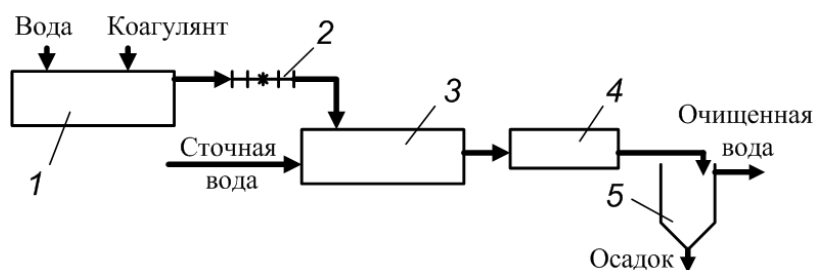


Рис. 2.28. Схема установки для очистки вод коагуляцией и флокуляцией:  
1 - емкость для приготовления растворов; 2 - дозатор; 3 - смеситель; 4 - камера хлопьеобразования; 5 - отстойник

Полиакриламид выпускается в виде 7...9%-го геля, затвердевающего при температуре ниже 273 °К. При добавлении ПАА к воде ее вязкость резко возрастает.

Эффективность любого флокулянта рассчитывают по формуле

$$\eta_{\Phi} = \frac{w_{\text{сф}} - w}{w \cdot q},$$

где  $w_{\text{сф}}$  и  $w$  – скорость осаждения сфлокулированного и несфлокулированного шлама соответственно, мм/с;  $q$  – расход флокулянта на 1 т твердого вещества, г.

Процесс очистки сточных вод коагуляцией и флокуляцией состоит из следующих стадий: дозирование и смешение реагентов со сточной водой; хлопьеобразование и осаждение хлопьев (рис. 2.28).

### 2.6.3. Нейтрализация

Сточные воды металлургических, химических, машиностроительных и некоторых других производств содержат большие количества кислот или щелочей. Перед сбросом таких вод в водоемы или перед использованием в технологических процессах их необходимо нейтрализовать. Практически нейтральными считаются воды, имеющие  $pH = 6,5 \dots 8,5$ .

Нейтрализацию сточных вод можно осуществлять различными путями: смешением кислых и щелочных стоков, фильтрованием сквозь нейтрализующие материалы, добавлением реагентов, сорбцией кислых газов щелочными водами и сорбцией аммиака кислыми водами. Выбор способа нейтрализации зависит от объема и концентрации сточных вод, от режима их поступления, наличия и стоимости реагентов.

#### Нейтрализация смешением

Этот метод применяют, если на одном предприятии или на соседних предприятиях имеются кислые и щелочные воды, не загрязненные другими компонентами. Кислые и щелочные воды смешивают в емкости (рис. 2.29) с мешалкой и без мешалки. В

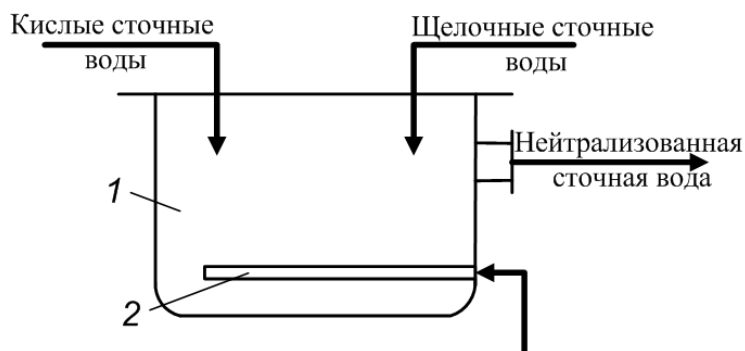


Рис.2.29. Нейтрализатор смешения:  
1 - емкость; 2 - распределитель воздуха

последнем случае перемешивание ведут воздухом при его скорости в линии подачи 20...40 м/с.

При переменной концентрации сточных вод в схеме предусматривают установку усреднителя или обеспечивают автоматическое регулирование подачи в камеру смешения. Расчет соотношения сточных вод, направляемых в камеру смешения, проводят по стехиометрическим уравнениям.

При избытке кислых или щелочных сточных вод добавляют соответствующие реагенты. Принципиальная схема водно-реагентной нейтрализации приведена на рис. 2.30. Нейтрализованную воду используют в производстве, а осадок обезвоживают на шламовых площадках или вакуум-фильтрах.

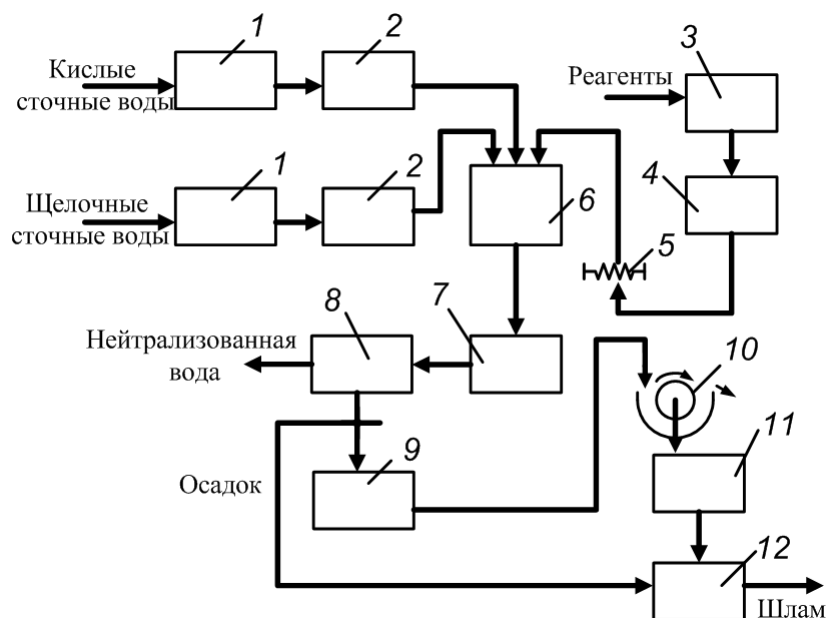


Рис. 2.30. Схема станции реагентной нейтрализации:

- 1 - песколовки; 2 - усреднители; 3 - склад реагентов; 4 - растворный бак; 5 - дозатор; 6 - смеситель; 7 - нейтрализатор; 8 - отстойник; 9 - осадкоуплотнитель; 10 - вакуум-фильтр; 11 - накопитель обезвоженных осадков; 12 - шламовая площадка

Для нейтрализации кислых сточных вод в качестве реагентов используются щелочи ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ), сода ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), аммиачная вода ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), карбонаты кальция и магния ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ) и известковое молоко с содержанием извести 5...10 %.

При нейтрализации кислых стоков твердыми реагентами (магнезитом, доломитом, известняком и т. д.) или твердыми промышленными отходами (золами, шлаками сталеплавильного и доменного производства и т. д.) сточные воды очищают, фильтруя их сквозь слой реагента.

Для нейтрализации щелочных стоков используют отходящие газы, содержащие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$  и т. д. Это позволяет не только



нейтрализовать сточные воды, но и одновременно производить высокоэффективную очистку самих газов от вредных компонентов.

### Нейтрализация путем добавления реагентов

Для нейтрализации кислых вод могут быть использованы NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>OH (аммиачная вода), CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>·MgCO<sub>3</sub> (доломит), цемент. Однако наиболее дешевым реагентом является гидроксид кальция (известковое молоко) с содержанием активной извести Ca(OH)<sub>2</sub> 5...10 %. Соду и гидроксид натрия следует использовать, если они являются отходами производства. Иногда для нейтрализации применяют различные отходы производства. Например, шлаки сталеплавильного, феррохромового и доменного производств используют для нейтрализации вод, содержащих серную кислоту.

Реагенты выбирают в зависимости от состава и концентрации кислой сточной воды. При этом учитывают, будет ли в процессе образовываться осадок или нет. Различают три вида кислотосодержащих сточных вод:

- 1) воды, содержащие слабые кислоты (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH);
- 2) воды, содержащие сильные кислоты (HCl, HNO<sub>3</sub>). Для их нейтрализации может быть использован любой названный выше реагент. Соли этих кислот хорошо растворимы в воде;
- 3) воды, содержащие серную и сернистую кислоты. Кальциевые соли этих кислот плохо растворимы в воде и выпадают в осадок.

Известь для нейтрализации вводят в сточную воду в виде гидроксида кальция – известкового молока («мокрое» дозирование) или в виде сухого порошка («сухое» дозирование). Схема установки для нейтрализации кислых вод известковым молоком показана на рис. 2.31.

Для гашения извести используют шаровые мельницы мокрого помола, в которых одновременно происходят тонкое измельчение и гашение. Для смешения сточных вод с известковым молоком применяют гидравлические смесители различных типов: дырчатые, перегородчатые, вихревые, с механическими мешалками или барботажные с расходом воздуха 5...10 м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup> свободной поверхности.

При нейтрализации сточных вод, содержащих серную кислоту, известковым молоком в осадок выпадает гипс CaSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O. Растворимость гипса мало меняется с температурой. При перемещении таких растворов происходит отложение гипса на стенках трубопроводов и их забивка. Для устранения забивки трубопровода необходимо промывать их чистой водой или добавлять в сточные воды специальные умягчители, например гексаметафосфат. Увеличение скорости

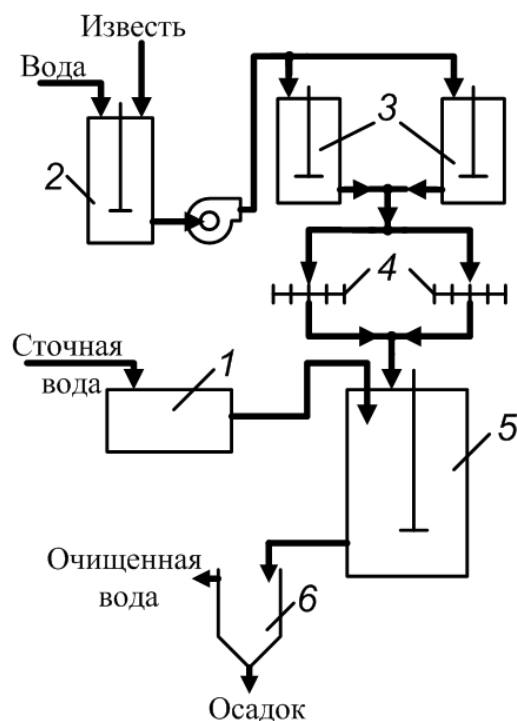


Рис.2.31. Схема установки нейтрализации кислых сточных вод гидроксидом кальция (известковым молоком):  
 1 – усреднитель; 2 - аппарат для гашения извести ( $\text{CaO}$ ); 3 - растворные баки;  
 4 – дозаторы; 5 - нейтрализатор; 6 - отстойник

движения нейтрализованных вод способствует уменьшению отложений гипса на стенках трубопровода.

Для нейтрализации щелочных сточных вод используют различные кислоты или кислые газы.

### Нейтрализация фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы

В этом случае для нейтрализации кислых вод проводят фильтрование их через слой магнезита, доломита, известняка, твердых отходов (шлака, золы). Процесс ведут в фильтрах-нейтрализаторах, которые могут быть горизонтальными или вертикальными. Для вертикальных фильтров используют куски известняка или доломита размером 30...80 мм. При высоте слоя материала 0,85...1,2 м скорость должна быть не более 5 м/с, а продолжительность контакта не менее 10 мин. У горизонтальных фильтров скорость течения сточных вод составляет 1...3 м/с.

### Нейтрализация кислыми газами

Для нейтрализации щелочных сточных вод в последнее время начинают использовать отходящие газы, содержащие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,

$N_2O_3$  и др. Применение кислых газов позволяет не только нейтрализовать сточные воды, но и одновременно производить высокоэффективную очистку самих газов от вредных компонентов.

Использование для нейтрализации щелочных сточных вод диоксида углерода имеет ряд преимуществ по сравнению с применением серной или соляной кислот, позволяет резко снизить стоимость процесса нейтрализации. Вследствие плохой растворимости  $CO_2$  уменьшается опасность переокисления нейтрализованных растворов. Образующиеся карбонаты находят большее применение по сравнению с сульфатами или хлоридами, кроме того коррозионные и токсичные воздействия  $CO_3^{2-}$  ионов в воде меньше, чем ионов  $SO_4^{2-}$  и  $Cl_3^-$ .

Процесс нейтрализации может быть проведен в реакторах с мешалкой (рис. 2.32), в распылительных, пленочных и тарельчатых колоннах.

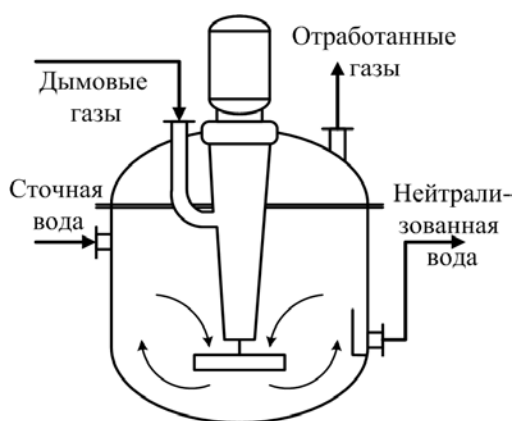


Рис.2.32. Нейтрализатор щелочных сточных вод дымовыми газами

Дымовые газы вентилятором подают в кольцевое пространство вокруг вала мешалки и распределяют мешалкой в виде пузырьков и струи в сточной воде, поступающей внутрь реактора. Благодаря большой поверхности контакта между водой и газами происходит быстрая нейтрализация сточной воды. Присутствие в газах  $SO_2$  способствует нейтрализации щелочных сточных вод.

При проведении процесса в тарельчатых колоннах степень нейтрализации увеличивается с ростом скорости газа и уменьшением плотности орошения.

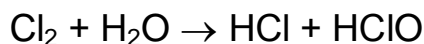
## 2.6.4. Окисление и восстановление

Реакции окисления – восстановления используются для перевода токсичных соединений, содержащихся в ряде промышленных стоков, в менее токсичные с последующим удалением последних из сточных вод. Этот метод водоочистки связан с большим расходом реагентов и используется в тех случаях, когда опасные токсиканты (цианиды, соединения мышьяка) нельзя извлечь из сточных вод другими способами.

В качестве окислителей используют хлор, озон  $O_3$ , пероксид водорода  $H_2O_2$ , пиролюзит  $MnO_2$ , перманганат калия  $KMnO_4$ .

### Окисление хлором

Чаще всего в системах водоочистки используют хлор и хлорсодержащие соединения, способные выделять «активный» хлор. При введении хлора в воду образуются соляная и хлорноватистая кислоты:



Хлорноватистая кислота частично диссоциирует на ионы. Сумма  $Cl_2 + HClO + ClO^-$  называется свободным «активным» хлором. Его источниками могут быть также хлорная известь  $Ca(ClO)_2$ , гипохлориты (например  $NaClO$ ), хлориты (например  $NaClO_2$  или диоксид хлора  $ClO_2$ ).

В присутствии аммонийных соединений в воде образуются хлорноватистая кислота, хлорамин  $NH_2Cl$  и дихлорамин  $NHCl_2$ . Хлор в виде хлорамина называется связанным «активным» хлором.

Процесс хлорирования проводят в хлораторах периодического и непрерывного действия, напорных и вакуумных (рис.2.33). В этих

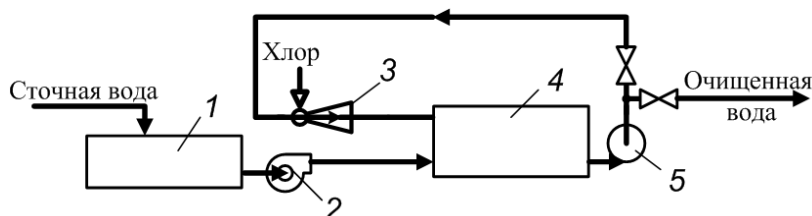


Рис.2.33. Схема установки для очистки воды хлорированием:  
1 – усреднитель; 2,5 – насосы; 3 - инжектор; 4 - емкость

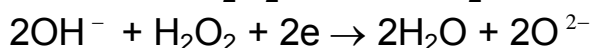
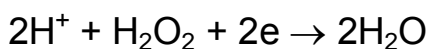
установках сточные воды очищаются от сероводорода, гидросульфидов, метилсернистых соединений, фенолов, цианидов.

### Окисление пероксидом водорода

Прекрасным окислителем является пероксид водорода – бесцветная жидкость без запаха, которая смешивается с водой во всех

отношениях и при интенсивном перемешивании легко разлагает нитриты, нитрилы, альдегиды и фенолы, содержащиеся в сточных водах;  $\text{H}_2\text{O}_2$  используется также для обесцвечивания сточных вод: при  $\text{pH} = 7 \dots 10$  пероксид водорода быстро разлагает активные красители, причем присутствие катализаторов (сульфатов железа или меди) ускоряет процесс разложения в 8...10 раз.

Пероксид водорода в кислой и щелочной средах разлагается по следующим схемам:

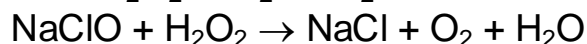
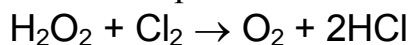


В кислой среде более отчетливо выражена окислительная функция, а в щелочной – восстановительная.

В кислой среде пероксид водорода переводит соли двухвалентного железа в соли трехвалентного, азотистую кислоту – в азотную, сульфиды – в сульфаты. Цианиды в цианаты окисляются в щелочной среде ( $\text{pH} = 9 \dots 12$ ).

В разбавленных растворах процесс окисления органических веществ протекает медленно, поэтому используют катализаторы – ионы металлов переменной валентности ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ). Например, процесс окисления пероксидом водорода с солью железа протекает весьма эффективно при  $\text{pH} = 3 \dots 4,5$ .

В процессах водообработки используют не только окислительные, но и восстановительные свойства пероксида водорода. В нейтральной и слабощелочной средах он легко взаимодействует с хлором и гипохлоритами, переводя их в хлориды:



Эти реакции используют при дехлорировании воды. Избыток пероксида водорода можно удалять, обрабатывая его диоксидом марганца.

### **Окисление кислородом воздуха**

Кислород воздуха используют при очистке воды от железа для окисления соединений двухвалентного железа в трехвалентное с последующим отделением от воды гидроксида железа.

Окисление проводят при аэрировании воздуха через сточную воду в башнях с хордовой насадкой. Образующийся гидроксид железа отстаивают в контактном резервуаре, а затем отфильтровывают. Использование колонн с кусковой насадкой или кольцами Рашига нецелесообразно, так как происходит зарастание насадки. Возможен процесс упрощенной аэрации. В этом случае над поверхностью фильтра разбрызгивают воду, которая в виде капель падает на поверхность

фильтрующей загрузки. При контакте капля воды с воздухом происходит окисление железа.

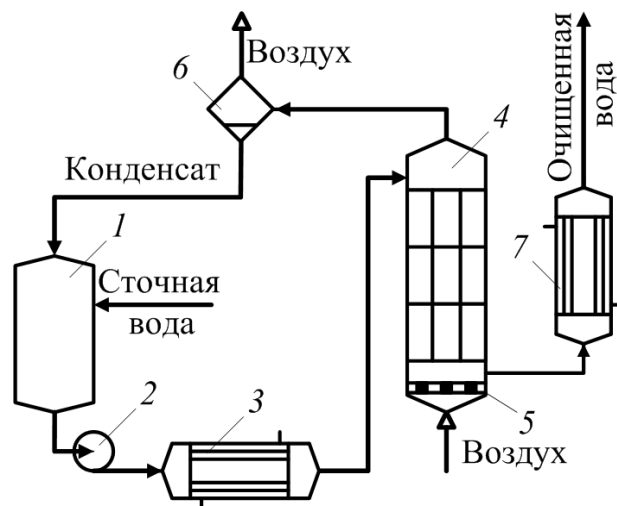


Рис.2.34. Схема установки окисления сульфидов:

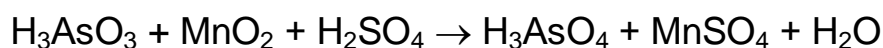
1 - приемный резервуар; 2 - насос; 3 - теплообменник; 4 - окислительная колонна; 5 - воздухораспределительное устройство; 6 - сепаратор; 7 - холодильник

Кислородом воздуха окисляют также сульфидные стоки целлюлозных, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. Принципиальная схема установки окисления сульфидов приведена на рис. 2.34. Процесс окисления гидросульфидной и сульфидной серы протекает через ряд стадий при изменении валентности серы с  $-2$  до  $+6$ . При этом при окислении гидросульфида и сульфида до тиосульфата  $pH$  раствора повышается, при окислении гидросульфида до сульфида и сульфата  $pH$  раствора понижается, а при окислении сульфида до сульфита и сульфата активная реакция среды не изменяется.

С повышением температуры и давления скорость реакции и глубина окисления сульфидов и гидросульфидов увеличивается. Теоретически на окисление 1 г сульфидной серы расходуется 1 г кислорода.

### Окисление пиролюзитом

Процесс проводят фильтрацией сточной воды через этот материал или в аппаратах с мешалкой. Пиролюзит является природным материалом, состоящим в основном из диоксида марганца. Его широко используют для окисления трехвалентного мышьяка в менее токсичный – пятивалентный:



Повышение температуры способствует увеличению степени окисления. Оптимальный режим окисления следующий: расход  $\text{MnO}_2$  –

четырежды по сравнению со стехиометрическим, кислотность воды – 30...40 г/л, температура воды – 70...80°C.

## Озонирование

Очень перспективным окислителем для сточных вод является озон  $O_3$ . Озонирование не только очищает стоки от фенолов, нефтепродуктов, сероводорода, соединений мышьяка, поверхностно-активных веществ, цианидов, канцерогенных ароматических углеводородов, пестицидов и многих других токсичных примесей, но одновременно обесцвечивает и обеззараживает воду и устраняет ее запахи и привкусы. При обработке воды озоном патогенные микроорганизмы погибают в несколько тысяч раз быстрее, чем при ее хлорировании.

Технологические схемы для очистки сточных вод озонированием представлены на рис. 2.35. В сточную воду озон подают в виде озонозонодушной или озонкислородной смеси, в которой содержание озона обычно не превышает 3%. Озонирование промышленных сточных вод осуществляют в барботажных, насадочных, тарельчатых колоннах и других контактных аппаратах.

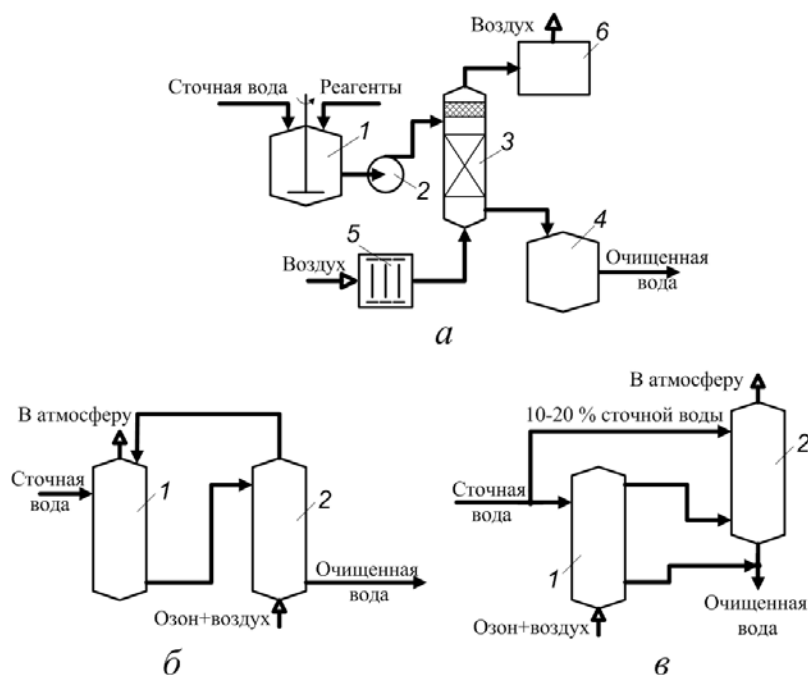


Рис.2.35. Схемы установок для очистки сточных вод озоном:

- а* - одноступенчатая: 1 – смеситель, 2 – насос, 3 – реактор, 4 – сборник, 5 - озонаторная установка, 6 - блок очистки отходящих газов; *б* - двухступенчатая с предварительным озонированием; *в* - двухступенчатая с разделением сточных вод на два потока: 1, 2 - реакторы

Поскольку озон приближается к сильным отравляющим

веществам (превосходит, например, синильную кислоту), на установках очистки сточных вод озонированием предусматривается стадия очистки отходящих газов от остатков озона.

Для этой цели проводят разбавление газов до безопасных концентраций озона перед их выбросом в атмосферу, деструкцию озона или его утилизацию. Для деструкции остаточного озона применяют адсорбцию, катализ или пиролиз. При адсорбции газы пропускают через колонну с активным углем в виде зерен диаметром 1...6 мм. Недостатком процесса является то, что уголь легко сорбирует органические вещества. В результате он медленно окисляется по мере окисления органических веществ озоном. В среднем затрачивается 450 г активного угля на 1 кг озона.

Деструкция катализом состоит в быстром разложении озона на кислород и атомный кислород в присутствии катализатора (платиновой сетки) при 60...120 °С. Способ эффективен при значительных концентрациях озона в обрабатываемом воздухе. Продолжительность контакта с катализатором не более 1 секунды. Наличие влаги в газе оказывает отрицательное влияние на эффективность деструкции озона. Присутствие в газе хлора, оксидов азота и других окислителей оказывает химическое воздействие на катализатор. Катализаторы регенерируют в печах при 500 °С в течение 6...7 ч.

Пиролиз применяют для деструкции при незначительных концентрациях озона в газе. Процесс проводят при температуре 340...350 °С, его продолжительность 3 секунды. Наибольшее распространение получили электрические термодеструкторы с рекуперацией энергии (рис. 2.36). Остаточный озон при 20 °С поступает

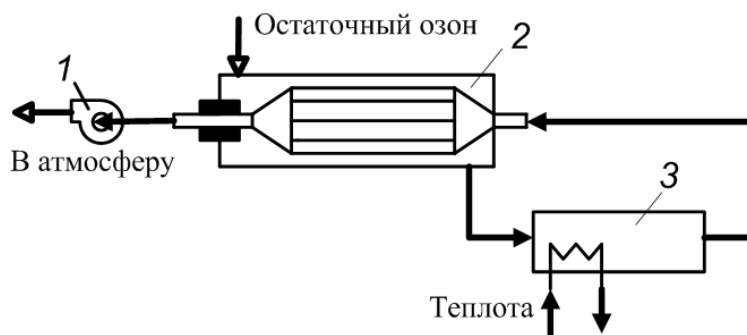


Рис.2.36. Схема термодеструктора:

1 - вентилятор; 2 – теплообменник; 3 - камера электронагрева

в теплообменник, где горячим газом нагревается до 285 °С и поступает в камеру нагрева для повышения температуры до 350 °С. При этой температуре озон разлагается и чистый газ поступает в теплообменник, где отдает тепло исходному газу. Производительность аппаратов по газу 1350 м<sup>3</sup>/ч, или 27 кг озона в 1 ч.



Для утилизации остаточного озона турбовентиляторами или водокольцевыми компрессорами повышают давление газов до величины, позволяющей направить их в контактные реакторы. Для этой цели используют также механические или гидравлические эмульгаторы.

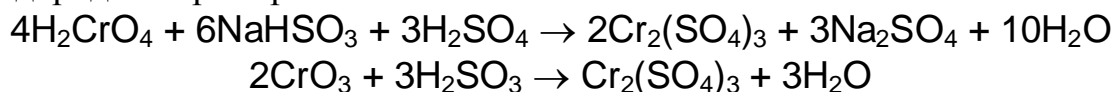
Процесс очистки сточных вод значительно сокращается при совместном использовании ультразвука и озона, ультрафиолетового облучения и озона. Ультрафиолетовое облучение ускоряет окисление в  $10^2 \dots 10^4$  раз. Процесс окисления можно разделить на две стадии:

- 1) фотохимическое возбуждение молекул под действием УФ-облучения;
- 2) окисление озоном.

На первой стадии образуются высокоактивные в отношении озона свободные радикалы и соединения с низкой молекулярной массой, которые, поглощая свет, окисляются быстрее, чем исходные.

### **2.6.5. Очистка восстановлением**

В тех случаях, когда сточные воды содержат легко восстанавливаемые вещества, используются методы восстановительной очистки. Эти методы часто применяются для удаления из сточных вод соединений хрома, ртути, мышьяка. Хром (VI), содержащийся в некоторых промышленных стоках, восстанавливают до  $\text{Cr}^0$  с последующим осаждением его в щелочной среде в форме гидроксида  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ . В качестве восстановителей используют активированный уголь, органические отходы (например газетную бумагу), сульфат железа  $\text{FeSO}_4$ , гидросульфит натрия  $\text{NaHSO}_3$ , диоксид серы  $\text{SO}_2$ , водород. Например:



Последний процесс позволяет сочетать улавливание хрома из сточных вод с очисткой отходящих газов от диоксида серы.

Очистку проводят на установках периодического или непрерывного действия.

На установке периодического действия (рис. 2.37 а) сточные воды из сборника насосами перекачивают в реактор. При  $p\text{H}$  сточных вод больше 3 в реактор вводят серную кислоту до достижения  $p\text{H} = 2,5 \dots 3$ . После этого вводят бисульфит натрия и производят интенсивное перемешивание в течение 30 мин. Затем вводят щелочь и полиакриламид и производят осаждение осадка, который удаляют из реактора.

В установках непрерывного действия (рис. 2.37 б) сточные воды сначала поступают в усреднитель, затем в смеситель и нейтрализатор. Усреднитель рассчитывают на пребывание воды в нем 10...20 мин.

Раствор бисульфата вводят в смеситель после снижения  $pH$  до 2,5...3. В конец смесителя или в камеру обезвреживания вводят гидроксид кальция (известковое молоко) или раствор  $NaOH$  для увеличения  $pH$  до 8...9. Процесс обезвреживания длится до 30 мин. Осадок образуется в нейтрализаторе и выпадает медленно, трудно уплотняется и обезвреживается. Для ускорения осаждения добавляют полиакриламид.

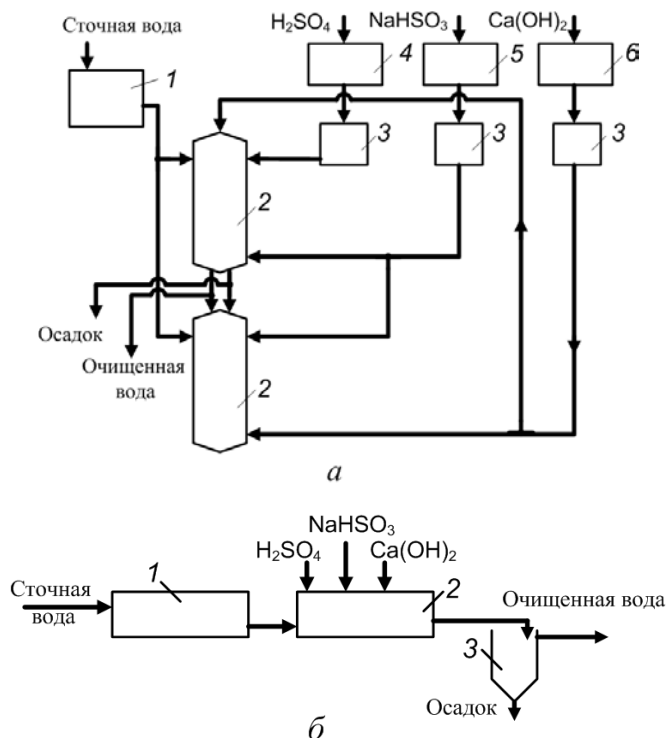


Рис.2.37. Схемы установок для восстановления хрома:  
*а* - периодического действия: 1 – сборник, 2 - реакторы, 3 – мерники, 4-6 - емкости; *б* - непрерывного действия: 1 – усреднитель, 2 - смеситель, 3 - емкость для нейтрализации и отстаивания

Ртуть неорганических соединений, содержащихся в сточных водах, сравнительно легко восстанавливается до металлической, которая затем выделяется отстаиванием, фильтрованием или флотацией. В качестве восстановителей при улавливании ртути применяют сульфид железа  $FeS$ , гидросульфит натрия  $NaHSO_3$ , порошкообразное железо, алюминиевую пудру, сероводород. Органические соединения ртути сначала разрушают с помощью сильных окислителей, а затем восстанавливают ее катионы  $Hg^{2+}$  до  $Hg$ . Для восстановления ртути и ее соединений предложено применять сульфид железа, боргидрид натрия, гидросульфит натрия, гидразин, железный порошок, сероводород, алюминиевую пудру и др.

Мышьяк в сточных водах находится в виде кислородсодержащих молекул, а также в виде анионов тиосолей  $AsS_2^-$ ,  $AsS_3^{3-}$ . Наиболее распространенным способом удаления мышьяка из сточных вод

является осаждение его в виде труднорастворимых соединений. При больших концентрациях мышьяка (до 110 г/л) метод очистки основан на восстановлении мышьяковой кислоты до мышьяковистой диоксидом серы. Мышьяковистая кислота имеет небольшую растворимость в кислой и нейтральной средах и осаждается в виде триоксида мышьяка.

---

---

### Вопросы для самоконтроля

---

---

1. Рассмотрите использование процесса нейтрализации для очистки сточных вод, а также области его применения, достоинства, недостатки и эффективность.
2. Объясните суть процессов очистки сточных вод окислением хлором, кислородом, озоном. Назовите области применения и эффективность.
3. Рассмотрите основные схемы и аппараты процессов озонирования.
4. Рассмотрите основы реагентных методов удаления из сточных вод ионов тяжелых металлов. Достоинства и недостатки методов и эффективность.



## 2.7. Биохимические методы очистки сточных вод

Биохимическая очистка сточных вод основана на способности аэробных микроорганизмов использовать для своего развития и жизнедеятельности те органические соединения, которые не были удалены из очищаемой воды на предшествующих стадиях обработки.

Сточные воды, направляемые на биохимическую очистку, характеризуются величиной БПК и ХПК. БПК – это *биохимическая потребность в кислороде*, или количество кислорода, использованного при биохимических процессах окисления органических веществ (не включая процессы нитрификации) за определенный промежуток времени (2, 5, 8, 10, 20 сут), в мг  $O_2$  на 1 мг вещества. Например: БПК<sub>5</sub> – биохимическая потребность в кислороде за 5 сут, БПК<sub>полн</sub> – полная биохимическая потребность в кислороде до начала процессов нитрификации. ХПК – *химическая потребность в кислороде*, т. е. количество кислорода, эквивалентное количеству расходуемого окислителя, необходимого для окисления всех восстановителей, содержащихся в воде. ХПК также выражают в мг  $O_2$  на 1 мг вещества.

Потребляя органические вещества, микроорганизмы частично разрушают их, превращая в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , нитрат- и сульфат-ионы, частично используют для образования собственной биомассы. Разрушение органических веществ называют биохимическим окислением. Некоторые органические вещества способны легко окисляться, а некоторые не окисляются совсем или окисляются очень медленно.

Известны аэробные и анаэробные методы биохимической очистки сточных вод. Для аэробной очистки используются аэробные группы микроорганизмов, для жизнедеятельности которых необходим постоянный приток кислорода и температура 20...40 °С. Анаэробная очистка сточных вод протекает без доступа кислорода и используется преимущественно для обезвреживания осадков.

Биохимическую очистку сточных вод можно проводить как в искусственных условиях – в биологических фильтрах и аэротенках, так и в естественных условиях – на полях фильтрации, земледельческих полях орошения, биологических прудах.

Биологические фильтры представляют собой резервуары, заполненные крупнозернистыми материалами – гравием, керамзитом, шлаком, крупным песком, сквозь которые фильтруются сточные воды, поступающие сверху по всей площади фильтра.

Иногда в качестве загрузки используют решетки, пакеты, кольца из различных полимерных материалов, такие биофильтры отличаются более высокой производительностью. Из нижней части фильтра дренажные устройства отводят очищенную воду во вторичные отстойники. Просачиваясь сквозь загрузку биофильтра, сточные воды оставляют на ней органические вещества, не отделенные на предшествующих стадиях водоочистки. Эти вещества образуют на поверхности зерен фильтра биопленку, в которой развиваются микроорганизмы. В результате из сточных вод удаляются органические загрязнения, а в толще биофильтра увеличивается масса активной биологической пленки. Биопленка имеет вид слизистых обрастаний толщиной 1...3 мм и более. Цвет ее изменяется с изменением состава сточных вод от серовато-желтого до темно-коричневого.

Биоценоз активной пленки включает несколько групп аэробных бактерий, грибы, дрожжи; развивающиеся представители простейших, коловратки, черви, личинки комаров и мух, клещи поедают активный ил, способствуя его рыхлению, повышая эффективность водоочистки.

Кроме биофильтров, для биохимической очистки сточных вод используют аэротенки – резервуары, в которых медленно движется смесь активного ила и сточной воды, постоянно перемешиваемая при помощи сжатого воздуха или специальных приспособлений. Активный

ил включает биоценоз микроорганизмов – минерализаторов, которые сорбируют на своей поверхности и окисляют органические примеси сточных вод. Для их нормальной жизнедеятельности в аэротенк непрерывно поступает воздух, который не только обеспечивает микроорганизмы кислородом, но и поддерживает активный ил во взвешенном состоянии. Обычно аэротенки представляют собой длинные железобетонные резервуары прямоугольного сечения, состоящие из нескольких секции. Воздух нагнетается в аэротенк воздуходувками или поступает из атмосферы при сильном перемешивании содержимого аэротенка. Более эффективным сооружением для биохимической очистки сточных вод является окситенк, в котором процессы очистки интенсифицируются благодаря применению технического кислорода и высоким концентрациям активного ила.

Общая схема станции с биохимической очисткой сточных вод представлена на рис. 2.38.

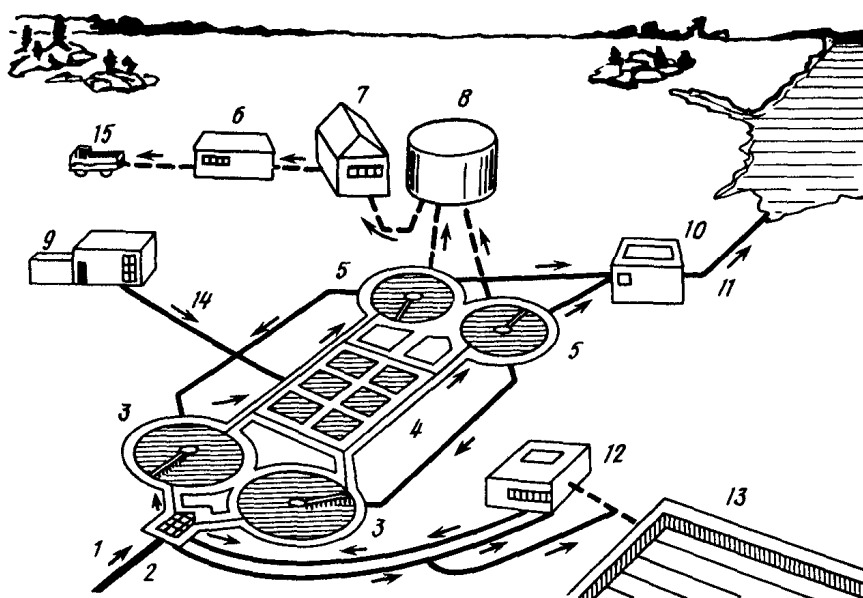


Рис.2.38. Схема станции с биохимической очисткой сточных вод:  
 1 - решетка; 2 - песколовка; 3 - отстойники; 4 - аэротенки; 5 - вторичные отстойники; 6 - термическая сушка осадка; 7 - вакуум фильтры;  
 8 - метантенки; 9 - машинное отделение; 10 - хлораторная, 11 - контактный резервуар; 12 - дробилка; 13 - песковые площадки; 14 - воздуховод;  
 15 - транспорт сушеного ила

В результате биохимической очистки в первичных и вторичных отстойниках образуются осадки, которые необходимо утилизировать во избежание загрязнения ими окружающей среды. Между тем обработка этих крупнотоннажных отходов водоочистки сильно затрудняется из-за

их высокой влажности и сложного состава. Как правило, осадки сточных вод представляют собой труднофильтрующиеся суспензии.

Обработка начинается с уплотнения осадка гравитационным или флотационным методом. Наибольшее распространение в практике водоочистки получил метод напорной флотации: осадок разбавляют определенным количеством воды, предварительно насыщенной воздухом. При снижении давления растворенный воздух выделяется в виде мелких пузырьков, а осадок активного ила становится более плотным.

Уплотненный осадок подвергается стабилизации – разрушению его органической составляющей до диоксида углерода, воды, метана.

Стабилизация осуществляется с помощью микроорганизмов в анаэробных и аэробных условиях. В анаэробных условиях осадок сбрасывается в двухъярусных отстойниках, осветлителях-перегнивателях, метантенках. Метантенки и газгольдеры для сбора выделяющихся газов (~ 65 % метана и ~ 33 % диоксида углерода) – взрывоопасные сооружения, поэтому их располагают обычно на расстоянии не менее 40 м от других объектов.

Аэробная стабилизация заключается в продолжительном аэрировании осадка; в результате пневматического или механического аэрирования происходит распад разлагаемых органических веществ, а наиболее устойчивые соединения теряют способность к загниванию, т. е. стабилизируются.

Аэробную стабилизацию можно проводить одновременно для смеси из осадка первичного отстойника и избыточного активного ила. Эффективность процесса определяется его длительностью, температурой, интенсивностью аэрации, а также зависит от состава и свойств окисляемого осадка.

Стабилизированный осадок подвергают коагуляции, используя в качестве коагулянтов сульфаты железа  $\text{FeSO}_4$  и  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и хлорид железа  $\text{FeCl}_3$ , а также известь. Этот процесс изменения структуры осадка и улучшения его водоотдающих свойств называется кондиционированием. Кондиционирование осадка можно проводить и безреагентным методом, в том числе тепловой обработкой, замораживанием с последующим оттаиванием, электрокоагуляцией. Влажность кондиционированного осадка снижается с 92...94 до 70...75 %, он хорошо уплотняется и поступает на обезвоживание.

Обезвоживание осадков производят на иловых площадках – обвалованных со всех сторон участках земли. Рабочая глубина такой площадки, как правило, лежит в пределах 0,7...1,0 м; их площадь зависит от количества осадков, характера грунта, климатических условий. Обычно иловые площадки делают для очистных сооружений

производительностью 10000 м<sup>3</sup>/сут. Их располагают в виде каскада из 4...8 площадок.

Обезвоженный осадок высушивается на барабанных, ленточных, петлевых, распылительных и других сушилках, в которых в качестве осушителя используются дымовые газы при температуре 500...800 °С, перегретый пар или горячий воздух.

Твердые осадки сточных вод могут стать важным ресурсом органических удобрений, если не содержат тяжелых металлов или других токсических компонентов.

Перспективна биохимическая очистка сточных вод в естественных условиях – на полях фильтрации и сельскохозяйственных полях орошения (ЗПО) (рис.2.39). В этих случаях доля освобождения сточных вод от загрязняющих примесей используется очищающая способность самой почвы. Фильтруясь сквозь слой почвы, вода оставляет в ней взвешенные, коллоидные и растворенные примеси.

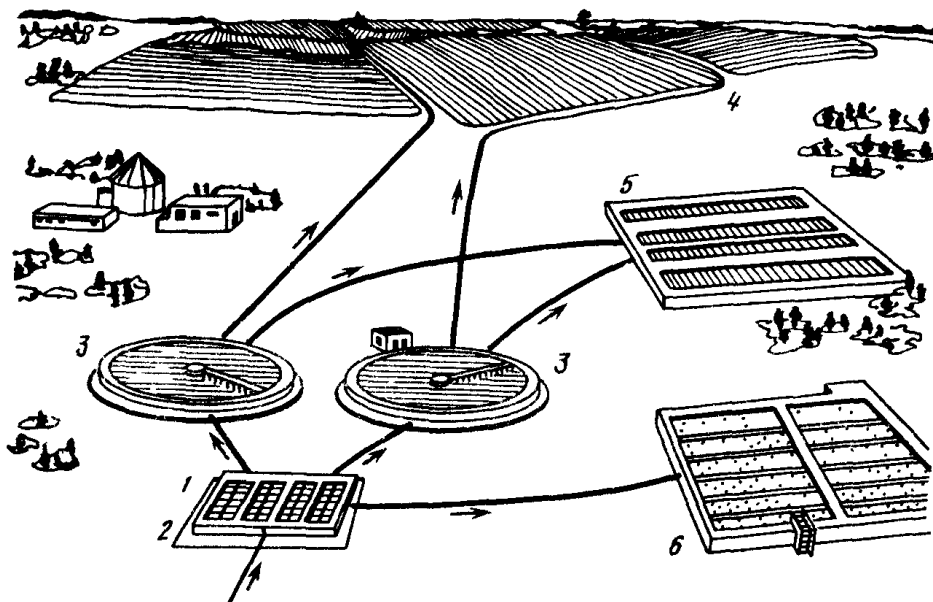


Рис.2.39. Схема станции с биологической очисткой сточных вод в естественных условиях:

- 1 - решетка; 2 - песколовка; 3 - двухъярусные отстойники;  
4 - сельскохозяйственные поля орошения; 5 - иловые площадки; 6 - песковые площадки

Химические, физические и биологические свойства почвы как перерабатывающей среды для отходов также используют в некоторых методах биохимической очистки сточных вод в естественных условиях. Специально спланированные и подготовленные земельные участки для полива их сточными водами напуском, по бороздам или методом дождевания предназначаются для очистки сточных вод и выращивания сельскохозяйственных культур и называются *полями орошения*.

Земельные участки, предназначенные только для очистки стоков, называются *полями фильтрации*. Возможными механизмами почвенной обработки компонентов сточных вод в общем случае являются: биологическое окисление в аэробных и анаэробных условиях на разных почвенных уровнях и в разные периоды подачи сточных вод и «отдыха» земельного участка: адсорбция; ионный обмен и комплексообразование; химическое осаждение; ассимиляция растениями, микроорганизмами, животными.

На полях фильтрации обработка небольшого объема отходов с относительно большой величиной БПК обычно лимитируется сорбцией и окислительной способностью микроорганизмов. Переработка больших объемов сравнительно малозагрязненных стоков ограничивается их фильтрацией в почве. Для полей орошения, кроме общих норм подачи стоков и норм нагрузки единицы площади земельного участка по загрязнениям, существуют нормы и периодичность подачи вод [в м<sup>3</sup>/(га·сут)] для орошения и полива (40...60%-ное заполнение пор почвы водой обеспечивает оптимальную для роста растений влажность почвы). При этом подача примесей (загрязнений) вод определяется нормой, зависящей от состава вод и удобрительных свойств их компонентов, степенью выноса этих компонентов культивируемыми растениями.

Микроорганизмы почвы окисляют органические загрязняющие вещества, превращая их в простейшие минеральные соединения – диоксид углерода, воду, соли.

Наиболее интенсивно протекают эти процессы в верхних горизонтах почвы (0,2...0,4 м), где израсходованные запасы кислорода пополняются быстро.

Регулируя водно-воздушный режим территории, орошаемой сточными водами, можно достичь высоких степеней очистки и повышения плодородия орошаемых земель, которые извлекают из сточных вод и удерживают элементы питания растений. Почвенные способы очистки полностью исключают поступление сточных вод в поверхностные воды и тем самым защищают их от загрязнений.

Поля фильтрации используют только для биохимической очистки воды; их территории отчуждаются у сельского хозяйства. Высокие нормы нагрузки (15...90 м<sup>3</sup>/га сточных вод в сутки) позволяют устраивать их лишь на хорошо фильтрующих почвах, а многолетнее обильное орошение приводит к вымыванию из почвы питательных веществ и ее деградации. Поэтому биохимическая очистка воды на полях фильтрации значительно менее выгодна, чем на сельскохозяйственных полях орошения.



На сельскохозяйственных полях орошения очистка сточных вод происходит непосредственно на производственных полях и при благоприятных условиях способствует повышению плодородия земель.

Норма сточных вод, подаваемых на единицу площади ЗПО, должна соответствовать потребности в удобрениях и воде произрастающих культур. Для устройства ЗПО пригодны любые, даже бросовые, земли и объем подготовительных работ, которые в основном сводятся к устранению неровностей рельефа, сравнительно невелик. Подача сточных вод в почву происходит либо с поверхности, либо из труб, проложенных на небольшой глубине.

Для обезвреживания яиц гельминтов, содержащихся в фекальных городских стоках, перед выпуском на поля их предварительно отстаивают, а образовавшийся осадок подвергают брожению при 50...60 °С. Болезнетворные бактерии, содержащиеся в сточных водах, при попадании в почву довольно быстро погибают. Тем не менее на ЗПО не рекомендуется выращивать культуры, идущие в пищу человеку. Обычно поля орошения используют под технические и кормовые культуры.

Устройство ЗПО позволяет комплексно решать проблемы охраны окружающей среды, благоустройства города и развития пригородного сельского хозяйства как основы снабжения городского населения продуктами питания.

Другим методом биохимической очистки сточных вод является создание биологических прудов, в которых используется способность природных вод к самоочищению. Биологические пруды представляют собой водоемы площадью 0,5...1,0 га, в которых сточные воды могут очищаться в аэробных и анаэробных условиях.

В *окислительных прудах* переработка органических и ряда других примесей сточных вод и отходов обеспечивается анаэробным разложением осадка в придонной зоне и окислением растворенных и коллоидных органических веществ при аэробном метаболизме бактерий в средней части объема воды (рис. 2.40). Продукты этих процессов утилизируются водорослями, растущими у поверхности и вырабатывающими кислород для обеспечения аэробной деструкции органических веществ. Скорость этой, третьей, стадии (по существу, скорость производства кислорода при фотосинтезе  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$ ) обычно лимитирует общую скорость превращения органических веществ стоков в окислительных прудах и зависит от интенсивности освещения и температуры. Окислительные пруды поэтому обычно неглубоки (0,9...1,5 м), а процессы фотосинтеза наиболее эффективны при ясной и теплой погоде. В холодное время

года пруды работают в основном как емкостные сооружения сбора оседающих примесей, а не как биологические реакторы.

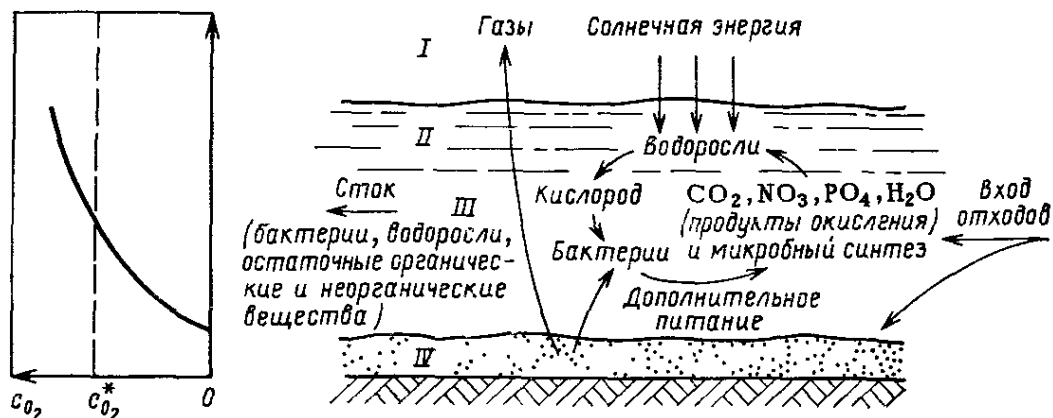


Рис.2.40. Схема биохимических взаимодействий в окислительном пруду:  
 I - воздух; II - зона роста водорослей; III - зона аэробной переработки растворимых и коллоидных органических примесей; IV - ил (зона анаэробного разложения)

Вследствие сложности предсказания скорости фотосинтеза и роста водорослей при переменной интенсивности солнечной радиации, различной скорости роста клеток и переменном количестве загрязнений для проектирования пруда используют практические данные по эффективности переработки органических веществ.

Более широко, чем окислительные пруды, используют искусственные *аэробные пруды* с плавающими и стационарными механическими аэраторами или с пневматической аэрацией. Рекомендуемые нагрузки для поверхности такого пруда (по БПК<sub>5</sub>) составляют в среднем 4,5...11,2 г O<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup>·сут), эффективность очистки – 80...95 %.

Аэробные пруды, как правило, располагают секциями: от двух до пяти прудов в каждой. Вода поступает последовательно из одного пруда в другой по мере ее очистки. Для более равномерного распределения сточной воды по акватории прудов впуск и выпуск воды устраивают рассредоточенными. Глубина воды в первом пруду составляет 1 м, в последующих – до 1,5...2,0 м. Если аэробные пруды предназначены для полной биологической очистки, то время пребывания в них сточных вод должно быть не менее 15...20 сут, если они используются для доочистки, то время сокращается до 2 сут.

При условии разбавления отстаившихся вод речной или глубоководной сточной водой (в 3...5 раз) биологические пруды можно использовать для разведения рыб, главным образом карпа.

В аэробных высоконагружаемых по органическим компонентам прудах фотосинтез является основным источником кислорода для

биологического разложения органических отходов. В этом случае происходит интенсивный рост водорослей, в протоплазму которых и переходит основная масса органических веществ сточных вод. Водоросли выделяют из стока пруда фильтрацией (например, через сетчатый микрофильтр) или методами физико-химического осаждения.

*Анаэробные пруды* служат для предварительной очистки высококонцентрированных сточных вод; за 30...50 суток обеспечивается снижение БПК в воде на 50...70 %. Глубина таких прудов достигает 2,5...3 м.

Анаэробные пруды (лагуны) предназначены для разрушения и стабилизации концентрированных жидких, полужидких и твердых отходов при нагрузках (по БПК<sub>5</sub>) – 300...2300 кг О<sub>2</sub>/га. Как и в метатенках, в этих прудах анаэробное брожение сложных веществ отходов происходит в два этапа: превращение сложных органических веществ в летучие жирные кислоты с последующим их преобразованием в газообразные продукты (преимущественно метан и диоксид углерода). Анаэробные пруды используют в основном в условиях теплого климата для переработки отходов производства мяса и птицы, консервных заводов, боен, для переработки картофельных и свекольных отходов, навоза и пр. Для получения стока, пригодного для сброса в естественные водоемы, за анаэробной лагуной обычно предусматривают аэробное сооружение, например окислительный пруд или аэрируемую лагуну. Глубина анаэробного пруда не лимитируется глубиной проникновения света и обычно составляет 1,5...4,5 м.

После биологической очистки сточных вод на искусственных сооружениях общее содержание в них бактерий уменьшается на 95 %, а при очистке на ЗПО – на 99 %. Для полного обеззараживания сточных вод их необходимо хлорировать или уничтожить болезнетворные бактерии другими методами.

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Как производится биологическая очистка сточных вод в природных условиях?
2. Рассмотрите процесс биохимической очистки сточных вод в аэротенках. Приведите основные схемы установок.
3. Объясните принцип работы аэротенков с различной структурой потоков.
4. Рассмотрите процесс очистки сточных вод в



биофильтрах. Укажите основные конструкции биофильтров.

5. Рассмотрите процесс очистки сточных вод в окситенках.
6. Рассмотрите схему установки для совместной очистки бытовых и промышленных сточных вод.
7. Объясните основы очистки сточных вод и обезвреживания осадков в метантенках.



## **2.8. Термоокислительные методы обезвреживания сточных вод**

По теплотворной способности химические промышленные стоки делят на сточные воды, способные гореть самостоятельно, и на воды, для термоокислительного обезвреживания которых необходимо добавлять топливо. Последние имеют энтальпию ниже 8400 кДж/кг (2000 ккал/кг).

При использовании термоокислительных методов все органические вещества, загрязняющие сточные воды, полностью окисляются кислородом воздуха при высоких температурах до нетоксичных соединений. К этим методам относят метод жидкофазного окисления, метод парофазного каталитического окисления и пламенный, или «огневой», метод. Выбор метода зависит от объема сточных вод, их состава и теплотворной способности, экономичности процесса и требований, предъявляемых к очищенным водам.

### **2.8.1. Метод парофазного каталитического окисления**

В основе метода находится гетерогенное каталитическое окисление кислородом воздуха при высокой температуре летучих органических веществ, находящихся в промышленных сточных водах. Процесс протекает весьма интенсивно в паровой фазе в присутствии медно-хромового, цинк-хромового, медно-марганцевого или другого катализатора. Одна из установок окисления представлена на рис.2.41.

Сточную воду из сборника подают в выпарной аппарат, откуда упаренная пульпа поступает на центрифугу, где обезвоживается. Образующийся осадок направляют на сжигание в печь. Водяной пар вместе с летучими органическими веществами из выпарного аппарата поступает в теплообменник, где нагревается за счет тепла парогазовой смеси, выходящей из контактного аппарата. После теплообменника пары смешивают с горячим воздухом и направляют в контактный аппарат, в котором происходит окисление органических веществ.

Дымовые газы из печи поступают в котел-утилизатор, где образуется пар, направляемый в выпарной аппарат.

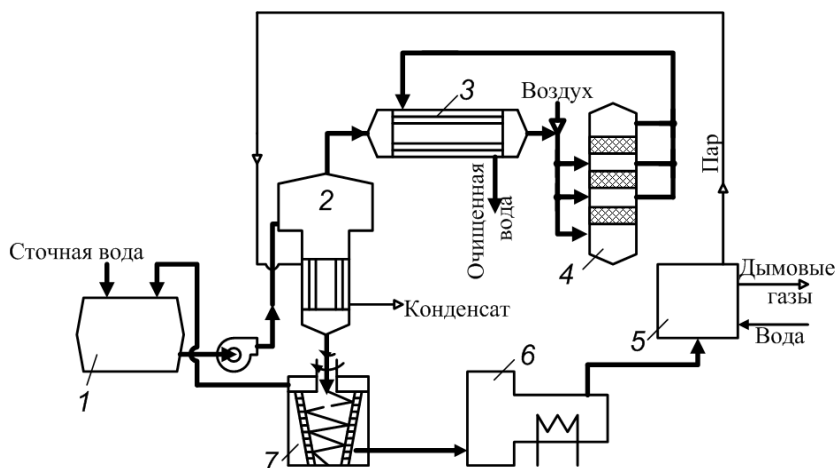


Рис.2.41. Схемы установок для очистки сточных вод каталитическим окислением:

1 - емкость; 2 - выпарной аппарат; 3 - теплообменник; 4 - контактный аппарат; 5 - котел-утилизатор; 6 - печь; 7 - центрифуга

Установки характеризуются высокой производительностью по сточной воде и высокой степенью обезвреживания, достигающей 99,8 %. Основной недостаток установки – возможность отравления катализаторов соединениями фосфора, фтора, серы. Поэтому необходимо предварительное удаление каталитических ядов из сточных вод.

### 2.8.2. Установки обезвреживания сточных вод жидкофазным окислением

Такие установки предложены для окисления органических веществ растворенным в воде кислородом воздуха при 150...375 °С и давлении 2...28 МПа. Их используют для обезвреживания бытовых сточных вод. В последнее время разработаны различные установки для обезвреживания промышленных сточных вод. На рис. 2.42 показана схема опытной установки жидкофазного окисления.

Для определения количества тепла, которое выделяется при окислении органических веществ, в первом приближении применима формула

$$Q'_H = \sum_{i=1}^n \nu_i \cdot \Delta H_{f,i}^0$$

где  $Q'_H$  – удельная теплота сгорания сточных вод, кДж/кг.

Это тепло можно использовать для различных целей, в том числе и для проведения процесса окисления.

Метод жидкофазного окисления имеет ряд преимуществ перед огневым методом обезвреживания: возможность обезвреживания

сточных вод с низким содержанием различных веществ без предварительного концентрирования; продукты окисления остаются в сточной воде, но не содержат вредных веществ; не загрязняется воздух; метод легко контролируется и безопасен для обслуживающего персонала.

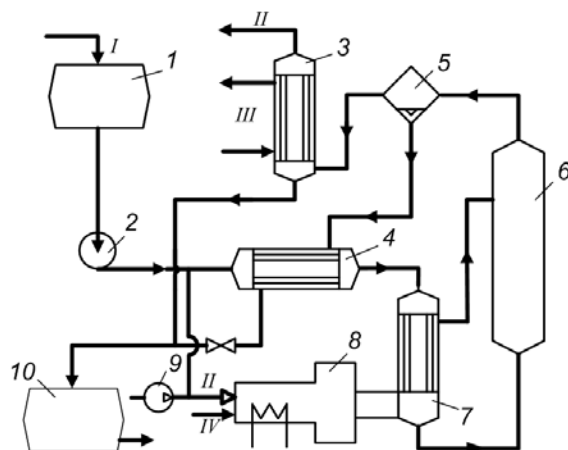


Рис.2.42. Установка для обезвреживания сточных вод жидкофазным окислением:

1,10 – емкости, 2 – насос, 3 – конденсатор, 4,7 – теплообменники, 5 – сепаратор, 6 – реактор, 8 – печь, 9 – компрессор; I – сточная вода, II – воздух, III – охлаждающая вода, IV – топливо

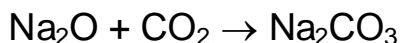
Недостатки: неполное окисление некоторых органических веществ; значительная стоимость оборудования и высокая коррозия в кислых средах.

#### 2.8.4. Огневой метод обезвреживания сточных вод

Этот метод обезвреживания сточных вод является наиболее эффективным и универсальным из термических методов. Сущность его заключается в распылении сточных вод непосредственно в топочные газы, нагретые до 900...1000 °С. При этом вода полностью испаряется, а органические примеси сгорают. Содержащиеся в воде минеральные вещества образуют твердые или оплавленные частицы, которые улавливают в циклонах или фильтрах.

Огневой метод нецелесообразно применять для обезвреживания сточных вод, содержащих только минеральные вещества. Метод может быть использован также для обезвреживания небольшого объема сточных вод, содержащих высокотоксичные органические вещества, очистка от которых другими методами невозможна или неэффективна. Кроме того, огневой метод целесообразен, если имеются горючие отходы, которые можно использовать как топливо.

В процессах обезвреживания сточных вод различного состава могут образовываться оксиды щелочных и щелочно-земельных металлов (CaO, MgO, BaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O и др.). Некоторые из этих оксидов могут взаимодействовать с компонентами дымовых газов, например



При диссоциации хлоридов в дымовых газах содержатся хлор и хлороводород. Органические соединения, содержащие серу, фосфор, галогены, могут образовывать SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub> и др. Присутствие этих веществ в дымовых газах нежелательно, так как это вызывает значительную коррозию аппаратуры. Из сточных вод, содержащих нитросоединения, могут выделяться оксиды азота: NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, при 900°C – практически NO. Между всеми этими веществами в газовой фазе происходят сложные взаимодействия с образованием новых соединений, в том числе и токсичных. Это необходимо учитывать при удалении газов в атмосферу.

В зависимости от концентрации и состава сточных вод используют печи различной конструкции: камерные, шахтные, циклонные и с псевдоожиженным слоем. Камерные и шахтные печи громоздки, характеризуются низкой удельной производительностью – до 100 л/м<sup>3</sup>·ч, их сооружение связано с высокими капитальными вложениями. Их используют для сжигания сульфидных щелоков, сточных вод анилинокрасочной промышленности и др. С большой интенсивностью осуществляется процесс в печах с псевдоожиженным слоем, который создают газом, подаваемым под газораспределительную решетку. Печи просты по конструкции, компактны и позволяют полностью обезвреживать сточные воды. В процессе сжигания твердые частицы находятся во взвешенном состоянии. Процесс проводят при 800...890 °C.

Наиболее эффективными являются циклонные печи. В них, благодаря вихревому характеру газового потока, создается интенсивный тепло- и массообмен между каплями сточной воды и газообразными продуктами. Такие печи работают при больших удельных нагрузках. Применяют разнообразные горизонтальные и вертикальные циклонные камеры. Воздух, тангенциально вводимый в печь, совершает вращательное движение, перемещаясь вдоль оси цилиндра по спирали. Сточную воду распыливают форсункой и сжигают. Недостаток таких печей – большой унос солей с газовым потоком.

Для сжигания сточных вод могут быть использованы установки, имеющие различные схемы:

- 1) без рекуперации тепла и очистки газов;
- 2) без рекуперации тепла с очисткой газов;

- 3) с рекуперацией тепла без очистки газов;
- 4) с рекуперацией тепла и очисткой газов.

Все эти схемы без рекуперации, твердых отходов. Имеются схемы с рекуперацией твердых отходов.

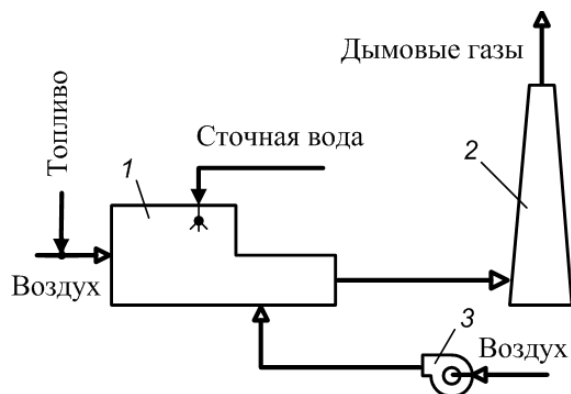


Рис.2.43. Схемы установки огневого обезвреживания сточных вод без рекуперации тепла и очистки отходящих газов:

1 – печь; 2 – дымовая труба; 3 - вентилятор

Схемы установок без рекуперации тепла и очистки отходящих газов (рис. 2.43) рекомендуют для обезвреживания сточных вод, содержащих только органические вещества. Удельный расход условного топлива на таких установках достигает 300 кг на 1 т сточных вод.

Огневой метод требует больших затрат топлива на испарение воды и полного сгорания токсичных примесей. Обычно расход топлива (считая на условное) составляет 250...300 кг на 1 т сточной воды. Схема установки для сжигания сточных вод с рекуперацией тепла и очисткой газа показана на рис.2.44.

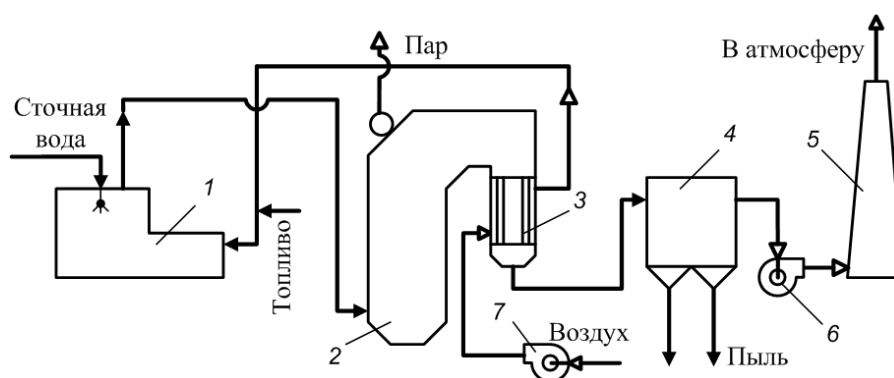


Рис.2.44. Схема установки огневого обезвреживания сточных вод с рекуперацией тепла и сухой очисткой газов:

1 – печь; 2 – котел-утилизатор; 3 - воздухоподогреватель; 4 – аппарат сухой очистки газов; 5 – дымовая труба; 6 – дымосос; 7 – воздуходувка



Горючие промышленные отходы, содержащие примеси мазута, масел, нефтепродуктов, отработанные растворители, спирты, эфиры, сжигают в специальных установках без добавления топлива.

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Каковы основы использования термоокислительных методов обезвреживания сточных вод?
2. Рассмотрите процесс парофазного каталитического окисления сточных вод. Приведите основные схемы установок.
3. Рассмотрите процесс очистки сточных вод в жидкофазным окислением.
4. В каких случаях применяют огневой метод очистки сточных вод?
5. Рассмотрите схемы и установки огневого обезвреживания промышленных сточных вод.



### **Часть 3. Защита литосферы от промышленных загрязнений (переработка твердых отходов)**

---

---

Строгого, однозначного определения понятия «отходы производства» не сформулировано. Обычно под этим термином понимают разнообразные по составу и физико-химическим свойствам остатки, характеризующиеся потенциальной потребительской ценностью (пригодностью для полезного использования) и являющиеся по своей природе вторичными материальными ресурсами (ВМР), использование которых в материальном производстве, как правило, требует определенных дополнительных операций с целью придания им необходимых свойств или четкой фиксации этих свойств.

Накопление значительных масс твердых отходов во многих отраслях промышленности обусловлено существующим уровнем технологии переработки соответствующего сырья и недостаточностью его комплексного использования. Удаление (транспортирование) отходов и их хранение (устройство и содержание отвалов и шламонакопителей) являются дорогими мероприятиями. В то же время, значительная часть твердых отходов промышленных предприятий может быть эффективно использована в народном хозяйстве. Так, строительная индустрия и промышленность строительных материалов ежегодно добывают и потребляют около 3,5 млрд.т нерудного сырья, большая часть которого может быть заменена промышленными отходами. Задача утилизации последних тем более актуальна, что организация производства продукции на их основе требует затрат в 2...3 раза меньших, чем для соответствующих производств на основе специально добываемого природного сырья. Кроме того, увеличение комплексности использования минерального сырья при одновременном решении задач защиты биосферы способствует сокращению потребления ряда его видов. В нашей стране экономия 1% соответствующих видов минерального сырья равноценна дополнительному вовлечению в производство сырья, необходимого для получения около 1 млн.т стали, примерно 6,5 млн.т угля и 4,9 млн.т нефти, до 6 млрд.м<sup>3</sup> природного газа и 15 млрд.кВт·ч электроэнергии.

Источники возникновения твердых отходов в материальном производстве иллюстрируются схемой (рис. 3.1). Конкретные причины их образования весьма многообразны, причем некоторые из них могут быть без значительных издержек достаточно легко и быстро устранены,

для устранения других, напротив, требуются продолжительные исследования и крупные затраты.

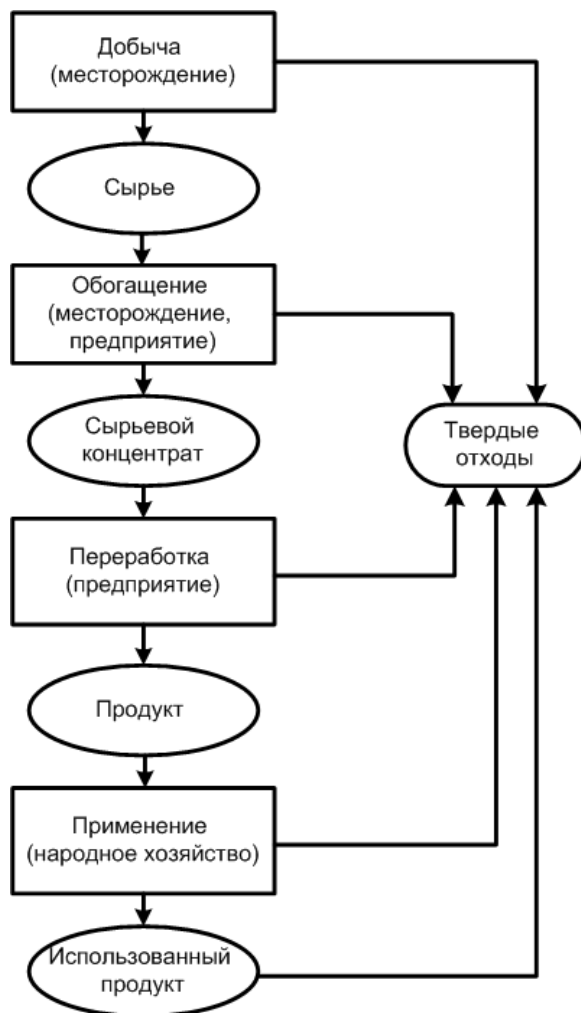


Рис.3.1. Источники возникновения твердых отходов в материальном производстве

В настоящее время отсутствует общая научная классификация твердых отходов промышленности, охватывающая все их многообразие по тем или иным принципам, что, очевидно, объясняется широтой их номенклатуры даже в рамках одного предприятия (например, на Северодонецком ПО «Азот» образуется 178 видов твердых отходов) и еще незавершенной работой по составлению кадастров отходов по предприятиям, подотраслям, отраслям, министерствам и ведомствам. Существующие классификации твердых отходов весьма многообразны и в большинстве своем односторонни. Так, твердые отходы классифицируют по отраслям промышленности (отходы химической, металлургической, топливной и других отраслей) или их группам, по конкретным производствам (например: отходы сернокислотного, содового, фосфорнокислотного и других производств), по тоннажности,

степени использования, ценностным показателям, воздействию на окружающую среду, способности к возгоранию, коррозионному воздействию на оборудование и т. п.

Многообразие видов твердых отходов, значительное различие состава даже одноименных отходов в значительной степени усложняют задачи их утилизации, вызывая в ряде конкретных случаев необходимость изыскания своеобразных путей их решения. Тем не менее, для большинства основных видов крупнотоннажных твердых отходов в настоящее время разработаны и частично реализуются описанные ниже экономически целесообразные технологии их утилизации. В то же время различные технологии рекуперации твердых отходов в своей основе базируются на ряде методов, совокупность которых обеспечивает возможность утилизации ВМР или их переработки в целевые продукты.

Твердые отходы, поступающие в биосферу за счет техногенной деятельности, можно подразделить на три основные категории: промышленные, сельскохозяйственные и коммунально-бытовые. Наибольшую сложность представляет обезвреживание и утилизация промышленных отходов, существенно превосходящих сельскохозяйственные и бытовые как по масштабам их скапливания, так и по разнообразию состава и свойств.

Практически все виды отходов содержат ценные вещества, и их рациональная утилизация в народном хозяйстве создает для него дополнительные сырьевые ресурсы, охраняя, в то же время, биосферу от загрязнения.

### **3.1. Методы переработки твердых отходов**

#### ***3.1.1. Механическая, механотермическая и термическая переработка***

Утилизация твердых отходов в большинстве случаев приводит к необходимости либо их разделения на компоненты (в процессах очистки, обогащения, извлечения ценных составляющих) с последующей переработкой сепарированных материалов различными методами, либо придания им определенного вида, обеспечивающего саму возможность утилизации отходов ВМР.

#### **Дробление**

Интенсивность и эффективность большинства химических диффузионных и биохимических процессов возрастает с уменьшением размеров кусков (зерен) перерабатываемых материалов. В этой связи собственно технологическим операциям переработки твердых отходов

обычно предшествуют операции уменьшения размеров их кусков, имеющие, наряду с операциями их классификации и сортировки, важное самостоятельное значение в технологии рекуперации твердых отходов.

Для дробления большинства видов твердых отходов используют щековые, конусные, валковые и роторные дробилки различных типов (рис. 3.2). Для разделки очень крупных агломератов отходов применяют копровые механизмы, механические ножницы, дисковые пилы, ленточнопильные станки и некоторые другие механизмы и приемы (например взрыв). Выбор типа дробилки производят с учетом прочности, упругости и крупности подлежащего переработке материала, а также необходимых размеров кусков (зерен) продукта и требуемой производительности.

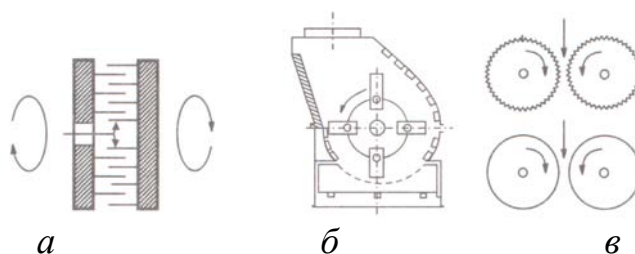


Рис. 3.2. Машины для дробления и измельчения твердых отходов:  
*a* – стержневая дробилка; *б* – молотковая дробилка; *в* – валковая дробилка

Технология дробления может быть организована с использованием либо открытых циклов работы дробилок, когда перерабатываемый материал проходит через дробилку только один раз, либо замкнутых циклов с грохотом, надрешетный продукт которого возвращают в дробилку.

Устройство ножевой дробилки показано на рис. 3.3.

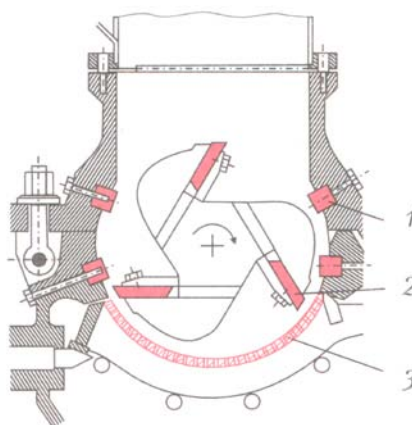


Рис. 3.3. Ножевая дробилка:  
 1 – неподвижный нож; 2 – подвижный нож; 3 – сито

## **Измельчение**

Метод измельчения используют при необходимости получения из кусковых отходов зерновых и мелкодисперсных фракций крупностью менее 5 мм. Процессы измельчения широко распространены в технологии рекуперации твердых отходов при переработке отвалов вскрышных и попутно извлекаемых пород открытых и шахтных разработок полезных ископаемых, вышедших из строя строительных конструкций и изделий, некоторых видов смешанного лома изделий из черных и цветных металлов, топливных и металлургических шлаков, отходов углеобогащения, некоторых производственных шламов и отходовных пластмасс, пиритных огарков, фосфогипса и ряда других ВМР.

Наиболее распространенными агрегатами грубого и тонкого измельчения, используемыми при переработке твердых отходов, являются стержневые, шаровые и ножевые мельницы, хотя в отдельных случаях применяют и другие механизмы (дезинтеграторы, дисковые и кольцевые мельницы, бегуны, пневмопушки и т.п.). Измельчение некоторых типов отходовных пластмасс и резиновых технических изделий проводят при низких температурах (криогенное измельчение).

## **Классификация и сортировка**

Эти процессы используют для разделения твердых отходов на фракции по крупности. Они включают методы грохочения (рассева) кусков (зерен) перерабатываемого материала и их разделение под действием гравитационно-инерционных и гравитационно-центробежных сил. Эти методы широко применяют в качестве самостоятельных и вспомогательных при непосредственной утилизации и переработке подавляющего большинства твердых отходов. В тех случаях, когда классификация имеет самостоятельное значение, т. е. преследует цель получения той или иной фракции материала в качестве готового продукта, ее часто называют сортировкой.

Грохочение представляет собой процесс разделения на классы по крупности различных по размерам кусков (зерен) материала при его перемещении на ячеистых поверхностях. В качестве последних используют колосниковые решетки, штампованные решета, проволочные сетки и щелевидные сита, выполненные из различных металлов, резины, полимерных материалов и характеризующиеся ячейками (отверстиями) различных форм и размеров.

При грохочении используют неподвижные колосниковые, валковые, барабанные вращающиеся, дуговые, ударные, плоские качающиеся, полувибрационные (гирационные), вибрационные с прямолинейными вибрациями (резонансные, самобалансные, с

самосинхронизирующимися вибраторами) и с круговыми или эллиптическими вибрациями (инерционные с дебалансным вибратором, самоцентрирующиеся, электровибрационные) грохоты. При грохочении комкующихся материалов некоторые типы этих механизмов иногда снабжают дополнительными устройствами, обеспечивающими эффективное проведение соответствующих операций.

На рис. 3.4 показан гирационный (эксцентрикковый) грохот, широко применяемый для сортировки сухих материалов. В неподвижной горизонтальной раме 1 смонтированы вибрирующая рама 2 и вал 3. Рама 2 соединена с рамой 1 при помощи пружинных амортизаторов 4. Сита 5 крепятся к боковым стенкам вибрирующей рамы болтами. К боковым косынкам 6 вибрирующей рамы 2 прикреплены два корпуса 7 и 8 роликовых подшипников, надетых на эксцентриковую часть вала 3, установленного в роликовых подшипниках 9 и 10. Корпусы подшипников укреплены на верхних полках боковых стенок рамы 1.

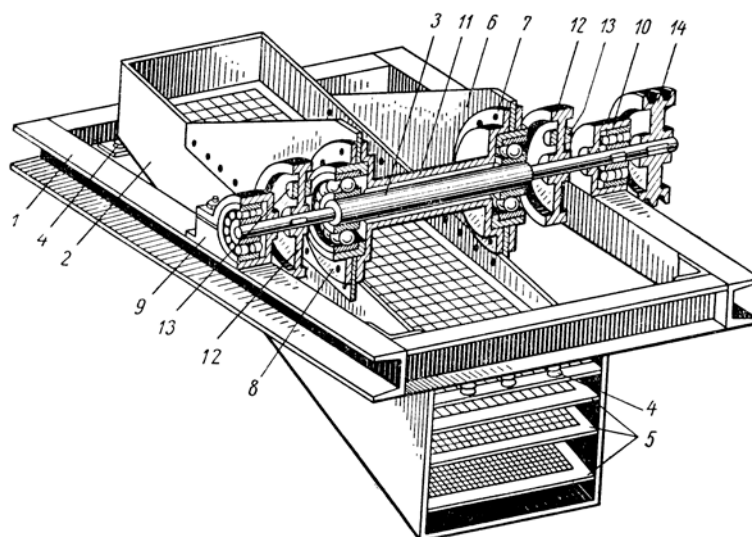


Рис. 3.4. Эксцентрикковый грохот

Эксцентриковая часть вала закрыта трубой 11, которая приварена к корпусам подшипников 7 и 8. Труба защищает вал от загрязнений. На вал насажены два маховика 12 с передвигными противовесами 13. Маховики с противовесами уравнивают силы вибрации опорных подшипников и связанной с ними неподвижной рамы.

Среди используемых для разделения твердых материалов в виде пульп классификаторов грубой (чашевые, речные, спиральные) и тонкой (гидроциклоны, отстойные центрифуги, конусы, пирамидальные отстойники и др.) классификации наиболее распространены гидроциклоны и спиральные классификаторы с непогруженной и погруженной спиралью. Первые из них используют для получения грубых сливов крупностью от 0,2 до 0,5 мм (иногда до 1 мм), вторые –

для получения тонких сливок (80...90% класса – 0,074 мм). Оба типа характеризуют диаметром спирали и длиной заключающего ее корыта.

### **Окускование**

Наряду с перечисленными выше методами уменьшения размеров кусковых материалов и их разделения на классы крупности в практике рекуперационной технологии твердых отходов большое распространение имеют методы, связанные с решением задач укрупнения мелкодисперсных частиц ВМР, имеющие как самостоятельное, так и вспомогательное значение и объединяющие различные приемы гранулирования, таблетирования, брикетирования и высокотемпературной агломерации. Их используют при переработке в строительные материалы ряда компонентов отвальных пород, добыче многих полезных ископаемых, хвостов обогащения углей и золы – уноса ТЭС, в процессах утилизации фосфогипса в сельском хозяйстве и цементной промышленности, при подготовке к переплаву мелкокусковых и дисперсных отходов черных и цветных металлов, в процессах утилизации пластмасс, саж, пылей и древесной мелочи, при обработке шлаковых расплавов в металлургических производствах и электротермофосфорном производстве и во многих других процессах утилизации и переработки ВМР.

### **Гранулирование**

Методы гранулирования охватывают большую группу процессов формирования агрегатов, обычно шарообразной или (реже) цилиндрической формы, из порошков, паст, расплавов или растворов перерабатываемых материалов. Эти процессы основаны на различных приемах обработки материалов.

Гранулирование порошкообразных материалов скатыванием наиболее часто проводят в ротационных (барабанных, тарельчатых, центробежных, лопастных) и вибрационных грануляторах различных конструкций. Производительность этих аппаратов и характеристики получаемых гранулятов зависят от свойств исходных материалов, а также от технологических (расхода порошков и связующих, соотношения затравки и порошка, температурного режима) и конструктивных (геометрических размеров аппаратов, режима их работы: частоты вращения, коэффициента заполнения, угла наклона) факторов.

Получившие большое распространение на практике барабанные грануляторы часто снабжают различными устройствами для интенсификации процессов, предотвращения адгезии липких порошков на рабочих поверхностях, сортировки гранул по размерам. Для



получения гранулята, близкого по составу к монодисперсному, используют тарельчатые (дисковые) грануляторы окатывания, обеспечивающие возможность достаточно легкого управления процессом.

Существует много конструкций тарельчатых грануляторов, различающихся размерами, наличием или отсутствием, а также формой и расположением отдельных конструктивных элементов.

Прессовое гранулирование проводят в валковых и таблеточных машинах различной конструкции, червячных и ленточных прессах, дисковых экструдерах и некоторых других механизмах с получением агломератов различной формы и размеров.

Валковые (вальцовые) грануляторы снабжают прессующими элементами с рабочей поверхностью различного профиля, что позволяет получать спрессованный материал в виде отдельных кусков (обычно с поперечником до 30 мм), прутков, плиток, полос. Эти механизмы часто совмещают с дробилками (обычно также валкового типа), обеспечивающими получение из спрессованных полупродуктов гранул заданных размеров.

В технологии производства из промышленных отходов (или их компонентов) некоторых адсорбентов, катализаторов, витаминных, лечебных и ряда других препаратов и изделий порошковые материалы гранулируют с использованием таблеточных машин различных типов, принцип действия большинства которых основан на прессовании дозируемых в матричные каналы ворошков пуансонами. Приготавливаемые таблетки характеризуются разнообразной формой (цилиндры, сферы, полусферы, диски, кольца и т. п.) с поперечником 6...12 мм. Производительность наиболее распространенных таблеточных машин составляет от 3 до 96 тыс. таблеток в 1 ч.

Принципы прессового гранулирования порошков и паст реализуют в червячных прессах (экструдерах) различной конструкции, рабочими элементами которых являются червяки (шнеки) или валки, пластицирующие перерабатываемый материал и продавливающие его через перфорированную решетку (фильтрную головку), по выходе из которой сформованные жгуты либо ломаются под действием собственной тяжести, либо их режут (рубят) ножом на соответствующие мерные длины до или после охлаждения. Схема установки для гранулирования паст показана на рис. 3.5.

Отдельную группу грануляторов представляют аппараты гранулирования порошков в дисперсных потоках. Процесс в них основан на столкновениях частиц порошка или порошка и жидкой фазы в турбулизованном потоке циркулирующего в аппарате или проходящего через него воздуха или газа. Турбулентный контакт частиц

гранулируемых материалов в потоке сплошной фазы может обеспечиваться лишь последним приемом (в струйных грануляторах, грануляторах кипящего слоя) либо посредством воздействия на частицы вибрационных (в грануляторах виброкипящего слоя) или других механических возмущений. К этой группе процессов гранулирования могут быть отнесены также различные процессы распылительной сушки суспензий и растворов.

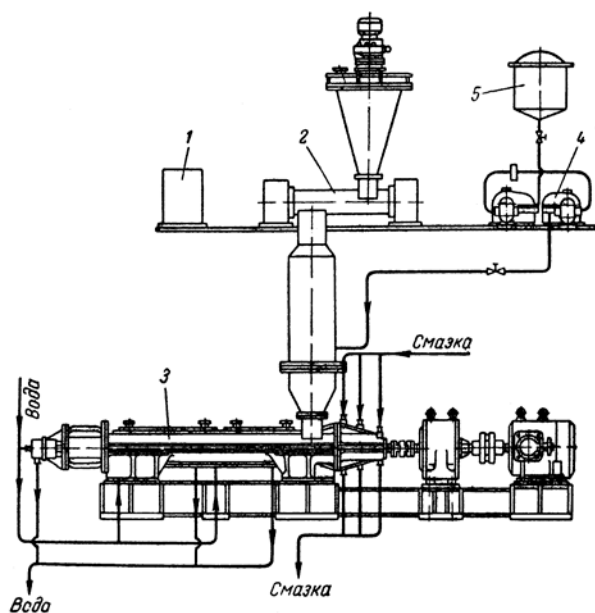


Рис. 3.5. Схема установки для гранулирования:

- 1 – щит управления; 2 – питатель пасты; 3 – смеситель-гранулятор;  
4 – дозатор жидкости; 5 – емкость для жидких компонентов

Гранулирование расплавов индивидуальных солей весьма ограничено в практике рекуперации твердых отходов. Гранулирование силикатных расплавов, напротив, широко используется при переработке шлаков текущего выхода в черной и (ограниченно) цветной металлургии, электротермического производства фосфора.

### Брикетирование

Методы брикетирования находят широкое применение в практике утилизации твердых отходов в качестве подготовительных (с целью придания отходам компактности, обеспечивающей лучшие условия транспортирования, хранения, а часто и саму возможность переработки) и самостоятельных (изготовление товарных продуктов) операций.

В практике брикетирования твердых отходов используют различные прессовые механизмы. При брикетировании дисперсных материалов наибольшее распространение получили штемпельные

(давление прессования 100...120 МПа), вальцовые и кольцевые ( $\approx 200$  МПа) прессы различных конструкций.

### **Высокотемпературная агломерация**

Этот метод используют при переработке пылей, окалины, шламов и мелочи рудного сырья в металлургических производствах, пиритных огарков и других дисперсных железосодержащих отходов. Для проведения агломерации на основе таких ВМР готовят шихту, включающую твердое топливо (коксовая мелочь 6...7% по массе), и другие компоненты (концентрат, руду, флюсы). Воспламенение и нагрев шихты обеспечивают просасыванием через ее слой продуктов сжигания газообразного или жидкого топлива и воздуха. Процесс спекания минеральных компонентов шихты идет при горении ее твердого топлива (1100...1600°C). Агломерационные газы удаляют под разрежением 7...10 кПа.

В практике высокотемпературной агломерации распространены конвейерные машины с верхним зажиганием шихты производительностью 400...500 т/ч. Их недостатком является получение больших объемов разбавленных по загрязняющим компонентам ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) агломерационных газов. Агломашины с нижним зажиганием позволяют в значительной степени избежать этого недостатка.

### **Термическая обработка**

При утилизации и переработке твердых отходов используют различные методы термической обработки как исходных твердых материалов, так и получаемых на их основе продуктов. Эти методы включают различные приемы пиролиза (например: отходов пластмасс, древесины, резиновых технических изделий, шламов нефтепереработки), переплава (например: отвальных металлургических шлаков, отходов термопластов, металлолома), обжига (например: некоторых шлаков цветной металлургии, пиритных огарков, ряда железосодержащих шламов и пылей) и огневого обезвреживания (сжигания) многих видов твердых отходов на органической основе.

### **Смешение порошкообразных и пастообразных материалов**

Этот метод широко используют в практике переработки твердых отходов для усреднения состава дисперсных отходов, приготовления на их основе многокомпонентных смесей шихтовых материалов и получения различных масс, обеспечивающих возможность переработки ВМР в товарные продукты.

Существующие смесительные механизмы периодического и непрерывного действия основаны на использовании механических,

гравитационных и пневматических способов взаимного перемещения частиц обрабатываемых материалов и характеризуются большим разнообразием конструкций.

Среди смесителей периодического действия наиболее распространенными являются барабанные, бегунковые, пневматические, циркуляционные и червячно-лопастные. К кругу аппаратов непрерывного действия принадлежат вибрационные, гравитационные, лопастные, центробежные смесители, а также смесители барабанного и червячно-лопастного типа.

### **3.1.2. Обогащение**

В практике рекуперации твердых отходов промышленности (особенно минеральных, содержащих черные и цветные металлы, фрагментов деталей вышедшей из строя радиоэлектронной аппаратуры и других изделий на основе металлов и сплавов, некоторых топливных зол, смесей пластмасс, шлаков цветной металлургии и ряда других ВМР) используют различные методы обогащения перерабатываемых материалов, подразделяемые на гравитационные, магнитные, электрические, флотационные и специальные.

#### **Гравитационные методы**

Эти методы обогащения основаны на различии в скорости падения в жидкой (воздушной) среде частиц различного размера и плотности. Они объединяют обогащение отсадкой, в тяжелых суспензиях, в перемещающихся по наклонным поверхностям потоках, а также промывку.

#### **Отсадка**

Отсадка представляет собой процесс разделения минеральных зерен по плотности под действием переменных по направлению вертикальных струй воды (воздуха), проходящих через решето отсадочной машины.

Отсадке обычно подвергают предварительно обесшламленные широко- или узкокласифицированные материалы оптимальной крупности: 0,5...100 мм – для нерудных и 0,2...40 мм – для рудных материалов. При отсадке крупного материала находящийся на решетке его слой толщиной в 5...10 диаметров наибольших частиц в подаваемом на переработку материале (питании) называют *постелью*. При отсадке мелкого материала (до 3...5 мм) на решетке укладывают искусственную постель из крупных тяжелых частиц материала, размер которых в 3...4 раза превышает размер наиболее крупных частиц питания. В процессе отсадки материал расслаивается: в нижнем слое концентрируются

тяжелые частицы, в самом верхнем – легкие, мелкие. Получаемые слои разгружают раздельно.

Отсадочные машины различаются способом создания пульсации (движением диафрагмы, поршня, решета, пульсирующей подачей сжатого воздуха), типоразмерами, конструктивными особенностями, числом фракций выделяемых продуктов.

### ***Обогащение в тяжелых суспензиях и жидкостях***

Этот процесс заключается в разделении материалов по плотности в гравитационном или центробежном поле в суспензии или жидкости, плотность которой является промежуточной между плотностями разделяемых частиц.

Тяжелые суспензии представляют собой взвешенные в воде тонкодисперсные частицы тяжелых минералов или магнитных сплавов – утяжелителей, в качестве которых используют ферросилиций, пирит, пирротин, магнетитовый и гематитовый концентраты и другие материалы крупностью до 0,16 мм. В качестве тяжелых жидкостей используют растворы хлоридов кальция и цинка, тетраоксида углерода, тетрабромэтана, хлорного олива и других соединений.

Для поддержания устойчивости суспензии в нее добавляю глину (до 3% от массы утяжелителя) или применяют смесь порошков утяжелителей различной плотности.

Наиболее распространенными аппаратами обогащения в тяжелых средах являются барабанные, конусные, колесные и гидроциклонные сепараторы.

### ***Обогащение в потоках на наклонных поверхностях***

Эти процессы включают обогащение на концентрационных столах, а также в струйных сепараторах, шлюзах и подшлюзках, в винтовых сепараторах и винтовых шлюзах.

Обогащение на концентрационных столах характеризуется разделением минеральных частиц по плотности в тонком слое воды, текущей по наклонной плоской деке стола, совершающей возвратно-поступательные горизонтальные движения перпендикулярно направлению движения воды.

Обогащение на винтовых сепараторах и шлюзах происходит, как и на столах, в небольшой толщины (6...15 мм) потоке пульпы разделяемых материалов, подаваемой в верхнюю часть наклонного желоба (содержание твердого в пульпе – 6...40%).

Винтовые сепараторы представляют собой неподвижные вертикальные винтообразные желоба (число витков – 4...6) с поверхностью специального профиля. Тяжелые частицы пульпы

сосредоточиваются в желобе ближе к вертикальной оси его витков и разгружаются посредством отсекателей в соответствующие приемники. Легкие частицы концентрируются у периферийной части желоба и разгружаются в нижней части сепаратора. Желоб имеет угол наклона к горизонту, характеризуемый величиной относительного шага винта (отношением шага к диаметру), находящейся в пределах 0,4...0,6.

Разновидностью винтовых сепараторов являются винтовые шлюзы, характеризующиеся более широкими желобами и меньшими наклонами днищ желобов.

### **Промывка**

Для разрушения, удаления глинистых, песчаных и других минеральных, а также органических примесей твердых отходов часто используют процессы их промывки (отмывки), которые проводят в промывочных машинах разнообразной конструкции (гидромониторах, барабанных грохотах, вращающихся скрубберах, корытных мойках, аппаратах автоклавного и другого типов). В качестве промывочного агента наиболее часто используют воду (в ряде случаев с добавками ПАВ), иногда применяют острый пар и различные растворители.

Помимо описанных гравитационных методов обогащения в практике переработки твердых отходов используют и другие, часто называемые инерционными, которые основаны на различии плотностей компонентов обрабатываемых материалов, а также их упругостей и коэффициентов трения.

### **Флотация**

В практике переработки отдельных видов твердых отходов (некоторых шламов, металлургических шлаков, рудных и нерудных компонентов отвалов и т. п.) находит применение метод их обогащения флотацией. Крупность флотируемых материалов обычно не превышает 0,5 мм. Наиболее распространенной является пенная флотация с использованием механических и пневмомеханических машин; пленочную флотацию, ввиду ее низкой производительности, и масляную флотацию, ввиду ее дороговизны, используют крайне ограниченно.

### **Магнитные методы**

Магнитное обогащение используют для отделения парамагнитных (слабомагнитных) и ферромагнитных (сильномагнитных) компонентов (веществ с удельной магнитной восприимчивостью  $\chi$  выше  $10^{-7}$  м<sup>3</sup>/кг) смесей твердых материалов от их диамагнитных (немагнитных) составляющих. Сильномагнитными свойствами обладают магнетит

( $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), маггелит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), пирротин ( $\text{Fe}_{n-1}\text{S}_n$ ), титаномагнетит, ферросилиций, франклинит, сидерит, слабомагнитные оксиды железа после их обжига и некоторые другие вещества. Ряд оксидов, гидроксидов и карбонатов железа, марганца, хрома и редких металлов относится к материалам со слабомагнитными свойствами. Различные порообразующие минералы (кварц, полевые шпаты, кальцит и т. п.) относятся к немагнитным материалам.

Подлежащие магнитной сепарации материалы как правило подвергают предварительной обработке (дроблению, измельчению, грохочению, обесшламливанию, магнетизирующему обжигу и др.). Обычно магнитное обогащение материалов крупностью 3...50 мм проводят сухим способом, материалов мельче 3 мм – мокрым. Технология магнитной сепарации зависит прежде всего от состава подлежащего переработке материала и определяется типом используемых сепараторов. Последние обычно снабжены многополюсными открытыми или закрытыми магнитными системами, создающими различные типы магнитных полей, различаются способами питания (верхняя или нижняя подача материала), транспорта продуктов обогащения (барабанные, валковые, дисковые, ленточные, роликовые, шкивные сепараторы), характером движения обрабатываемого потока и эвакуации магнитных компонентов (прямоточные, противоточные, полупротивоточные) и другими особенностями.

В процессах переработки твердых отходов широкое применение находят электромагнитные железоотделители (шкивные, подвесные, саморазгружающиеся сепараторы), предназначенные для извлечения железных и других ферромагнитных предметов из разрыхленных немагнитных материалов.

### **Электрические методы**

Электрическое обогащение основано на различии электрофизических свойств разделяемых материалов и включает сепарацию в электростатическом поле, поле коронного разряда, коронно-электростатическом поле и трибоадгезионную сепарацию. С их помощью решают задачи обогащения, классификации и обеспыливания как рудного сырья и некондиционных продуктов в металлургии черных, цветных и редких металлов, так и многих неметаллических материалов (тонкодисперсного кварца, формовочных песков, известняка, песка для стекольной промышленности и др.).

Электростатическая сепарация основана на различии электропроводности и способности к электризации трением (трибоэлектрический эффект) минеральных частиц разделяемой смеси. По электропроводности все минеральные частицы делятся на

проводники, полупроводники и диэлектрики. При контакте частиц обогащаемого материала с поверхностью заряженного металлического электрода всем им сообщается одноименный с ним заряд, величина которого зависит от электропроводности частиц. Электропроводные частицы интенсивно приобретают значительный заряд и отталкиваются от электрода, частицы диэлектриков сохраняют свои траектории.

При небольшой разнице в электропроводности частиц используют электризацию их трением (путем интенсивного перемешивания или транспортирования по поверхности вибрлотка). Наэлектризованные частицы направляют в электрическое поле, где происходит их сепарация.

Электрические сепараторы классифицируют по характеру электрического поля (электростатические и с коронным разрядом), способу электризации (с электризацией контактным способом, в поле коронного разряда, трибоэлектризацией и др.) и по конструкции рабочих органов (барабанные, камерные, ленточные, лотковые, пластинчатые, полочные и др.).

Подлежащие электрической сепарации материалы обычно подвергают подготовительным операциям (классификации, обесшламливанию, сушке, термообработке при температурах до 300°C). Наиболее эффективно процесс сепарации идет при крупности частиц не более 5 мм.

Наряду с перечисленными процессами обогащения при переработке твердых отходов в ряде случаев используют и отличные от них методы (флотогравитацию, сепарацию по коэффициенту трения и по форме, отдельные приемы радиометрической и других видов сепарации).

### **3.1.3. Физико-химическое выделение компонентов при участии жидкой фазы**

Многие процессы утилизации твердых отходов в промышленности основаны на использовании методов выщелачивания (экстрагирования), растворения и кристаллизации перерабатываемых материалов.

#### **Выщелачивание (экстрагирование)**

Этот метод широко используется в практике переработки отвалов горнодобывающей промышленности, некоторых металлургических и топливных шлаков, ипритных огарков, древесных и многих других ВМР. Метод основан на извлечении одного или нескольких компонентов из комплексного твердого материала путем его (их) избирательного растворения в жидкости – экстрагенте.



В зависимости от характера физико-химических процессов, протекающих при выщелачивании, различают простое растворение (целевой компонент извлекается в раствор в составе присутствующего в исходном материале соединения) и выщелачивание с химической реакцией (целевой компонент, находящийся в исходном материале в составе малорастворимого соединения, переходит в хорошо растворимую форму).

Используемые для реализации процессов экстракции аппараты характеризуются весьма большим разнообразием конструкций. Экстракторы классифицируют по способу действия (периодические и непрерывнодействующие), по направлению движения растворителя и твердой фазы (противо- и прямоточные, с процессом полного смешения, с процессом в слое и комбинированные), по характеру циркуляции растворителя (с однократным прохождением, с рециркуляцией и оросительные) и по ряду других принципов.

### **Растворение**

Этот метод заключается в реализации гетерогенного взаимодействия между жидкостью и твердым веществом, сопровождаемого переходом последнего в раствор, и широко используется в практике переработки многих твердых отходов.

Процессы растворения осуществляют в аппаратах периодического (при небольших производительностях – в стационарном слое твердых частиц или с перемешиванием) и непрерывного (во взвешенном слое или с перемешиванием) действия разнообразных конструкций. Для интенсификации растворения в ряде случаев используют различные способы наложения полей колебаний.

### **Кристаллизация**

Выделение твердой фазы в виде кристаллов из насыщенных растворов, расплавов или паров имеет большое распространение при переработке различных твердых отходов.

Создание необходимого для кристаллизации пересыщения раствора обеспечивают двумя основными приемами – охлаждением горячих насыщенных растворов (изогирическая кристаллизация) и удалением части растворителя путем выпаривания (изотермическая кристаллизация) или их комбинацией (вакуумкристаллизация, фракционированная кристаллизация, кристаллизация с испарением растворителя в токе воздуха или другого газа-носителя). Наряду с ними в практике кристаллизации из растворов иногда используют кристаллизацию высаливанием (введением в раствор веществ, понижающих растворимость соли), вымораживанием (охлаждением

растворов до отрицательных температур с выделением кристаллов соли или их концентрированием путем удаления части растворителя в виде льда) или за счет химической реакции, обеспечивающей пересыщение раствора, а также высокотемпературную (автоклавную) кристаллизацию, обеспечивающую возможность получения кристаллогидратов с минимальным содержанием кристаллизационной влаги.

Помимо описанных выше методов в технологии переработки твердых отходов в ряде случаев используют и другие, связанные с операциями обработки пульпы (такие, как сгущение или фильтрование), а также со специфическими приемами обработки как самих отходов, так и синтезируемых из них материалов (например: уплотнение, обеспыливание, остекловывание, вальцевание, опудривание, каландрование и др.).

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Какое оборудование используют для уменьшения размеров кусков (зерен) твердых отходов?
2. В чем разница между классификацией и сортировкой твердых отходов, а также существование этих операций?
3. Какие механизмы используют для разделения по крупности твердых отходов?
4. Как классифицируют приемы гранулирования (агломерирования) дисперсных материалов?
5. В чем состоит существо обогащения (разделения) компонентов твердых материалов путем отсадки, обработки на концентрационных столах, винтовых и струйных сепараторах, шлюзах, в тяжелых суспензиях и жидкостях?
6. Какие материалы обогащают в сильных (слабых) магнитных полях?
7. Какие разновидности электрической сепарации дисперсных материалов используют в производственной практике? К чему сводится их существо?
8. Какие факторы определяют интенсивность процессов выщелачивания и растворения?



## 3.2. Утилизация и обезвреживание твердых отходов

### 3.2.1. Утилизация отходов горнодобывающей промышленности

Исследования и полупромышленные испытания этих отходов показали, что они могут быть прекрасным сырьем для пористых заполнителей бетона, строительного кирпича и керамики, штукатурных и кладочных растворов, щебня и других строительных материалов. Перспективно их использование и в качестве глинистого сырья для производства пустотелой строительной керамики и аглопорита – легкого пористого заполнителя для бетонов.

Обогащение угля с целью снижения содержания в нем серы сопровождается образованием серного колчедана, содержащего 42...46% серы и 5...8% углерода, причем только в Подмосковном угольном бассейне запасы серного колчедана достигают 60 млн.т. Серный колчедан  $FeS_2$  является потенциальным сырьем для производства серной кислоты. Использование его вместе с другим крупнотоннажным промышленным отходом – сульфатом железа  $FeSO_4$ , образующимся в производстве пигмента диоксида титана  $TiO_2$ , позволяет получать  $SO_2$  для последующего производства серной кислоты. Процесс совместной термической обработки сульфата железа серного колчедана может быть выражен суммарным уравнением



Породы вскрыши и попутно извлекаемые породы часто содержат мел  $CaCO_3$ , который может быть использован для производства белого цемента, строительной извести, стекла. Глинистые сланцы являются хорошим сырьем в производстве портландцемента. Основой для производства почти всех известных видов строительных материалов могут служить так называемые горелые породы – пустые породы, обожженные при подземных пожарах или при самовозгорании терриконов.

Среди извлекаемых при горных работах пород нередко встречаются пластичные глины. Так, в Никопольском бассейне их запасы оцениваются в 430 млн.м<sup>3</sup>. Эти глины являются сырьем для производства керамзита – хорошего тепло- и звукоизолирующего материала, служащего пористым заполнителем бетонов, фильтрующим материалом и т. п. Обычно керамзит получают путем обжига легкоплавких (<1350°C) глинистых пород с добавками порообразующих материалов (солярового масла, торфа, сульфитно-спиртовой барды и др.). В большинстве случаев керамзит получают в виде гравия с размером зерен 5...40 мм или щебня. Плотность керамзитового гравия составляет 150...800 кг/м<sup>3</sup>.

### 3.2.2. Утилизация твердых отходов металлургии и энергетики

Металлургические шлаки также представляют собой ценное сырье для производства ряда строительных материалов. Так, гранулированные доменные шлаки являются прекрасным материалом для дорожного строительства. В смеси с вязкими битумами они успешно заменяют горячие асфальтобетонные смеси, причем их возможно укладывать даже на влажное основание. Битушлаковые покрытия дорог в 2,5 раза дешевле железобетонных. Сталеплавильные шлаки используются в качестве оборотного продукта (в виде флюса в доменной шихте и вагранках), до 50 % их идет на изготовление щебня. Ряд шлаков с высоким содержанием оксида кальция и фосфатов находит применение в сельском хозяйстве и используется в качестве известковых мелиорантов для кислых почв. Отвалы шлаки полиметаллических рудников, обогатительных фабрик и предприятий цветной металлургии содержат большое количество железа, меди, цинка, свинца и др. По химическому составу их можно условно подразделить на три группы. К первой следует отнести шлаки никелевых заводов и некоторую часть отходов медеплавильных заводов, отличающихся низким содержанием цветных металлов и железа. Извлечение металлов из таких шлаков экономически нецелесообразно, поэтому наиболее целесообразно перерабатывать их в строительные материалы. Вторую группу составляют медные шлаки, содержащие цинк, свинец, значительные количества железа и малые количества меди. Из этих шлаков целесообразно извлекать Zn, Pb, Sn. В третью группу можно объединить оловянные и свинцовые шлаки и некоторые медные шлаки с высоким содержанием Zn, Pb, Sn, из которых экономически целесообразно извлечение этих ценных металлов даже без комплексной переработки шлаков.

Золошлаковые отходы тепловых электростанций, выход которых в России и странах ближнего Зарубежья составляет около 70 млн.т в год, близки по составу к металлургическим и также используются в промышленности стройматериалов: силикатного кирпича, аглопористого гравия, цемента. Высокое содержание CaO в золе сланцев и торфа позволяет использовать ее в качестве известкового мелиоранта для улучшения кислых почв.

Зола некоторых углей и нефтей содержит многие металлы, причем их содержание нередко бывает довольно значительным:

| Металл          | Co  | Ni  | Zn  | Ga  | Ge  | V   | Sn  |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Содержание, г/т | 300 | 700 | 200 | 100 | 500 | 400 | 200 |

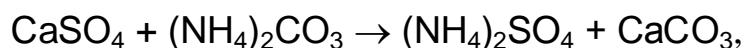
В ряде случаев концентрации металлов в золе таковы, что становится экономически выгодным их извлечение. Так, зола бурых углей некоторых месторождений содержит до 1 кг/т урана; зола торфа содержит значительные количества V, Ca, Cu, Ni, Zn, Pb; в золе нефтей содержание  $V_2O_5$  достигает 65%. Однако, несмотря на это, утилизация огромных масс зол и шлаков, скапливающихся на золоотвалах ТЭС, в настоящее время осуществляется совершенно недостаточно.

### **3.2.3. Утилизация твердых отходов химической промышленности**

В промышленности неорганического синтеза наибольшее количество твердых отходов дают производства минеральных удобрений и серной кислоты.

При производстве двойного суперфосфата, фосфорной кислоты и в ряде других химических производств образуется крупнотоннажный твердый отход – фосфогипс, содержащий 80...90 % гипса, 0,5...0,6 % фосфорной кислоты, 5...6% глины. Основная масса фосфогипса сбрасывается в отвалы, в которых содержатся десятки миллионов тонн этого отхода. Транспортировка фосфогипса в отвалы и его хранение требуют капитальных и эксплуатационных затрат, составляющих 40% стоимости сооружения и эксплуатации основного производства.

Фосфогипс может успешно применяться в строительной промышленности вместо дефицитного гипса. На ряде зарубежных предприятий он находит применение как сырье для производства сульфата аммония, для чего разработаны две технологии – жидкостная, по реакции



и газовая, с использованием газообразного аммиака и диоксида углерода:



Возможна переработка фосфогипса в серную кислоту и известь и использование его в качестве химического мелиоранта для солонцовых почв.

При переработке и обогащении сырья в калийной промышленности ежегодно образуются миллионы тонн твердых галитовых отходов и сотни тысяч тонн глинисто-солевых шлаков, занимающих большие площади под отвалы и шламохранилища.

Галитовые отходы могут быть использованы в качестве вторичного сырья для получения соды, хлора, поваренной соли, хотя их переработка затруднена присутствием сульфатов, хлорида калия и других примесей.

В производстве серной кислоты основными и наиболее «массовыми» отходами являются пиритный огарок и различные шламы, образующиеся в циклонах, электрофильтрах, отстойниках и другой аппаратуре, входящей в схему получения  $H_2SO_4$ . На 1 т кислоты приходится не менее 0,55 т огарка. В настоящее время огарок используют главным образом в цементной промышленности, однако он может найти применение в производстве чугуна и для получения минеральных пигментов – железного сурика, охры, мумии.

Особо токсичные и радиоактивные отходы, по разным причинам не подлежащие переработке, должны быть изолированы от окружающей среды, захоронены. Для захоронения отходов их заключают в металлические капсулы, а затем в кубы из отвердевшего жидкого стекла, рассчитанные на неопределенно долгое время хранения, и помещают под землей, в геологических выработках (брошенные угольные шахты, соляные копи, иногда специально созданные полости). Иногда в контейнерах из материалов, стойких к действию морской воды, отходы опускают в глубокие впадины морского дна.

Захоронение особо опасных отходов – одна из наиболее трудноразрешимых проблем охраны окружающей среды, так как места для их абсолютно безопасного изолирования от биосферы пока не найдено.

### **3.2.4. Установки для обезвреживания твердых отходов**

Количество и состав твердых отходов зависят от вида производства, сырья, из которого получены готовые продукты, уровня технологии и т. д. Многие твердые отходы являются вторичными материальными ресурсами и подлежат переработке в готовую продукцию. В тех случаях, когда требуется удалить влагу из таких отходов, используют тепловую сушку.

Термическое обезвреживание производят прямым сжиганием или пиролизом твердых отходов. Сжиганию подвергают полимерные материалы (пластмассы, смолы, резину), органические вещества с температурой плавления более 30...40°C, текстильные отходы и др.

Теплота сгорания горючих отходов составляет 11600...18600 кДж/кг. Для сжигания требуется избыток воздуха от 40 до 100% по сравнению со стехиометрическим количеством. При сжигании органическая часть отходов превращается в газообразные вещества:  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $NO_x$ ,  $H_2O$ ,  $HF$ ,  $HCl$ ,  $SO_2$  и др. Минеральные вещества остаются в золе. Целесообразно проводить сжигание отходов с получением новых продуктов, которые можно использовать в производственном цикле в качестве сырья или промежуточных

продуктов. Выделяющееся тепло необходимо использовать для получения пара.

Некоторые отходы, например, содержащие целлюлозу, резину, полимеры, подвергают пиролизу. Газообразные, жидкие и твердые продукты используют по-разному. Тепло для проведения процесса частично получается за счет тепла сгорания пиролизного газа. Например, получаемый при пиролизе резины (изношенных автомобильных покрышек) твердый углеродный остаток подвергают карбонизации и активации для переработки в активный уголь. Газообразные отходы этого процесса используют для получения тепла, а жидкие – в качестве связующего при получении гранул угля. Процесс пиролиза проводят при 600...850°C.

Для сжигания и пиролиза твердых отходов используют печи разных конструкций. Наиболее широкое применение нашли барабанные, камерные, многоподовые, циклонные печи и печи с псевдоожиженным слоем.

Барабанная печь представляет собой наклонный стальной цилиндр длиной 15...20 м, футерованный изнутри огнеупорным материалом. Частота вращения барабана – 0,8...2 мин<sup>-1</sup>. Недостатки печей: громоздкость, большая металлоемкость, высокие капитальные и эксплуатационные расходы.

Многоподовая печь представляет собой цилиндрическую камеру диаметром 3...7 м и высотой 4...15 м с 5...12 огнеупорными подами. Осадок движется сверху вниз через отверстия в подах. Дымовые газы движутся навстречу. По оси печи расположен полый вал, вращающийся с частотой 0,5...0,35 мин<sup>-1</sup>. К валу крепятся мешалки с зубьями для перемешивания осадка. Вал и отводы охлаждаются воздухом. Недостатки печей: необходимость применения дорогостоящих жаростойких чугунов, высокие эксплуатационные и капитальные затраты, наличие вращающихся элементов в зоне высоких температур, низкие удельные тепловые и весовые нагрузки топочного объема.

В печах с псевдоожиженным слоем в качестве инертного материала используют песок или фторопласт. Высота псевдоожиженного слоя составляет 0,5...1,5 м. Газы очищаются от пыли в циклоне или мокром фильтре.

Самым распространенным способом утилизации и обезвреживания нефтяных шламов является их сжигание в печах различной конструкции (камерных, кипящего слоя, барабанных и др.). Для сжигания таких отходов, содержащих не более 20% твердых примесей, широко используются печи кипящего слоя. Одна из технологических схем сжигания нефтяных шламов в печи кипящего

слоя приведена на рис.3.6.

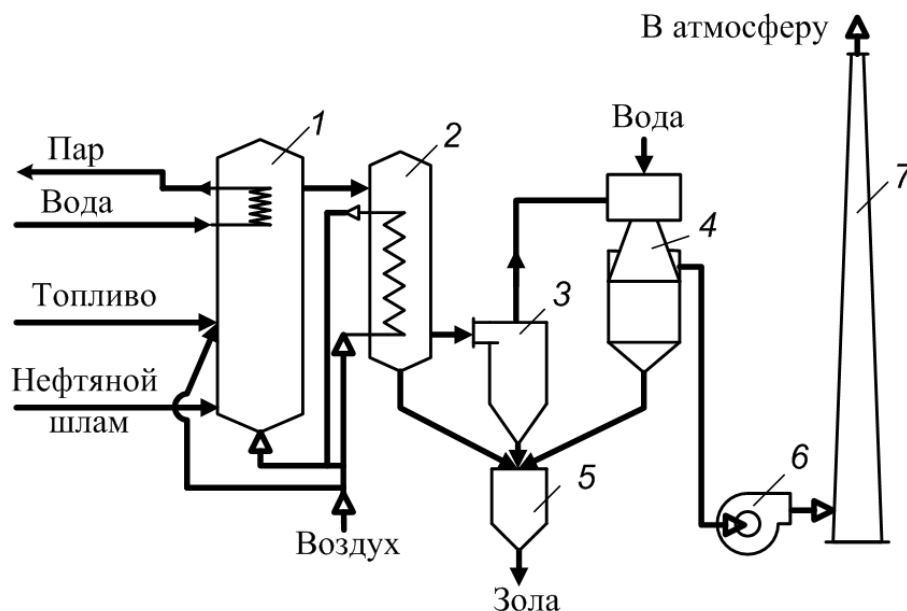


Рис.3.6. Схема установки для сжигания нефтяных шламов печи кипящего слоя:

1 – печь кипящего слоя; 2 - воздухоподогреватель; 3 – циклон; 4 – труба Вентури; 5 – сборник золы; 6 – дымосос; 7 – дымовая труба

Нефтяной шлам из узла подготовки поступает в печь кипящего слоя, где сжигается в присутствии нагнетаемого воздуха. Для увеличения эффективности сжигания в качестве теплоносителя в печи используют кварцевый песок фракции 2...3 мм. При сжигании шлама с теплотворной способностью до 2,09 МДж/кг в печь дополнительно подают топливный газ и подогретый воздух. При сжигании высококалорийного шлама необходимо предусматривать охлаждение кипящего слоя. Дымовые газы сжигания в воздухонагревателе отдают свое тепло холодному воздуху, поступающему на сжигание. После очистки от золы их дымососом отводят через дымовую трубу. При содержании в исходном шламе 67...83 % воды, 8...12 % нефтепродуктов и 6...15 % минеральных веществ образуется зола, содержащая 23,51 %  $\text{SiO}_2$ , 0,2 %  $\text{CuO}$ , 0,59 %  $\text{ZnO}$ , 1,22 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 44,8 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 16,75 %  $\text{CaO}$ , 1,73 %  $\text{MgO}$ , 1,2 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 4,66 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 0,25 %  $\text{H}_2\text{O}$ . Зола от сжигания шлама транспортируют в отвал.

При сжигании нефтяных шламов, содержащих до 70% твердых примесей, большое распространение получили вращающиеся печи барабанного типа, позволяющие сжигать отходы различного гранулометрического состава. На рис. 3.7 приведена одна из схем установок подобного типа.



Нефтяной шлам закачивают в емкости и сжимают воздухом. Из емкостей компримированный шлам подают в разогретую вращающуюся футерованную печь длиной 12,75 м и диаметром 1,5 м. В передней (по направлению движения шлама) части печи, установленной с уклоном 30 мм на 1 м, происходит испарение из шлама воды и газификация

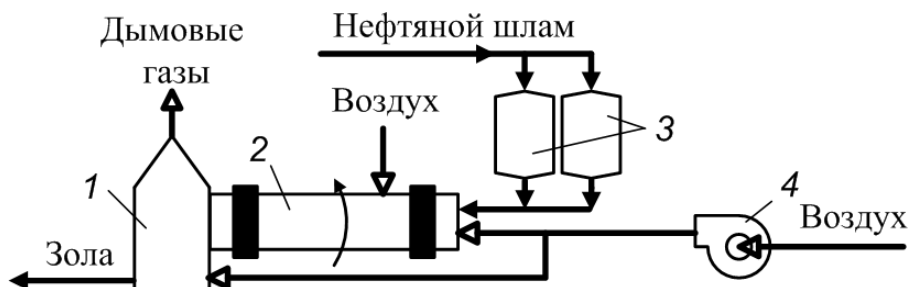


Рис.3.7. Схемы установок для сжигания нефтяных шламов в печи барабанного типа:

- 1 – камера дожигания; 2 – барабанная печь; 3 - емкость для шлама;  
4 – вентилятор

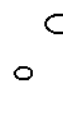
содержащихся в нем нефтепродуктов. В средней части печи начинается основное сжигание горючих компонентов шлама.

Образующаяся в процессе сжигания зола поступает в камеру дожигания, где за счет тепла огнеупорной футеровки, нагретой при помощи дополнительной горелки, происходит окончательное дожигание горючих твердых частиц и газов, выходящих из барабанной печи. Камера дожигания сообщается с дымовой трубой.

Производительность установки составляет 1,3...3,0 т/ч нефтяных шламов, что в 2...4 раза превышает производительность описанной выше установки с печью кипящего слоя. Сжигание отходов на современном нефтехимическом комбинате оптимальной мощности может обеспечить работу силовой станции мощностью 1 млн. кВт.

### Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключаются пути использования отходов растительного сырья в производстве строительных материалов?
2. Что представляют собой металлургические шлаки и каковы их важнейшие свойства?
3. В чем состоит получение из металлургических



шлаков щебня, шлаковой пемзы, шлаковой ваты, шлакоситаллов?

4. Какие соединения и материалы входят в состав золошлаковых отходов теплоэнергетики?
5. В каких целях могут использоваться золошлаковые отходы теплоэнергетики?
6. Дайте характеристику основным отходам химической промышленности.
7. В чем состоит технология утилизации твердых отходов?



### **3.3. Использование промышленных и коммунально-бытовых отходов в сельском хозяйстве**

Весьма перспективным является использование ряда промышленных и коммунально-бытовых отходов в сельском хозяйстве, где они могут найти применение в качестве мелиорантов или удобрений-мелиорантов.

В большинстве случаев производственные отходы могут быть поставлены сельскому хозяйству бесплатно, а использование их на местах, в районах, близких к промышленному предприятию, существенно снижает расходы на транспортировку. Поэтому мелиоративное использование промышленных отходов, наряду с социальной и экологической целесообразностью, имеет высокую экономическую эффективность.

Для успешного использования промышленных отходов в сельском хозяйстве необходимо глубокое и всестороннее изучение их свойств и влияния на основные агрохимические характеристики почвы и качество сельскохозяйственной продукции.

#### **3.3.1. Применение промышленных отходов для мелиорации кислых почв**

Большинство пахотных земель в основных экономических районах относится к кислым почвам. На Дальнем Востоке они составляют 94% пашни, в Центрально-Нечерноземном районе – 83%, в Волго-Вятском – до 80%.

Неблагоприятные агрохимические свойства кислых почв могут быть устранены их известкованием. При этом происходит вытеснение катионов водорода из почвенного поглощающего комплекса (ППК), а образующаяся  $\text{H}_2\text{CO}_3$  распадается до  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ ,



В качестве известковых мелиорантов могут быть с успехом использованы кальцийсодержащие промышленные отходы различных производств, в том числе:

1) отходы металлургической промышленности (доменные, мартеновские, электроплавильные шлаки, шлак магниевого литья, шлак ванадиевого производства, отходы производства феррохромовых сплавов);

2) золы (зола горючих сланцев, золы уноса ТЭС, каменноугольные и бурогоугольные золы, торфяная зола);

3) отходы промышленности строительных материалов (карьерные отходы, отходы производства известнякового щебня, отходы цементных заводов, мраморная крошка);

4) отходы свеклосахарного производства (дефекационная и фильтрпрессная грязь);

5) крупнотоннажные отходы ряда других производств, в том числе отходы бумажной, кожевенной, содовой, асбестовой и других отраслей промышленности, а также флотационные отходы, получаемые при обогащении некоторых руд.

В практике известкования кислых почв наиболее широкое употребление нашли шлаки металлургических производств. Прекрасным известковым мелиорантом является мартеновский шлак. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что внесение мартеновского шлака существенно повышает урожаи льна, проса, озимой ржи и других культур и положительно влияет на качество сельскохозяйственной продукции.

Хорошим мелиорирующим действием обладают конверторные и электросталеплавильные шлаки, хотя применение последних ограничивается высоким (до 6%) содержанием в них фтора. Перспективными мелиорантами для кислых почв могут стать шлаки производства ферросплавов, и в первую очередь феррохромовый шлак. На севооборотах с просом, картофелем и некоторыми другими культурами феррохромовый шлак превышает по эффективности другие известковые мелиоранты.

Многочисленные лабораторные и полевые исследования свидетельствуют о высокой мелиорирующей эффективности доменного шлака.

Для мелиорации кислых почв были апробированы золы сжигания каменного и бурого углей. Они содержат кальций, магний, фосфор, серу, кремний, имеют щелочную среду и в ряде случаев по влиянию на урожай превосходят известняк.

Наряду с отходами металлургии и теплоэнергетики в мелиорации кислых почв успешно используются отходы производства строительных

материалов. Высокую мелиорирующую способность проявляет цементная пыль, содержащая от 10 до 40% кальция в виде оксида, карбоната и легкогидролизующихся силикатов. Наряду с кальцием цементная пыль содержит значительные количества калия (до 2,0...2,2%), т. е. является ценным калийным удобрением. Наибольший эффект от внесения цементной пыли проявляется на почвах легкого механического состава, бедных подвижными соединениями калия. Мелиорирующий эффект внесения цементной пыли проявляется практически на всех сельскохозяйственных культурах: на севооборотах с картофелем цементная пыль оказывает положительное действие не только на урожай клубней, но и на их качество. Внесение в почву цементной пыли способствует интенсивному росту и развитию корневой системы многих культурных растений.

Цементная пыль является более быстродействующим мелиорантом, чем известковая мука, а экономический эффект от прибавки урожая при ее использовании более чем в 5 раз превышает затраты на известкование.

В районах свеклосеяния для улучшения кислых почв с успехом применяется дефекация (дефекационная грязь) – отход свеклосахарного производства. Он содержит до 70 % карбонатов кальция и магния, 1...2 % фосфора, 0,6...0,9 % калия, до 15 % органических соединений и небольшие примеси серы, азотных соединений и микроэлементов. Его внесение в почву нейтрализует кислотность, улучшает нитратный и фосфатный режимы почвы, ее водно-физические характеристики и, в конечном счете, приводит к повышению урожайности сельскохозяйственных культур.

При известковании почв нашли применение флотационные хвосты горнорудной промышленности – отходы, образующиеся при обогащении сернистых руд. Они содержат до 45...46 % Ca, 0,6...1,2 % Mg, 6,5...8,9 % SiO<sub>2</sub>, 4,3...7,2 % S. По воздействию на агрохимические характеристики почвы и урожайность сельскохозяйственных культур эти отходы несколько уступают молотому известняку и шлакам металлургической промышленности, но превосходят буроугольные и каменноугольные золы. В мелиорации могут найти применение и флотационные хвосты, образующиеся при обогащении цинково-свинцовой руды, состоящие в основном из доломитовых пород.

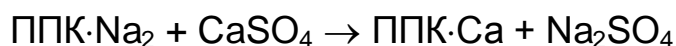
Крупнотоннажный известковый отход дает производство некоторых изоляционных материалов; шламы, образующиеся при очистке серы, также содержат 50...60 % CaCO<sub>3</sub>, 33...43 % CaSiO<sub>3</sub>, до 2 % CaSO<sub>4</sub> и MgO. В качестве комплексного мелиоранта – удобрения для кислых почв – был апробирован химически осажденный карбонат кальция, являющийся побочным продуктом обработки фосфатного

сырья. Его внесение в почву наряду с нейтрализацией кислотности обогащает почву основными элементами питания растений.

### **3.3.2. Применение промышленных отходов для мелиорации солонцовых почв**

К солонцам и солонцеватым почвам относят почвы, содержащие большие количества обменного натрия. Они характеризуются неблагоприятными агрохимическими свойствами. Во влажном состоянии солонцовые почвы набухают, становятся вязкими и липкими, в сухом состоянии отличаются твердостью и слитностью. Водопроницаемость их низка и большая часть почвенной влаги остается недоступной растениям. Кроме плохих водно-физических качеств, некоторым солонцам свойственна повышенная щелочность, губительно действующая на культурные растения. Особенно высокой щелочностью отличаются солонцы содового засоления.

Отрицательные агрохимические показатели солонцов делают их непригодными для сельскохозяйственного освоения без коренной мелиорации, и в частности необратимого вытеснения поглощенного натрия из почвенного поглощающего комплекса мелиорируемой почвы кальцием:



Во избежание вторичного осолонцевания продукты реакции (в данном случае сульфат натрия) необходимо удалить из корнеобитаемого слоя. Это достигается капитальной промывкой.

Традиционным химическим мелиорантом для улучшения солонцовых почв является гипс ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), источником которого могут быть как природные гипсосодержащие материалы (гипсовый камень, глиногипс, гаж), так и промышленные отходы (фосфогипс, дефека́т, различные шламы). Однако природный гипсовый камень находит широкое применение в строительной промышленности и ряде других отраслей народного хозяйства. Поэтому для гипсования солонцов целесообразно применение гипсосодержащих промышленных отходов.

Широкое применение в мелиорации солонцов нашел фосфогипс, содержащий 80...90 %  $\text{CaSO}_4$ . Он гораздо дешевле гипса, обладает более высокой растворимостью, а присутствие в нем водорастворимого фосфора усиливает мелиорирующий эффект. Поскольку этому отходу присуща высокая (до 40...50 %) гигроскопичность, его рекомендуется подсушивать и гранулировать в заводских условиях, снижая содержание свободной влаги до 15 %.

В Ставропольском крае прибавки урожая с мелиорированных участков колеблются от 10 до 30 %, что в среднем дает дополнительно более 13 ц/га зерна ежегодно.

На луговых солонцовых почвах левобережной лесостепи Украины внесение фосфогипса способствовало повышению урожаев зерновых и силосных культур и многолетних трав на 18...25 %.

Фосфогипс находит применение не только как высокоэффективный мелиорант для улучшения солонцовых почв, но и как профилактическое средство, предупреждающее осолонцевание почв при их орошении минерализованными водами, содержащими большое количество катионов натрия.

Для мелиорации солонцов может быть использован шлам – гипсосодержащий раствор, образующийся при нейтрализации травильных растворов известковым молоком. Высушенный шлам содержит 60...80% гипса и микроэлементы (марганец, цинк, медь, никель, хром, молибден, кобальт). При возделывании одно- и многолетних трав внесение шлама повышает урожаи в 1,5...2,0 раза по сравнению с контролем.

На солонцовых почвах Молдавии испытано мелиорирующее действие шлама биохимической промышленности, содержащего 41...74 % органических соединений, 0,7...3,2 % общего азота, 0,21...0,32 % подвижного фосфора, а также соединения кальция, серы и кремния. Шлам является кислотным мелиорантом с  $pH = 3,0...4,5$ , и его внесение одновременно вызывает рассолонцевание почвы и удобряет ее. Прибавки зерна при использовании биохимического шлама ежегодно достигали 10...15 ц/га. Ежегодно в Молдавии скапливается до 115...120 тыс.т этого ценного удобрения-мелиоранта, что позволяет ежегодно мелиорировать до 15 тыс.га солонцов.

На солонцовых почвах Донбасса хорошо зарекомендовали себя кальцийсодержащие отходы содовой промышленности – так называемые «шламы белых морей» – с содержанием  $CaCO_3$ , равным 89...93 %. По своему мелиорирующему действию они превосходят многие мелиоранты, в том числе и дефекаат.

Дефекаат свеклосахарного производства используется не только для мелиорации кислых почв, но и для улучшения солонцов. Его применение на солонцеватых почвах Воронежской области дало увеличение урожая сельскохозяйственных культур в 1,5...2 раза, а на орошаемых солонцеватых черноземах Воронежской области внесение 5...10 т/га дефекаата сахарных заводов повысило урожай кукурузы на силос с 418 до 525...555 ц/га.

Для мелиорации солонцовых почв используется терриконная порода – отход угольной промышленности, богатый соединениями

кальция, железа, серы и содержащий фосфор, калий, микроэлементы. С 1 т терриконной породы в почву поступает 100...120 кг гипса, 80...100 кг оксидов железа, 5...10 кг фосфора, 5 кг марганца, по 100 г цинка и меди. При внесении в солонцовые почвы 20...40 т/га терриконной породы существенно возрастает водопроницаемость и улучшается водно-воздушный режим почв, а присутствие в ней элементов питания растений способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Запасы этого отхода в районах угледобычи практически неограниченны.

Серная кислота является крупнотоннажным отходом многих отраслей промышленности, в ряде случаев весьма опасным для окружающей среды. Регенерация отработанной серной кислоты (ОСК) – дорогостоящий процесс. Поэтому ОСК, как правило, сливается в отвалы, овраги, выработанные карьеры, загрязняя окружающую среду. Между тем ОСК является весьма перспективным мелиорантом для солонцов содового засоления. Положительный опыт кислотования накоплен в Армении и Азербайджане, на Северном Кавказе, в Самарской, Воронежской, Ростовской областях, в Казахстане и Западной Сибири.

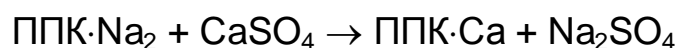
При мелиорации содовых солончаков-солонцов, содержащих карбонат кальция, почву обрабатывают 0,8...1,0%-ным раствором ОСК с последующей промывкой для удаления побочных продуктов реакции. В результате кислотования происходит нейтрализация щелочности:



разложение карбонатов с переходом их в сульфаты и гидрокарбонаты кальция и магния:



и взаимодействие образовавшегося тонкодисперсного гипса с ППК солонца:



с вытеснением обменного натрия. Кислование повышает водопроницаемость солонцов, увеличивает их влагоемкость. Одновременно происходит увеличение содержания подвижных соединений азота и фосфора, улучшение пищевого режима мелиорируемых почв.

Высокая эффективность кислотования содовых солонцов ОСК отмечена во всех регионах их распространения. Серная кислота и другие отработанные минеральные кислоты являются быстродействующими мелиорантами.

Хорошие результаты дает внесение в почву серной кислоты с гипсом и с полимерами, причем содержание в почве водорасщепляющих

агрохимически ценных агрегатов размером 1...3 мм повышается в 10...15 раз.

Широкое применение в мелиорации солонцов могут найти травильные растворы металлургической и металлообрабатывающей промышленности, которые, наряду с серной кислотой, содержат сульфаты железа и других металлов. Особенно богаты микродобавками растворы, образующиеся при травлении легированных сталей, которые содержат хром, никель, молибден, цинк, медь. Кроме того, в травильные растворы из технологических соображений добавляется аммиачная селитра.

Для мелиорации почв содового засоления можно использовать и разбавленную серную кислоту, получаемую из отходящих газов промышленности и теплоэнергетики. Разработанные в настоящее время каталитические методы доокисления  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$  позволяют извлекать из отходящих газов до 98...99%  $\text{SO}_2$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , полученная таким путем, содержит много различных примесей и непригодна для промышленного использования, однако, при отсутствии токсикантов, ее можно применять для мелиорации солонцов.

Наряду с промышленными отходами, содержащими минеральные кислоты, широкое применение в мелиорации могут найти отходы, в состав которых входят гидролитически кислые соли. Примером таких мелиорантов может служить сульфат железа  $\text{FeSO}_4$ , входящий в состав многих отходов химической, металлообрабатывающей и других отраслей промышленности. Подвергаясь гидролизу в почве  $\text{FeSO}_4$  образует гидроксид железа и серную кислоту, которая нейтрализует щелочную реакцию почвенного раствора и образует свежесажженный мелкодисперсный гипс, вытесняющий из ППК солонца обменный натрий. Мелиорирующий эффект сульфата железа усиливается за счет седиментационного воздействия катиона железа на дисперсные фракции почвы, в результате чего снижается дисперсность мелиорируемой почвы, повышается степень ее оструктуренности, улучшаются фильтрационные свойства. Вместе с тем наблюдающееся при внесении железного купороса повышение концентрации подвижного железа в почве приводит к химической фиксации доступного фосфора и ухудшению фосфатной обеспеченности почв. Поэтому почвы, мелиорируемые сульфатом железа, нуждаются в фосфорных удобрениях. Многократными полевыми исследованиями отмечен высокий мелиорирующий эффект сульфата железа на содовых солонцах. При его внесении существенно улучшаются агрохимические характеристики почвы и повышаются урожаи основных сельскохозяйственных культур.



### **3.3.3. Применение промышленных и коммунальных отходов в качестве органических удобрений**

По данным ведущих научных учреждений для создания бездефицитного баланса гумуса в целом по России требуется ежегодно вносить в почву не менее 5 т/га органических удобрений (в пересчете на подстилочный навоз). Однако во многих регионах уже давно имеет место дефицит традиционных форм органических удобрений (отходов животноводства, птицеводства, растениеводства) и поиск новых ресурсов органических удобрений является важной задачей. Таким резервом могут стать отходы коммунального хозяйства (твердые бытовые отходы, осадки сточных вод), а также промышленные отходы, содержащие органические вещества.

Осадки сточных вод (ОСВ) составляют по России около 4 млн.т в год в пересчете на сухое вещество. В таком количестве ОСВ содержится 80 тыс.т азота, 80 тыс.т фосфора и 8 тыс.т калия. К 1990 г. общее количество ОСВ в стране повысилось более чем вдвое, а используется его не больше 20 %. Основные факторы, ограничивающие использование ОСВ:

- 1) неудовлетворительные физические свойства осадка с иловых площадок;
- 2) слабое внедрение на станциях очистки сточных вод передовых технологий по подготовке ОСВ к использованию в сельском хозяйстве;
- 3) отсутствие у потребителя данных об их удобрительной ценности, особенностях использования и токсикологической безопасности.

Удобрительная ценность ОСВ определяется не только содержанием азота, фосфора и калия, но и присутствием ряда микроэлементов, необходимых растениям (бора, молибдена, марганца, цинка). Содержание солей некоторых других металлов (кадмия, свинца, хрома, ртути) ограничивает применение ОСВ как удобрения, поскольку они токсичны для растений, животных и человека. Основной операцией подготовки ОСВ является получение продукта, отвечающего требованиям санитарии, т.е. обеззараженного. Для полного обеззараживания яиц гельминтов осадок сточных вод на иловых площадках должен находиться не менее трех лет с момента последней подачи. В целях ускорения обеззараживания ОСВ компостируют с твердыми органическими наполнителями (торфом, опилками, бытовыми и промышленными отходами). Обязательным условием применения ОСВ и компостов в качестве удобрения является соблюдение требований охраны окружающей среды. Их используют на ровных участках, не подверженных водной эрозии, с уровнем грунтовых вод не выше 40 см от поверхности почвы. При внесении

удобрений на мелиорированных площадях вдоль магистральных каналов следует оставлять защитные полосы шириной не менее 30 м.

Дополнительным источником пополнения ресурсов органических удобрений являются твердые бытовые отходы (ТБО). Для использования их в сельском хозяйстве ТБО компостируют на мусороперерабатывающих заводах, однако в настоящее время этой переработке подвергается около 3 % их общего количества, образующегося в стране (приблизительно 1,5 млн.т).

Значительным ресурсом органического вещества являются древесные отходы (кора, опилки, щепа), в больших количествах скапливающиеся в зоне деятельности деревообрабатывающих комбинатов. По подсчетам специалистов, запасы этих отходов достигают 20...30 млн.т в год, а используется из них не более 10 %.

Кора содержит более 85 % органических соединений, 40 % которых относится к легкоразлагаемым. Они обогащают почву углеродом, стимулируют ее биологическую активность. Прочность, упругость, высокая фильтрационная способность коры улучшают водно-физические свойства почвы, а ее трудноразлагаемая часть обогащает почву лигнином и дубильными веществами, необходимыми для гумусообразования. Кору деревьев, опилки и другие древесные отходы применяют для мульчирования почвы, приготовления искусственного грунта для теплично-парниковых хозяйств, как подстилку на птицефермах и птицефабриках с последующим использованием в качестве удобрения. Кора широко используется для приготовления различных компостов с минеральными и органическими удобрениями. К измельченной коре, предназначенной для компостирования, предъявляются определенные требования:

| Показатель   | Норма          |
|--|----------------|
| Влажность, %, (по массе)   | 65...75        |
| Примесь древесины, не более, % (по массе)  | 15             |
| Содержание частиц размером более 10 мм, но не свыше 40 мм, не более, % (по массе)                  | 40             |
| Загрязнение минеральными маслами, мазутом, пропиточными веществами, наличие металлических примесей | не допускается |

Для приготовления компостов используют подстилочный и бесподстилочный навоз, птичий помет; их соотношение с корой зависит от влажности исходных компонентов и колеблется от 1:1 до 2:1 соответственно.

Древесная кора является хорошим субстратом для компостирования с активным илом из биоотстойников очистных

сооружений, который имеет щелочную реакцию и богат соединениями азота. Для ускорения процесса компостирования и обогащения компоста элементами питания растений в его состав вводят минеральные удобрения, в первую очередь азотные, причем целесообразно использовать удобрения, содержащие азот в аммонийной форме (карбамид, аммиак), так как в этом случае нейтрализуется кислотность коры. Готовый компост должен удовлетворять следующим требованиям:

| Показатель                               | Норма                                     |
|--|---|
| Влажность, %:                            |   |
| – оптимальная                            | 65  |
| – максимальная                           | 75  |
| Кислотность (рН), не ниже                | 6,0...6,5                                 |
| Содержание в сухом остатке, не менее, %: |   |
| – азота                                  | 1,0...1,2                                 |
| – фосфора                                | 1,5                                       |
| – калия                                  | 0,4                                       |
| Отношение С : N, не более                | 40 : 1                                    |
| Внешний вид                              | рассыпчатая масса темно-коричневого цвета |

В зависимости от типа коры и степени измельчения частицы компоста содержат 55...85 % органических веществ, имеют плотность 0,18...0,30 г/см<sup>3</sup>, комковатую структуру и влагоемкость 250...350 г воды на 100 г сухого вещества. Благодаря высокому содержанию кальция компосты из коры могут стать эффективными мелиорантами: они не только улучшают рост растений, уменьшают их заболеваемость корневой гнилью, но и почти полностью подавляют развитие нематод.

Древесную кору использовали для обогащения почвы органическим веществом и без компостирования, запахиванием на небольшую глубину. Внесение в опытах измельченной коры дозой 125 м<sup>3</sup>/га улучшало структуру почвы, повышало ее влагоемкость. Период разложения в почве коры хвойных пород, измельченных до размеров около 5 см, достигает двух лет. Однако при использовании некомпостированной коры необходимо одновременное внесение в почву азотных удобрений, так как при высоком содержании углерода кора содержит мало азота, необходимого для нормальной жизнедеятельности микроорганизмов, способствующих ее разложению.

Аналогичное применение могут найти в сельском хозяйстве опилки. Все виды опилок улучшают физические свойства почв, повышают их порозность и водоудерживающую способность, снижают плотность тяжелых глинистых почв. Как и древесная кора, опилки

содержат мало азота и их целесообразно применять совместно с азотными удобрениями.

В России проводятся многочисленные исследования в области утилизации в сельском хозяйстве избыточного гидролизного ила и других отходов гидролизных и целлюлозно-бумажных заводов. После нескольких лет хранения в отвалах гидролизный ил превращается в рыхлую пористую массу темно-бурого цвета, по виду напоминающую перегной.

Гидролизный ил является ценным органическим удобрением. Он содержит более 77 % органического вещества, до 3,8 % азота, в том числе 1,6 % в легкогидролизуемых формах, до 1,1 % подвижного фосфора и до 0,3 % калия. Кроме этих, основных, элементов питания растений гидролизный ил содержит 10...18 % кальция, серу, железо, магний, ряд микроэлементов, необходимых растениям, физиологически активные вещества (витамины, ферменты). При внесении его в почву активизируется ее микробиологическая и ферментативная деятельность, улучшается азотно-фосфорный режим.

Внесение гидролизного ила в количестве 30 т/га с добавлением калийных удобрений повышало в опытах урожай клубней картофеля на 30...80 %, а нарастание сухой массы клевера увеличивалось в 2,5 раза по сравнению с использованием полного минерального удобрения. Применение гидролизного ила существенно повышало продуктивность естественных кормовых угодий.

Гидролизный ил и другие отходы целлюлозно-бумажной промышленности могут быть использованы и в форме компостов с другими органическими и минеральными удобрениями.

Не менее ценным органическим удобрением является другой крупнотоннажный отход гидролизного производства – лигнин, который представляет собой твердый остаток, образующийся после обработки древесины серной кислотой. В его состав входят лигнин древесины, полисахариды, не смытые после гидролиза, моносахариды, минеральные и органические кислоты, зольные элементы и некоторые другие соединения.

Внесенный в почву в чистом виде лигнин оказывает угнетающее действие на многие сельскохозяйственные культуры и снижает их урожайность. Предложены различные технологии его доработки с целью использования в качестве удобрения, в том числе компостирование лигнина с минеральными удобрениями и обработка аммиачной водой. Так, для получения 100 т компоста в 94...95 т лигнина с влажностью 60...65 % добавляется 4 т фосфоритной муки и 1...1,2 т хлорида калия, причем соотношение компонентов может изменяться в зависимости от агрохимических характеристик почвы и потребностей

возделываемой культуры. Перед внесением в почву компост обрабатывают 25%-ным водным раствором аммиака из расчета 2,5 т на 100 т компоста. Полевые испытания лигниновых компостов показали их высокую эффективность: при внесении дозой 30 т/га прибавка урожая картофеля составила 22 ц/га, зерна озимой ржи – 4,2 ц/га. Внесение под посевы хлопчатника 2...5 т/га лигнина, обработанного аммиачной водой, ускоряет цветение и плодообразование растений и повышает урожай на 15...20 %. Для компостирования лигнина, наряду с минеральными удобрениями, используют помет и подстилочный и бесподстилочный навоз.

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Что такое почвенный поглощающий комплекс?
2. Что представляют собой промышленные отходы для мелиорации кислых почв?
3. Какие соединения и материалы входят в состав промышленных отходов для мелиорации солонцовых почв?
4. Охарактеризуйте промышленные и бытовые отходы, используемые в качестве органических удобрений.



### **3.4. Рекультивация земель, нарушенных промышленностью**

Перечисленные пути утилизации и переработки отвалов добычи и отходов обогащения полезных ископаемых в значительной степени способствуют их ликвидации, однако на основе только такого рода мероприятий проблема может быть решена лишь частично, так как масштабы этих отходов огромны. Поэтому в нашей стране проводятся работы, связанные с ликвидацией отвалов или их вредного действия на окружающую среду, и по ряду других направлений. В частности, с 1962 г. ведутся работы по рекультивации земель, нарушенных открытыми горными разработками.

Рекультивация – это комплекс работ, направленных на воспроизводство и улучшение (а порой и совершенно новое моделирование) всего нарушенного природно-территориального комплекса в целом. В процессе рекультивации различают два основных этапа: горнотехнический и биологический. Задачей первого этапа является подготовка территорий (планировка отвалов, придание

откосам нужной формы, покрытие их плодородными грунтами и т. п.) для последующего освоения. Второй этап охватывает мероприятия по восстановлению плодородия нарушенных земель и созданию благоприятных для жизнедеятельности человека ландшафтов.

Нарушенные земли – это земли, утратившие свою хозяйственную ценность или являющиеся источником негативного воздействия на окружающую среду в связи с изменением рельефа, почвенного покрова, гидрологического режима в результате деятельности горнодобывающей или других отраслей промышленности.

В России и странах ближнего Зарубежья площади нарушенных земель достигают 2 млн. га, в том числе добычей торфа – 900 тыс.га, цветных металлов – 520, нерудных ископаемых – 280, каменного и бурого угля – 110, химического сырья – 60, железной и марганцевой руд – 60 тыс.га и т. д. По современным оценкам зона вредного воздействия горнопромышленных разработок (с учетом загрязнения атмосферы, природных вод, почвенного покрова и растительности) примерно на порядок больше территории горного отвода.

Горные работы – далеко не единственная причина возникновения нарушенных земель. Немало их появляется в результате прокладки транспортных магистралей, трубопроводов, линий электропередач, что всегда сопровождается ухудшением качества почвенного покрова и растительности прилегающих территорий, а зачастую и вырубкой больших массивов лесов. Так, строительство 1 км дороги при ширине просеки 10...15 м требует вырубки леса на площади 1...1,5 га. Широко используемая на севере бездорожная транспортировка грузов на самоходных установках уже привела к массовому нарушению и даже уничтожению почвенного и растительного покрова тундры. В зоне пустынь и полупустынь нарушенные земли возникают при бездорожной транспортировке нефтяных вышек и проведении геологоразведочных работ.

К концу XX столетия более чем на половине поверхности суши Земли естественные ландшафты сменились антропогенными, среди которых можно выделить агроландшафты (полевые и пастбищные), ландшафты лесохозяйственные, горнопромышленные, селитебные (сельские и городские) и рекреационные. Наиболее глубокие изменения природных ландшафтов происходят в районах горных работ.

В горнодобывающей промышленности наиболее прогрессивным является открытый способ добычи полезных ископаемых, при котором производительность труда в 5...6 раз выше, а себестоимость продукции в 2...3 раза ниже, чем при подземных разработках. Но именно ведение открытых горных работ является наиболее «землеемким» и сопровождается наиболее существенными изменениями ландшафта

и гидрогеологических условий района разработок и нарушением почвенного покрова на значительных территориях. Таким образом, прогресс горного дела оборачивается резким уменьшением площади биологически продуктивных земель и опасными нарушениями экологического равновесия. При проведении горных работ происходит коренное изменение литогенной основы ландшафта и связанные с ним изменения направления и скорости протекания всех химических процессов, что нередко приводит к извлечению на поверхность и образованию токсичных соединений. Масштабы этих явлений настолько велики, что в науке сформировалось представление о техногенном неорельефе. Его формы определяются применением того или иного вида вскрышных работ и способами перемещения извлеченной на поверхность земли породы. Выделяют два основных типа неорельефа: положительный (аккумулятивный), к которому относятся отвалы, терриконы, насыпные и намывные поверхности, и отрицательный (выработанный) – шахты, карьеры, разрезы, выработки и т. д. Линейные размеры этих новых форм рельефа бывают довольно значительными: их высота нередко достигает 50...80 м, протяженность – 1,5...2 км. В зоне формирования неорельефа возникают эрозионные денудационные и стоковые процессы, за счет которых протекает загрязнение и заиливание водоемов.

При современной технике глубина карьеров достигает 500 м, ширина карьерного поля – до 5 км, для размещения горных пород, отсыпаемых в отвалы, требуются тысячи гектаров. При такой глубине выработок неизбежны серьезные нарушения гидрологического режима, приводящие к истощению подземных и поверхностных вод.

Горнопромышленные ландшафты характеризуются высокой степенью загрязнения почвенного покрова, природных вод и атмосферы продуктами выветривания горных пород, промышленными выбросами, газами горящих отвалов и терриконов.

Закрытые (шахтные) разработки полезных ископаемых часто приводят к опусканиям земной поверхности на 6...7 м (иногда на больших площадях), что приводит к разрушению зданий, коммуникаций и вызывает необходимость перемещения целых населенных пунктов на новые места. Эти явления характерны для Донбасса и Кузбасса, а за рубежом имели место в Верхнесилезском каменноугольном бассейне и в центральных районах Англии.

В табл.3.1 приведена классификация техногенных нарушений природной среды при горных работах.

Быстрый рост и расширение масштабов горных разработок, сопровождающиеся отчуждением земельных угодий, разрушением естественных ландшафтов и загрязнением природной сферы, остро

ставят вопрос о необходимости рекультивации – восстановления благоприятных природных свойств территории, где завершены горные работы.

Рекультивация ландшафта включает комплекс горнотехнических, мелиоративных, сельскохозяйственных или лесохозяйственных и инженерно-строительных работ. На первом – горнотехническом – этапе осуществляется восстановление первоначального рельефа и подготовка территории к последующей биологической рекультивации, предусматривающей работы по восстановлению почвенного покрова и растительности.

Таблица 3.1

Классификация техногенных нарушений природной среды при горных разработках

| Вид                     | Тип  | Группа  |
|-------------------------|--|---|
| 1                       | 2  | 3   |
| Ландшафтные нарушения   | Выработанные пространства и провалы                    | 1. Котлованы карьеров   |
|                         |  | 2. Траншеи и выработки последних заходок  |
|                         |  | 3. Провалы от подземных работ   |
|                         |  | 4. Нагорные канавы  |
|                         | Отвалыные площади                                      | 1. Внутренние и внешние породные отвалы, сложенные из грунтов с благоприятными физико-механическими и агробиологическими свойствами |
|                         |  | 2. То же, гидроотвалы и хвостохранилища   |
|                         |  | 3. То же с неблагоприятными свойствами пород  |
|                         | Земельные участки под промышленными объектами          | 1. Здания и сооружения  |
|                         |  | 2. Внутризаводские дороги, ЛЭП и другие инженерные сети и коммуникации  |
| Экологические нарушения | Изменение гидрогеологических условий района разработки | 1. Обезвоживание территорий   |
|                         |  | 2. Закисление поверхностных и грунтовых вод   |



Окончание табл. 3.1

| 1 | 2   | 3  |
|---|---|--|
|   | Загрязнение прилегающих территорий, воздушного и водяного бассейнов | 1. Эрозия, выветривание, размыв породных отвалов                     |
|   |   | 2. Пыление при отвалообразовании                                     |
|   |   | 3. Горение породных отвалов  |
|   |   | 4. Газопылевое загрязнение при взрывных работах                      |
|   |   | 5. Загрязнение при бурении, погрузочно-транспортных и других работах |
|   | Сейсмические нарушения  | Разломы и подвижки при взрывных работах и горных ударах              |

Методы рекультивации зависят от состава вскрышных пород, технологии ведения горных работ, природных условий местности. Как правило, земли, изъятые у сельского хозяйства, восстанавливаются под сельскохозяйственные угодья. В густонаселенных промышленных районах, где дефицит пахотных земель особенно ошутим, предпочтение также отдается сельскохозяйственному или рекреационному восстановлению рекультивируемых территорий. Однако для возвращения нарушенных земель в сельское хозяйство необходим анализ химического состава и свойств пород вскрышки и их агрономическая оценка. Результаты такого исследования позволяют проектировать работы таким образом, чтобы избежать вынесения бесплодных или фитотоксичных пород в верхние слои отвалов, предусмотреть их селективную вскрышку с последующим захоронением на 1...3 м под породами с более благоприятными свойствами. При рекультивации территорий старых горных выработок необходима столь же тщательная агрохимическая оценка плодородия пород, составляющих отвалы.

Перед началом вскрышных работ организуют отбор проб почвы и почвообразующих пород, выполняют их химический анализ и агрономические исследования, выбирая вид будущего освоения этих земель. Слой плодородной почвы, не смешивая его с породами вскрышки, снимают с площади, подготавливаемой к разработке, обеспечивая продвижение фронта работ не более чем на один год. Если снятую почву нельзя сразу же нанести на заранее выбранные участки, расположенные на ровных, возвышенных и сухих местах, укладывают там в бурты высотой 5...10 м и засевают одно- или многолетними травами во избежание эрозии.

При оптимальной организации рекультивационных работ гумусный слой почвы не складировать, а сразу наносят на спланированную бульдозерами поверхность отработанного участка рудника или карьера. Свежие отвалы легче поддаются планировке, дают равномерную осадку и практически в течение одного года отрабатываются и возвращаются в сельское хозяйство. После 3...6 месяцев интенсивной усадки проводится повторная планировка участка и начинается его биологическое освоение.

Биологическая рекультивация направлена на создание на рекультивируемом участке почвенного профиля и повышение его плодородия. В пределах искусственно насыпаемого или намываемого слоя должен быть сформирован корнеобитаемый горизонт, мощность которого зависит от назначения участка: для зерновых культур и многолетних трав он должен быть не менее 0,8 м, для плодовых культур – 1,5...2 м.

Корнеобитаемый слой рекомендуется формировать из почвенной массы и лёссовидных карбонатных суглинков, причем мощность собственно гумусового слоя может колебаться от 0,3 до 0,8 м, что зависит главным образом от наличия плодородных почв. Нижняя часть корнеобитаемого слоя формируется из грунтов с благоприятными водно-физическими свойствами.

В случае крайне неблагоприятных агрометеорологических показателей вскрышных пород (повышенного содержания фитотоксичных солей, очень низкого или очень высокого значения  $pH$  и т. п.) перед нанесением плодородного слоя проводят коренную химическую мелиорацию подготовленного участка. При такой постановке работ карьер из года в год перемещается над рудным телом, оставляя после себя не бросовые земли, а полностью восстановленные сельскохозяйственные угодья.

Гораздо меньших затрат требует лесная рекультивация. Она может осуществляться на токсичных грунтах и в неблагоприятных условиях рельефа и потому имеет гораздо большее распространение. Она имеет почво- и водоохранную, а также рекреационную направленность. На местах старых карьеров проводится водная рекультивация, т. е. создаются водоемы для образования резервов промышленной или питьевой воды и организации рекреационных центров и зон. В нашей стране считается оптимальным соотношение площадей, восстанавливаемых под лес и пашню, равное 3:2. Четко разграничить методы и цели отдельных видов рекультивации практически невозможно, обычно они сочетаются на одной и той же территории. Так, откосы отвалов обычно отводятся под облесение, на распланированной поверхности внутренних отвалов после

формирования почвенного слоя восстанавливаются пахотные земли, а карьеры и выемки затопляются водой.

При правильно выбранной технологии полное возвращение многих нарушенных земель в хозяйственную деятельность осуществляется за 4...5 лет. В настоящее время площадь рекультивированных земель в России составляет около трети общей площади нарушенных. Масштабы рекультивации земель быстро растут. В 1971...1975 гг. было восстановлено 180 тыс.га земель, в 1976...1980 гг. – более 500, в 1981...1984 гг. – 594, а в 1986...1990 гг. – около 600 тыс.га нарушенных земель.

---

---

### **Вопросы для самоконтроля**

---

---

1. Что такое рекультивация?
2. Что представляют собой земли, нарушенные промышленностью?
3. Дайте характеристику основных этапов рекультивации нарушенных земель.
4. Приведите классификацию техногенных нарушений природной среды при горных разработках.
5. Что собой представляет комплекс горнотехнических рекультивационных работ?
6. В чем заключается биологическая рекультивация нарушенных земель?
7. В чем состоят цели и сущность лесной рекультивации?



---

---

### **Заключение**

---

---

Исторически сложилось так, что, преследуя определенные цели: добычу ресурсов, изготовление продуктов, прокладки дорог – люди старались выполнить только конкретную задачу, не задумываясь об экологических последствиях, оказываемых при этом на окружающую среду. Такой подход годился для производства создаваемых человеком материальных благ. И пока народонаселение и масштабы производства были малы по сравнению с размерами Земли, экологические последствия воспринимались как приемлемый компромисс.

Однако развитие мирового общественного производства идет все ускоряющимися темпами, и размеры ущерба, наносимого окружающей

среде, увеличиваются при этом так, что их уже невозможно, как раньше, преодолеть естественным путем, без использования глубоко продуманного комплекса законодательных и технологических мероприятий, затрагивающих все сферы производственной деятельности человека.

Загрязнения окружающей среды является серьезной проблемой для всех стран мира. По мере роста народонаселения и масштабов производства экологические последствия становятся все более серьезными и распространенными, а нетронутые природные пространства непрерывно сокращаются. Становится ясно, что снижение качества окружающей среды уже нельзя считать приемлемым компромиссом.

Экологические проблемы настолько обострились, что без их учета нельзя не только решать политические и экономические задачи, но и получить представление о тенденциях социального развития человечества. Все это не может не оказывать отрицательного воздействия на здоровье человека.

В связи с этим необходимо внедрение технологических процессов, дающих минимальные выбросы, при которых самоочищающаяся способность природы в достаточной степени будет препятствовать возникновению необратимых экологических изменений, а также технологий очистки пылегазовых выбросов, жидких сбросов, утилизации и переработки твердых отходов, уменьшающих или исключаящих вредное воздействие на окружающую среду.

## Приложение

### 1. Предельно допустимые концентрации некоторых вредных веществ в атмосферном воздухе

| Вещество  | ПДК, г/м <sup>3</sup> |                |
|---|-----------------------|----------------|
|   | максимально-разовая   | среднесуточная |
| 1   | 2                     | 3              |
| Азота диоксид   | 0,085                 | 0,085          |
| Азотная кислота   | 0,4                   | 0,4            |
| Аммиак  | 0,2                   | 0,2            |
| Анилин  | 0,05                  | 0,03           |
| Ацетон  | 0,35                  | 0,35           |
| Бензол  | 1,5                   | 0,8            |
| Бензин (нефтяной, малосернистый, в пересчете на С)  | 5                     | 1,5            |
| Бутан   | 200                   | –              |
| Бутилацетат   | 0,1                   | 0,1            |
| Винилацетат   | 0,15                  | 0,15           |
| Гексахлорциклогексан  | 0,03                  | 0,03           |
| Дивинил   | 3                     | 1              |
| Диметиланилин   | 0,0055                | 0,0055         |
| Дихлорэтан  | 3                     | 1              |
| Изопропилбензол   | 0,14                  | 0,14           |
| Капролактан (пары, аэрозоль)  | 0,06                  | 0,06           |
| Карбофос  | 0,015                 | –              |
| Ксилол  | 0,2                   | 0,2            |
| Масляная кислота  | 0,015                 | 0,01           |
| Метанол   | 1                     | 0,5            |
| Метафос   | 0,008                 | –              |
| Метилацетат   | 0,07                  | 0,07           |
| Метилмеркаптан  | 9•10 <sup>-6</sup>    | –              |
| Мышьяк (неорганические соединения, кроме Н <sub>3</sub> As, в пересчете на As)                      | –                     | 0,003          |
| Нафталин  | 0,003                 | 0,003          |
| Нитробензол   | 0,008                 | 0,008          |
| Нитрохлорбензол ( <i>пара</i> - и <i>орто</i> -)  | –                     | 0,004          |
| Пиридин   | 0,08                  | 0,08           |
| Пропиловый спирт  | 0,3                   | 0,3            |
| Пыль нетоксичная  | 0,5                   | 0,15           |
| Ртуть металлическая   | –                     | 0,0003         |
| Сажа (копоть)   | 0,15                  | 0,05           |
| Свинец и его соединения (кроме Pb(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> , в пересчете на Pb) | –                     | 0,0007         |
| Свинца сульфид  | –                     | 0,0017         |
| Серная кислота  | 0,3                   | 0,1            |

Окончание таблицы

| 1  | 2     | 3     |
|--|-------|-------|
| Диоксид серы   | 0,5   | 0,05  |
| Сероводород  | 0,008 | 0,008 |
| Сероуглерод  | 0,03  | 0,005 |
| Синильная кислота                                      | –     | 0,01  |
| Соляная кислота  | 0,2   | 0,2   |
| Стирол   | 0,003 | 0,003 |
| Толуол   | 0,6   | 0,6   |
| Триэтиламин  | 0,14  | 0,14  |
| Углерода оксид   | 3     | 1     |
| Углерода тетрахлорид                                   | 4     | 2     |
| Уксусная кислота                                       | 0,2   | 0,06  |
| Уксусный ангидрид                                      | 0,1   | 0,03  |
| Фенол  | 0,01  | 0,01  |
| Формальдегид   | 0,035 | 0,012 |
| Фосфора (V) оксид                                      | 0,15  | 0,05  |
| Фториды (в пересчете на F)                             | 0,02  | 0,005 |
| Фтора газообразные соединения (HF и SiF <sub>4</sub> ) | 0,02  | 0,005 |
| Фурфурол   | 0,05  | 0,05  |
| Хлор   | 0,1   | 0,03  |
| Хлорбензол   | 0,1   | 0,1   |
| Хлорофос   | 0,04  | 0,02  |
| Циклогексан  | 1,4   | 1,4   |
| Этанол   | 5     | 5     |
| Этилбензол   | 0,02  | 0,02  |
| Этилен   | 0,3   | 0,03  |

## 2. Предельно допустимые концентрации некоторых технических композиций в воздухе

| Технические вещества                        | Предельно допустимые концентрации, мг/м <sup>3</sup> :<br>ПДК <sub>р.з.</sub> – (1), ПДК <sub>м.р.</sub> – (2),<br>ПДК <sub>с.с.</sub> – (3) | Технические вещества             | Предельно допустимые концентрации, мг/м <sup>3</sup> :<br>ПДК <sub>р.з.</sub> – (1), ПДК <sub>м.р.</sub> – (2),<br>ПДК <sub>с.с.</sub> – (3) |
|---|--|----------------------------------|--|
| 1   | 2  | 3                                | 4  |
| Бензин:                                     |  | Воск                             | 300(1)   |
| газовый                                     | 100(1)   | буроугольный                     | 300(1)   |
| буроугольный                                | 1,0(3)   | Керосин, в пересчете на углерод  | 300(1)   |
| нефтяной                                    | 5,0 (2)  | Лигроин, в пересчете на углерод  | 300(1)   |
| малосернистый, в пересчете на углерод       | 1.5(3)   | Масла нефтяные                   | 5(1)   |
| Бензин-растворитель, в пересчете на углерод | 300(1)   | Скипидар, в пересчете на углерод | 300(1)   |

| 1  | 2       | 3                          | 4       |
|--|---------|----------------------------|---------|
| Масла эфирные                              | 5(1)    | Смола<br>полукоксования    | 5(1)    |
| Масло мине-<br>ральное белое               | 5(1)    | Сольвент-нафта             | 100(1)  |
| Петролейные<br>газы сжиженные              | 1800(1) | Эпоксидная<br>смола (Э-18) | 0,5 (1) |
| Сероводород в<br>смеси с<br>углеводородами | 3(1)    |                            |         |

### 3. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования

| Вещества                       | ЛПВ, мг/л | ПДК, мг/л |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| 1                              | 2         | 3         |
| Алюминий                       | ст        | 0,5       |
| Алюминия оксихлорид            | орг       | 1,5       |
| Аммиак (по азоту)              | ст        | 2         |
| Анилин                         | ст        | 0,1       |
| Ацетон                         | общ       | 2,2       |
| Ацетофенон                     | ст        | 0,1       |
| Бензапирен                     | ст        | 0,000005  |
| Бензин                         | орг       | 0,1       |
| Бензол                         | ст        | 0,5       |
| Бериллий                       | ст        | 0,0002    |
| Бор                            | ст        | 0,5       |
| Бром                           | ст        | 0,2       |
| Висмут                         | ст        | 0,1       |
| Гексахлорбензол                | ст        | 0,05      |
| Диметиламин                    | ст        | 0,1       |
| Дифторхлорметан (фреон)        | ст        | 10        |
| Диэтиловый эфир                | орг       | 0,3       |
| Железо                         | ст        | 0,3       |
| Изопрен                        | ст        | 0,005     |
| Кадмий                         | ст        | 0,001     |
| Карбофос                       | орг       | 0,05      |
| Керосин:                       |           |           |
| окисленный                     | орг       | 0,01      |
| осветительный (ГОСТ 4753 – 68) | ст        | 0,05      |
| технический                    | ст        | 0,001     |
| Кислота:                       |           |           |
| бензойная                      | общ       | 0,6       |
| дифенилуксусная                | общ       | 0,5       |
| масляная                       | общ       | 0,7       |
| муравьиная                     | общ       | 3,5       |
| уксусная                       | общ       | 1,2       |

| 1  | 2   | 3          |
|--|-----|------------|
| Кислоты жирные синтетические C <sub>5</sub> –C <sub>20</sub> | общ | 0,1        |
| Марганец   | орг | 0,1        |
| Медь   | орг | 1          |
| Метанол  | ст  | 3          |
| Молибден   | ст  | 0,25       |
| Вещества »   | лпв | пдк        |
| Мочевина   | общ | 1          |
| Нафтали»   | орг | 0,01       |
| Нефть:   |     |            |
| многосернистая   | орг | 0,1        |
| прочая   | орг | 0,3        |
| Нитраты по:  |     |            |
| NO <sub>3</sub>  | ст  | 45         |
| NO <sub>2</sub>  | ст  | 3,3        |
| Полиэтиленамин   | ст  | 0,1        |
| Тиоцианаты   | ст  | 0,1        |
| Ртуть  | ст  | 0,0005     |
| Свинец   | ст  | 0,03       |
| Сероуглерод  | орг | 1          |
| Скипидар   | орг | 0,2        |
| Сульфиды   | общ | отсутствие |
| Тетраэтилсвинец  | ст  | отсутствие |
| Трибутилфосфат   | орг | 0,01       |
| Формальдегид   | ст  | 0,05       |
| Фосфор элементный  | ст  | 0,0001     |
| Цианиды в расчете на циан                                    | ст  | 0,1        |
| Цинк   | общ | 1          |
| Этилен   | орг | 0,5        |
| Этиленгликоль  | ст  | 1          |
| Этилендиамин   | орг | 0,2        |

#### 4. Предельно допустимые концентрации химических веществ в почве

| Вещество         | ПДК почвы,<br>мг/кг | Вещество                 | ПДК почвы,<br>мг/кг |
|------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| 1                | 2                   | 3                        | 4                   |
| Агелон           | 0,01                | Малолетучие эфиры группы | 0,15                |
| Акрекс           | 1,0                 | 2,4-Д                    |                     |
| Актеллик         | 0,1                 | 2М-4ХП                   | 0,4                 |
| Альфаметилстирол | 0,5                 | 2М-4ХМ                   | 0,6                 |
| Атразин          | 0,01                | Децис                    | 0,01                |
| Ацетальдегид     | 10,0                | Дилор                    | 0,5                 |
| Базудин          | 0,1                 | Диурон                   | 0,5                 |
| Байфидан         | 0,02                | Дурсбан                  | 0,2                 |
| Банвел Д         | 0,25                | Зенкор                   | 0,2                 |
| Бензпирен        | 0,02                | Изатрин                  | 0,05                |
| Бензин           | 0,1                 | Изопропилбензол          | 0,5                 |



Продолжение табл. 4

| 1                                     | 2            | 3   | 4     |
|---------------------------------------|--------------|---|-------|
| Бензол                                | 0,3          | Изопропилбензол + $\alpha$ -метилстирол                                     | 0,5   |
| Бетанол                               | 0,25         | Иодофенфос  | 0,5   |
| Валексои                              | 1,0          | Карбофос  | 2,0   |
| Ванадий                               | 150,0        | Кельтан   | 1,0   |
| Ванадий + марганец                    | 100,0+1000,0 | Комплексные гранулированные удобрения (КГУ) состава N : P : K – 64 : 0 : 15 | 120,0 |
| $\gamma$ -ГХЦГ (линдан)               | 0,1          | Комплексные жидкие удобрения (КЖУ) состава N : P : K – 10 : 34 : 0          | 80,0  |
| ГХЦГ (гексахлоран)                    | 0,1          | Ксилолы ( <i>орто-мета-пара</i> )   | 0,3   |
| ГХБД (гексахлорбутадиен)              | 0,5          | Купроцин  | 1,0   |
| Гептахлор                             | 0,05         | Линурон   | 1,0   |
| Гетерофос                             | 0,05         | Мезоранил   | 0,1   |
| Глифосат Делапон                      | 0,5 0,5      | Метатион  | 0,1   |
| 2,4-Д (дихлорфеноксисукусная кислота) | 0,1          | Метафос   | 0,1   |
| 2,4-Д (дихлофенол)                    | 0,05         | Мирал   | 0,03  |
| 2,4-Д (аминная соль)                  | 0,25         | Монурон   | 0,3   |
| Бутиловый эфир группы 2,4-Д           | 0,15         | Мышьяк  | 2,0   |
| Кротиловый эфир группы 2,4-Д          | 0,15         | Нитраты   | 130,0 |
| Октиловый эфир группы 2,4-Д           | 0,15         | Хлорамп   | 0,05  |
| Отходы флотации угля (ОФУ)            | 3000,0       | Циклофос  | 0,03  |
| Пиримор                               | 0,3          | Цинеб   | 0,2   |
| Политриазин                           | 0,01         | Энтам   | 0,9   |
| Полихлоркамфен                        | 0,5          | ПОДВИЖНЫЕ ФОРМЫ   |       |
| Полихлорпинен                         | 0,5          | Кобальт   | 5,0   |
| Прометрин                             | 0,5          | Марганец, извлеченный   |       |
| Пропазин                              | 0,05         | 0,1 н H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  |       |
| Пропанид                              | 1,5          | Чернозем  | 700,0 |
| Ридомил                               | 0,05         | Дерново-подзолистые   |       |
| Ринкорд                               | 0,02         | Почвы:  |       |
| Ронит                                 | 0,8          | pH 4,0  | 300,0 |
| Свинец                                | 32,0         | pH 5,1–6,0  | 400,0 |
| Севин                                 | 0,05         | pH > 6,0  | 500,0 |
| Семерон                               | 0,1          | Извлекаемый ацетатноаммонийным буферным pH 4,8                              | 140   |
| Элементарная сера                     | 160,0        | чернозем  |       |
| Сероводород                           | 0,4          | Дерново- подзолистые почвы:   |       |
| Серная кислота                        | 160,0        | pH 4,0  | 60,0  |
| Симазин                               | 0,01         | pH 5,1–6,0  | 80,0  |
| Сумицидин                             | 0,02         | pH > 6,0  | 100,0 |
| Стирол                                | 0,1          | Медь  | 3,0   |
| Суперфосфат                           | 200,0        | Никель  | 4,0   |
| Сурьма                                | 4,5          | Свинец  | 6,0   |
| Толуол                                | 0,3          |   |       |

Окончание табл. 4

| 1            | 2     | 3                     | 4    |
|--------------|-------|-----------------------|------|
| Фенурон      | 1,8   | Цинк                  | 23,0 |
| Фозалон      | 0,5   | Фтор                  | 2,0  |
| Фосфамид     | 0,3   | Хром                  | 6,0  |
| Формальдегид | 7,0   |                       |      |
| Фталофос     | 0,1   | ВОДОРАСТВОРИМАЯ ФОРМА |      |
| Фурадан      | 0,01, |                       |      |
| Хлорид калия | 560,0 | Фтор                  | 10,0 |
| Хлорофос     | 0,5   |                       |      |

## Литература

---

---

1. Ляпков А.А. Технология производств очистки промышленных выбросов. – Томск: 2002. – 254 с.
2. Родионов А.И., Клушин В.Н. Техника защиты окружающей среды. – М.: Химия, 2002. – 512 с.
3. Родионов А.И., Клушин В.Н., Систер В.Г. Технологические процессы экологической безопасности: Учебник для студентов технических и технологических специальностей. 3-е изд., перераб. и доп. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2000. — 800 с.
4. Родионов А.И., Кузнецов Ю.П., Соловьев Г.С. Защита биосферы от промышленных выбросов. Основы проектирования технологических процессов. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 392 с.
5. Инженерная защита окружающей среды в примерах и задачах./ Под ред. Воробьева О.Г. – СПб: День, 2002. – 220 с.
6. Акимова Т.А., Кузьмин А.П., Хаскин В.В. Экология, Природа-Человек-Техника. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 384 с.
7. Фридман С.В., Стрельцова Н.Р. Защита окружающей среды. – Казань: 2001. – 370 с.
8. Ливчак И.Ф. Инженерная защита и управление развитием окружающей среды. – М.: Колос, 2000. – 420 с.
9. Кривошеин Д.А., Кукин П.П. Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков. – М.: Высшая школа, 2003. – 344 с.
10. Инженерная защита окружающей среды; очистка вод; утилизация отходов. / Под ред. Ю.А. Бирмана, Н.Г. Вурдовой. – М.: АСВ, 2002 – 296 с.
11. Кузнецов И.Е., Троицкая Т.М. Защита воздушного бассейна от загрязнений вредными веществами химических предприятий. – М.: Химия, 1979. – 344 с.
12. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
13. Кельцев И.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 592с.
14. Очистка технологических газов. /Под ред. Т.А.Семеновой и И.Л.Лейтеса – М: Химия, 1977. – 486 с.
15. Справочник по пыле- и золоулавливанию. /Под ред. А.А.Русанова – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
16. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
17. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1985. – 392 с.

18. Эльтерман В.М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях. – М.: Химия, 1985. – 160 с.
19. Лукин В.Д., Курочкина М.И. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1980. – 232 с.
20. Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. – М.: Химия, 1991. – 256 с.
21. Оборудование и сооружения для защиты биосферы от промышленных выбросов. – М.: Химия, 1985. – 352 с.
22. Очистка и рекуперация промышленных выбросов./Под ред. В.Ф.Максимова и И.В.Вольфа – М.:Лесная промышленность,1981.– 640 с.
23. Власенко В.М. Каталитическая очистка газов. – Киев: Техника, 1973. – 199 с.
24. Хмыров В.И., Фисак В.И. Термическое обезвреживание промышленных газовых выбросов. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 116 с.
25. Львович А.И. Защита вод от загрязнения. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 168 с.
26. Аширов А. Ионнообменная очистка сточных вод, растворов и газов. – Л.: Химия, 1983. – 295 с.
27. Жуков А.И., Монгайт КЛ., Родзиллер И.Л. Методы очистки производственных сточных вод. – М.: Стройиздат, 1977. – 204 с.
28. Ковалева И.Г., Ковалев В.Г. Биохимическая очистка сточных вод предприятий химической промышленности. – М.: Химия, 1987. – 160 с.
29. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М. и др. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении. – М.: Химия, 1983. – 288с.
30. Пономарев В.Г., Иоакимис Э.Г., Монгайт И.Л. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов. – М.: Химия, 1985. – 256 с.
31. Проскуряков В.А., Шмидт Л.И. Очистка сточных вод в химической промышленности. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
32. Шурыгин А.П., Бернадинер М.Н. Огневое обезвреживание промышленных сточных вод. – Киев: Техника, 1976. – 200 с.
33. Лукиных Н.А., Липман Б.Л., Криштул В.П. Методы доочистки сточных вод. – М.: Стройиздат, 1978. – 156 с.
34. Наркевич И.П., Печковский В.В. Утилизация и ликвидация отходов в технологии неорганических веществ. – М: Химия, 1984. – 240 с.
35. Быстров Г.А., Гальперин В.М., Титов Б.П. Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс. – Л.: Химия, 1982. – 264 с.
36. Термические методы обезвреживания отходов. /Под ред. К.К. Богушевской, Г.П. Беспамятнова – Л.: Химия, 1975. – 176 с.

*Учебное издание*

---

---

*Ляпков Алексей Алексеевич*  
*Монова Елена Ивановна*

# **Техника защиты окружающей среды**

**Учебное пособие**

**Издание 2-е, переработанное**

Научный редактор **профессор, д.х.н. В.М. Сутягин**


Редактор **Н.Т. Синельникова**

Подписано к печати . Формат 60x84/16. Бумага «Классика».  
Печать RISO. Усл.печ.л. 18,37. Уч.-изд.л. 16,63.  
Заказ . Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



Издательство  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.