

Высшее профессиональное образование

В. Г. Кальгин

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Учебное пособие



Защита
окружающей
среды

УДК 502.1(075.8)
ББК 20.18я73
К177

Рецензенты:

начальник управления РАО «Роснефтегазстрой», канд. техн. наук,
чл.-корр. РЭА, РАЕН и МИА *Р. Г. Мелконян*;
профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность»
МГТУ им. Н. Э. Баумана, д-р техн. наук *Б. С. Ксенофонтов*

Калыгин В. Г.

К177 Промышленная экология: Учеб. пособие для студ. высш. учеб.
заведений / Виталий Геннадьевич Калыгин. — М.: Издатель-
ский центр «Академия», 2004. — 432 с.
ISBN 5-7695-1449-3

Рассмотрены вопросы экологии разных отраслей промышленности, приоритетные принципы формирования экологически безопасных и энергосберегающих технологий обезвреживания отходов (газообразных, жидких и твердых). Приведена методика анализа влияния технических параметров процессов и аппаратов (машин) на условия образования вредных выбросов в атмо-, лито- и гидросферу; обсуждаются экологические основы устойчивого функционирования промышленных и коммунально-городских объектов в чрезвычайных ситуациях и направления эволюции систем предварительной подготовки и вторичной переработки отходов.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Защита окружающей среды». Может быть полезно аспирантам, инженерам, сотрудникам городского хозяйства, слушателям факультетов повышения квалификации соответствующих отраслей.

УДК 502.1(075.8)
ББК 20.18я73

ISBN 5-7695-1449-3

© Калыгин В. Г., 2004
© Издательский центр «Академия», 2004

Человечество на пороге XXI века подошло к такому пределу в своем историческом развитии, который может обозначить некоторый рубеж, определяющий более или менее благополучную историю рода человеческого от неизвестного и, вероятнее всего, очень опасного будущего.

Н. Н. Муссеев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная биосфера является продуктом многообразных процессов, протекающих на Земле 3,5—4,0 млрд лет. Окружающая нас атмосфера создана природой и остается неизменной в течение последних примерно 50 млн лет. Но уже в последние десятилетия говорится о все большем изменении ее состава, разрушении озонового подслоя, изменении прозрачности и, соответственно, появлении смога (англ. *smoke* — дым; *fog* — туман), кратного увеличения ее загрязнения оксидами серы и азота, свинцом, ртутью, канцерогенными (в частности, бенз(а)пиреном) и другими веществами.

Выбросы твердых веществ и выпадение из атмосферы соединений серы и азота с кислотными дождями приводит к загрязнению *лито- и гидросферы*.

Антропогенные воздействия на биосферу многообразны и в последние годы приближаются к критическому допустимому. Среди них особо негативны воздействия на *атмосферу*:

выбросы многообразных антропогенных веществ и других видов загрязнений;

выбросы тепла, влияющие на нагрев атмосферы и изменение ее радиационных параметров, в особенности приземных слоев, в которых существуют люди, животные, растения.

Научно-технический процесс неизбежно приводит к увеличению действия антропогенного фактора на окружающую среду и с особой остротой требует разумного использования природных богатств.

Биосфера — область сосредоточения сложных систем обмена веществ и энергии между входящими в эту систему компонентами, т. е. область распространения жизни на Земле.

Экология — комплексное межнаучное направление, изучающее глобальное влияние техники на связи всего живого и природы, научная основа рационального природопользования и охраны живых организмов.

Комплексное решение экологических проблем возможно лишь при гармонических взаимоотношениях общества, техники и природы. Экологически современные производства, решающие зада-

чи рационального использования и воспроизводства природных ресурсов, — будущее всех промышленных комплексов.

Разумное решение экологической проблемы возможно только при условии естественного сочетания научно-технического прогресса с многогранными аспектами защиты биосферы, экосферы, что должно быть в основе развития и создания действующих и новых производств и источников энергии. Наука о новых технологических процессах, машинах и аппаратах, позволяющих создать промышленные производства, гармонирующие с окружающей средой, с минимальным отрицательным воздействием на экосферу, называется «промышленная экология».

Наряду с организацией совершенного и разностороннего контроля за состоянием биосферы при воздействии на нее технических решений промышленная экология выдвигает ряд специальных требований к созданию современных промышленных производств:

необходимость разработки новых принципов создания совершенных производств, исключающих отрицательное воздействие на биосферу;

создание теоретических основ химической технологии, обеспечивающих высокий уровень комплексной переработки сырья, позволяющих достичь высоких степеней химических превращений и глубокого, экономически обоснованного извлечения целевых компонентов и вредных из отбросных потоков;

глубокое и экономичное использование высоко- и низкопотенциального тепла при сжигании топлива и химических превращениях;

освоение новых методов и аппаратуры, обеспечивающих создание замкнутых энергетических циклов;

освоение новых методов и аппаратуры, обеспечивающих создание замкнутых водооборотных циклов;

необходимость разработки методов и аппаратуры для специфических условий очистки отбросных газовых потоков, утилизации, хранения или уничтожения жидких и твердых отходов;

создание техники для новых природоохранных процессов — опреснение сточных вод, гидротермальный синтез природного сырья, проведение процессов в защитных средах и др.

Сформулированные положения нового научного направления — «промышленная экология» — только в определенной мере могут осветить многогранность этой отрасли науки. Естественно, они должны постоянно дополняться, так как промышленная экология создается на стыке наук в силу насущной необходимости.

ЧАСТЬ I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

ГЛАВА 1

ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

1.1. Понятийно-терминологические определения и другие классификационные структуры

Интенсивное развитие хозяйственной деятельности людей (потребности — производство — потребление), деградация природных экосистем, аварии и катастрофы на промышленных и оборонных объектах разрушают окружающую среду и приводят природу к состоянию кризиса, грозящего экологической катастрофой (с пагубными последствиями для населения).

Поэтому перед человечеством встала задача рационального природопользования в сочетании с эффективным снижением отрицательного воздействия промышленного производства на биосферу.

Проблемы взаимоотношения человека и природы занимают умы ученых с древних времен: философ Анаксимандр (ок. 610 — после 547 до н.э.) стал автором первого философского труда на греческом языке «О природе»; к 242 г. до н.э. индийский император Ашока разработал эдикты (декреты), которые предписывали охранять рыб, животных, леса; английский король Эдуард I (1239—1307 гг.) с 1272 г. специальным законом запретил отапливать дома Лондона каменным углем, так как город задыхался в смраде каменноугольной копоти; итальянский врач Рамаццини Бернардино (1633—1714 гг.) — один из основоположников профпатологии — написал трактат «О болезнях ремесленников. Рассуждения»; Петр I Великий (1672—1725 гг.) стал автором первых указов об охране природной среды в России; французский философ Огюст Конт (1798—1857 гг.) в своих сочинениях рассматривал систему «география человека — экология человека — социология»; выдающиеся российские ученые В. И. Вернадский, Д. С. Лихачев, В. П. Казначеев, А. Л. Яншин, Н. Ф. Реймерс, В. А. Легасов, Н. Н. Моисеев, Г. А. Богдановский, Г. В. Стадницкий, А. И. Родионов, О. С. Чехов, О. Н. Русак, С. В. Белов, И. И. Мазур, В. И. Данилов-Данильян, А. В. Яблоков и другие стали авторами осново-

полагающих идей, заложенных в фундамент советской, а затем и российской систем безопасного развития техносферы [1 — 3].

Из зарубежных в нашей стране наиболее популярны труды Ю. Одума, Э. Планки, М. Битона, Г. Доусона и Б. Мерсера, Л. Штарке, Б. Небела, В. Маршалла и др.

Набирает силу возникающая в конце XX в. комплексная научно-практическая дисциплина об экологической безопасности производственных процессов — промышленная экология. Причиной ее создания стала социальная потребность в защите людей от негативных воздействий в триаде *биосфера — человек — техносфера*.

Биосфера — оболочка Земли, обусловленная прошлой или современной деятельностью живых организмов. По определению академика В. И. Вернадского, биосфера — часть Земного шара, в пределах которой существует жизнь. Биосфера охватывает часть *атмосферы* (примерно до озонового слоя), верхнюю часть *литосферы*, так называемую кору выветривания (2 — 3 км в глубь Земли) и *гидросферу*. Биосфера сформировалась на нашей планете около 4 млрд лет назад. Венцом развития биосферы явился человек. В результате эволюции энергии: мускульная — паровая — электрическая — атомная, на Земле появились созданные человеком заводы, фабрики, транспортные системы, объекты ядерной техники. Весь этот искусственно созданный технический мир назвали *техносферой*.

Технический мир находится в явном противоречии с законами жизни на Земле (и естественными экологическими системами) — идет объективное разрушение окружающей среды. Диалектика взаимодействия общества и природы заключается в оценке глубины этих противоречий и в выборе возможностей (путей) их разрешения, в связи с чем рождается ряд вопросов о взаимном влиянии *качества окружающей среды и существования жизни человека*.

Все это и является предметом *экологии* — науки о взаимоотношениях между живыми организмами и средой обитания. Термин «экология» (греч. *oikos* — жилище, местопребывание, дом; *logos* — учение, наука) предложил в 1866 г. немецкий биолог Э. Геккель.

Современная экология изучает взаимодействие человека и биосферы, общественного производства с окружающей его природной средой и другие проблемы [4], включает разные направления, в частности: охрану окружающей среды (или охрану природы), защиту биосферы, инженерную экологию, промышленную экологию, экологическую безопасность.

К компетенции экологов относятся законодательные, организационные, санитарно-гигиенические, инженерно-технические и другие мероприятия, предупреждающие или снижающие вредное воздействие результатов деятельности человека на биологические системы.

Большую актуальность приобрели прикладные направления теоретической экологии, связанные с решением задач по идентифика-

ции и оценке опасностей антропогенных воздействий, защите окружающей среды и обеспечению высокого уровня жизни людей.

При рассмотрении многих экологических проблем, особенно прикладного характера [5], широко применяются понятия «экологическая обстановка», «экологическая опасность (безопасность)» и «ресурсосбережение», «химическая, радиационная обстановка, опасность (безопасность)», «допустимые уровни» шума, электромагнитных излучений и др.

Например, *экологическая безопасность* трактуется как любая деятельность человека, исключая вредное воздействие на окружающую среду [6]. Под экологической безопасностью понимают также положение, при котором путем правового нормирования, выполнения экологических, природозащитных и инженерно-технических требований предотвращаются или ограничиваются опасные для жизни и здоровья людей, разрушительные для народного хозяйства и окружающей среды последствия экологических катастроф [7].

Окружающая среда — совокупность всех материальных тел, сил и явлений природы, ее вещество и пространство, любая деятельность человека, совокупность абиотической (компоненты и явления неживой, неорганической природы: климат, свет, химические элементы и вещества, температура), биотической (факторы взаимодействия особей и видов: конкуренция, паразитизм и др.) и социальной сред, влияющих на человека и его деятельность.

Понятие «природная среда» более узкое. Оно включает совокупность объектов и условий природы, в которых протекает деятельность какого-либо субъекта [8].

К факторам, проявляющимся в результате деятельности человека, относятся антропогенное и техногенное воздействия на природную среду.

Антропогенное воздействие — любой вид хозяйственной деятельности человека в его отношении к природе, *техногенное* — целенаправленный процесс технической (в том числе геологической) деятельности человека в биосфере и околоземном пространстве.

В зависимости от вида антропогенного воздействия (рис. 1.1) понятие «экологическая безопасность» может трансформироваться в широко применяемое на практике понятие «химическая безопасность» — совокупность определенных свойств объектов окружающей среды и создаваемых условий, при которых (с учетом экономических, социальных факторов и научно обоснованных допустимых дозовых нагрузок химических вредных веществ) удерживаются на разумно низком, минимально возможном уровне риска возникновения аварий на химически опасных объектах, прямое и косвенное воздействие этих веществ на окружающую среду и человека и исключаются отдаленные последствия влияния химически вредных веществ для настоящего и последующих поколений [9].



Рис. 1.1. Виды загрязнений

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

Экологическое обеспечение — комплекс мероприятий организационно-технического, социально-экономического, правового регулирования, направленных на сохранение и восстановление ка-

чества природной среды, а также обеспечение высокого уровня жизни людей в процессе функционирования народно-хозяйственных, культурно-бытовых и других объектов и структур.

Экологизация — процесс неуклонного и последовательного внедрения систем, в частности, технологических, управленческих решений, позволяющих повышать эффективность использования естественных ресурсов и условий наряду с улучшением или хотя бы сохранением качества природной среды на локальном, региональном и глобальном уровнях [5].

Экологизация технологий (производства) — мероприятия по предотвращению отрицательного воздействия производственных процессов на природную среду — осуществляется разработкой малоотходных (ресурсосберегающих) технологий, аппаратов и оборудования, дающих на выходе минимум вредных выбросов.

Экологизированные технологии — производственные процессы и производства, которые не нарушают естественные круговороты в природе, сводят до минимума поступление загрязняющих веществ в биосферу и гармонично вписываются в природные условия [5].

В их основу должны быть положены следующие принципы.

1. *Пространственная компактность*: каждое предприятие должно занимать минимально разумную территорию, а его цеха и отделы — работать по принципу: создание экологически чистой продукции → ее сбыт → возврат отходов в производство.

2. *Малоотходность (теоретически безотходность) технологий и производств.*

3. *Замкнутость производственных циклов*, что позволяет сохранить в чистоте природную среду и уменьшить потребление природных ресурсов.

4. *Возможность вторичной переработки (рекуперации) отходов* до такой степени, чтобы сделать их допустимыми для разложения и включения в естественные круговороты.

Опираясь на основные понятия экологии и ее прикладных ответвлений, можно рассматривать и устанавливать главные способы (методы) разрешения конфликта человека с природой, сохранение высокого качества окружающей среды и здоровья населения.

Комплексное решение данной задачи возможно лишь при владении специалистом того или иного производства знаниями в области экологии, позволяющими ему оценивать промышленные технологии с позиций охраны окружающей среды — обладать экологическим мышлением. Мы должны перейти в новое состояние, имя которому *ноосфера*, т. е. сфера разума (В. И. Вернадский, 1920). У человечества нет иного выбора.

Ноосфера — сфера взаимодействия природы и общества, в пределах которой разумная деятельность человека становится опре-

деляющим фактором; системное образование современности, обладающее внутренним единством и логикой развития. Логической основой этого образования являются следующие практические разделы экологии как науки.

Прикладная экология — дисциплина, изучающая механизмы разрушения биосферы человеком, способы предотвращения этого процесса и разрабатывающая принципы рационального использования природных ресурсов без деградации среды жизни [4, 5].

Инженерная экология — дисциплина, изучающая общие и локальные закономерности формирования техносферы и способы управления ею в целях защиты и безопасности природной среды [5], или система инженерно-технических мероприятий, направленных на сохранение качества среды в условиях растущего промышленного производства [10].

Промышленная экология — дисциплина, рассматривающая воздействие промышленности (от отдельных аппаратов и предприятий до техносферы) на природу и, наоборот, — влияние условий природной среды на функционирование предприятий и их комплексов [11].

Фактически и согласно вышеупомянутым определениям, существуют две группы задач охраны окружающей природной среды (ООПС): экологические и инженерные, причем первые могут решаться с помощью вторых.

1.2. Экологизированные (ресурсосберегающие) технологии

Малоотходные (безотходные) технологии и замкнутые циклы — одна из самых радикальных мер защиты окружающей среды от загрязнений. Далее сформулированы четыре основных направления их развития (в соответствии с Декларацией о малоотходной и безотходной технологии и использовании отходов, принятой в Женеве в 1979 г.).

1. Создание бессточных технологических систем разного назначения на базе существующих и перспективных методов очистки и повторно-последовательного использования нормативно очищенных стоков.

2. Разработка и внедрение систем переработки промышленных и бытовых отходов, которые рассматриваются при этом как вторичные материальные ресурсы (ВМР).

3. Разработка технологических процессов получения традиционных видов продукции принципиально новыми методами, при которых достигается максимально возможный перенос вещества и энергии на готовую продукцию.

4. Разработка и создание территориально-промышленных комплексов (ТПК) с возможно более полной замкнутой структурой материальных потоков и отходов производства внутри них.

Безотходная технология — экологическая стратегия промышленного производства, включающая комплекс мероприятий, обеспечивающих минимальные потери природных ресурсов при максимальной экономической эффективности [12].

Критерием безотходной технологии является такое комплексное использование сырья и энергии, при котором процесс производства продукции не сопровождается загрязнением окружающей среды. При этом техногенный круговорот сырья, продукции и отходов предопределяет замкнутость производственного цикла, что по существу и составляет основу безотходной технологии. Принцип безотходной технологии затрагивает все звенья производственной деятельности: разработку новых технологических рецептов, аппаратурного оформления, экономических, экологических мероприятий и т. д. По официальному определению, данному на Международном семинаре по малоотходной технологии в Ташкенте в 1984 г., «безотходная технология — такой способ осуществления производства продукции, при котором наиболее рационально и комплексно используют сырье и энергию в цикле *сырьевые ресурсы — производство — потребление — вторичные ресурсы* и таким образом, что любые воздействия на окружающую среду не нарушают ее нормального функционирования».

К концепции безотходной технологии существует два подхода. Один основан на законе сохранения вещества, в соответствии с которым сырье (материя) всегда может быть преобразовано в ту или иную продукцию. Следовательно, можно создать такой технологический цикл, в котором все экологически опасные вещества будут преобразовываться в безопасный продукт или исходное сырье. Согласно другому, полностью безотходную технологию нельзя создать ни практически, ни теоретически (подобно тому, как энергию нельзя полностью перевести в полезную работу в соответствии со вторым законом термодинамики, так и сырье невозможно полностью перевести в полезный экологически безопасный продукт). Другими словами, полностью безотходная технология — идеальная система, к которой должен стремиться всякий реальный технологический цикл, и чем больше будет это приближение, тем меньшим будет экологически опасный след [13].

В этом отношении более реальной является так называемая *малоотходная технология* — такой способ производства продукции, когда вредное воздействие на окружающую среду доведено до санитарно-гигиенических норм и соответствующих предельно допустимых концентраций (уровней) ПДК (ПДУ).

Иногда используют понятие «экологически чистая технология», подразумеваемая такой метод производства продукции, при котором сырье и энергию применяют настолько рационально, что объемы выбрасываемых в окружающую среду загрязняющих веществ и отходов сведены к минимуму.

Таким образом, приняв, что полностью безотходная технология — это *идеальная модель* производства, можно утверждать, что и малоотходная технология требует определенных корректирующих коэффициентов, оценивающих степень их приближения к безотходной.

Имеется ряд подходов к определению безотходности производств: экспериментальная оценка, оценки по сырьевому и энергетическому балансам, полноте использования эксергии, общему параметру оптимизации, полученному с помощью функции желательности или технологического профиля, а также экономическим путем при сопоставлении затрат на производство продукции.

Общий баланс относительной токсичности массы (ОТМ) вредных веществ:

$$\sum(M_c + M_b) - \sum M_n - \sum M_p = 0, \quad (1.1)$$

где $M_c + M_b$ — масса отходов, поступающих в окружающую среду со сточными водами и газовыми выбросами; $\sum M_n$ — масса нейтрализованных отходов; $\sum M_p$ — масса рассеянных отходов.

Относительную экологичность типового процесса, технологической линии, цеха определяют по формуле

$$A = \frac{\sum(M_c + M_b) - \sum M_n}{\sum(M_c + M_b)} 100\%. \quad (1.2)$$

При $A \rightarrow 0$ процесс является безотходным.

Методология оценки категории безотходности *химических* производств предполагает, что коэффициент безотходности $k_6 = \varphi(k_m, k_э, k_a)$, где k_m и $k_э$ — коэффициенты полноты использования соответственно материальных и энергетических ресурсов; k_a — коэффициент соответствия экологическим требованиям. Производства в зависимости от величины k_6 и мощности разделяют на три категории: безотходные ($k_6 \geq 0,97$), малоотходные ($0,80 - 0,90 < k_6 < 0,90 - 0,97$) и рядовые ($k_6 \leq 0,80$).

Для угольной промышленности

$$k_6 = 0,33(k_n + k_b + k_{пг}), \quad (1.3)$$

где k_n — коэффициент использования породы, образующейся в результате горных работ; k_b — коэффициент использования попутно забираемой воды, образующейся при добыче угля; $k_{пг}$ — коэффициент использования пылегазовых отходов.

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

$$k = \frac{B_r}{B_\phi} = \frac{B_r}{B_r + B_n}, \quad (1.4)$$

где V_T — теоретическое воздействие, необходимое для производства; V_Φ — фактическое воздействие; V_n — воздействие, определяемое конкретным производством.

Если $V_\Phi \gg V_T$, то $k \rightarrow 0$, т. е. данное производство абсолютно не учитывает требований экологической безопасности, что неизбежно ведет к так называемому экологическому «просчету» или экологическому «бумерангу». Чем выше k , тем более совершенно производство с учетом воздействия на окружающую среду и тем более существенно приближение к безотходной технологии [14].

Социально-экономический эффект безотходных производств определяют по комплексному критерию

$$\eta = \sum_i \mathcal{E}_i - Y/Z_n \rightarrow \max, \quad (1.5)$$

где $\sum_i \mathcal{E}_i$ — сумма всех эффектов, достигаемых при внедрении безотходного производства; Y — ущерб от загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления; Z_n — полные затраты на безотходное производство.

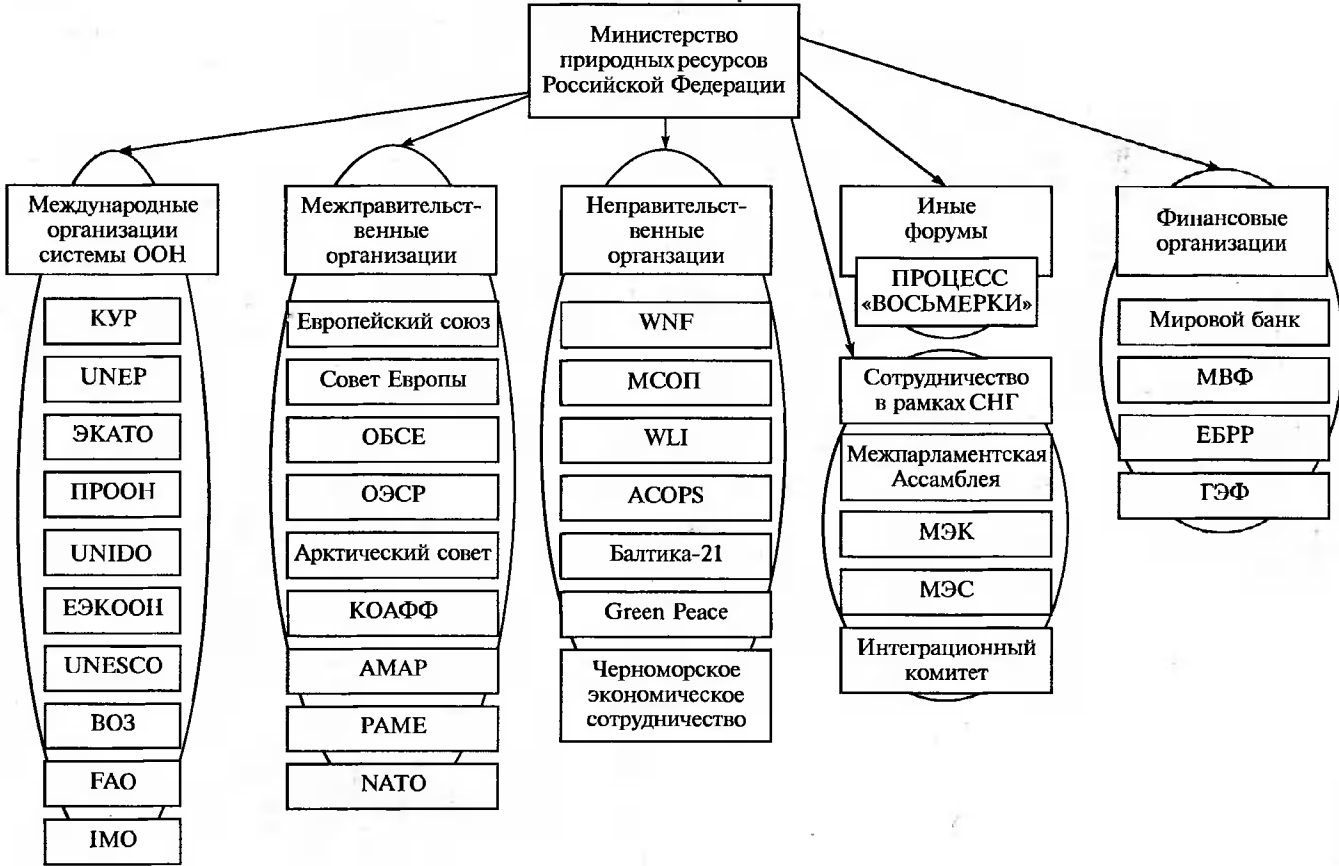
При наличии ряда вариантов безотходного производства должен быть выбран вариант с наибольшими η при минимальных Z_n . Сочетание прогрессивной технологии с современными методами очистки и контроля газопылевых выбросов, вторичного использования отходов позволяет реконструировать существующие и проектировать новые цеха, отдельные производственные участки, отвечающие всем требованиям экологической безопасности.

1.3. Международный контроль и государственное управление качеством окружающей среды

Международное сотрудничество в области охраны природы и природопользования осуществляется обычно по схеме: *проведение международных совещаний — заключение договоров — создание международных правительственных и неправительственных организаций — разработка и координация программ экологической безопасности.*

Решение этого комплекса задач принципиально возможно только на основе согласованного международного сотрудничества в рамках ООН с рядом межправительственных и неправительственных организаций, участвующих в решении экологических проблем.

Значительные усилия Российской Федерации и иностранных партнеров в этой области в соответствии с Программой ООН по охране окружающей среды (UNEP) позволили разработать и принять важные международные конвенции, соглашения, договоры, касающиеся охраны окружающей среды.



Существуют также международные экологические фонды и финансовые учреждения.

На рис. 1.2 представлена структурно-информационная схема международных организаций — партнеров Министерства природных ресурсов Российской Федерации (МПР России) [15].

Кроме ООН и ЮНЕСКО в области охраны окружающей среды работают Совет Европы, Европейское сообщество, Европейская экономическая комиссия, Сообщество северных стран и др.

Охрана окружающей среды в современных условиях развития промышленности, транспорта, коммунальных служб и сельского хозяйства является одной из важнейших задач экологической безопасности нашего государства.

В Конституции (Основном законе Российской Федерации от 12.12.1993) определены материальная основа, цели и задачи, принципы и формы всей деятельности по охране природы.

Важнейшими законодательными актами являются Федеральные законы «Об охране окружающей среды» (от 10.01.2002 № 7-ФЗ), «Об охране атмосферного воздуха» (от 04.05.1999 № 96-ФЗ), Закон РФ «О безопасности» (от 05.03.1992 № 2446-1 (в ред. от 24.12.1993)), Положение «Об образовании Межведомственной комиссии Совета безопасности Российской Федерации по экологической безопасности» (1993), Постановление Правительства Российской Федерации «О специально уполномоченных государственных органах Российской Федерации, органах в области охраны окружающей природной среды» (1998), Положение «О Государ-

←
Рис. 1.2. Сотрудничество Министерства природных ресурсов Российской Федерации:

КУР — Комиссия ООН по устойчивому развитию; UNEP — Программа ООН по окружающей среде; ЭКАТО — Экономическая комиссия для Азии и Тихого океана; ПРООН — Программа развития ООН; UNIDO — Организация ООН по промышленному развитию; ЕЭКООН — Европейская экономическая комиссия ООН; UNESCO — Комиссия ООН по науке и образованию; ВОЗ — Всемирная организация здравоохранения; FAO — Всемирная продовольственная организация; ИМО — Международная морская организация; ОБСЕ — Организация по безопасности и сотрудничеству в Европе; ОЭСР — Организация экономического сотрудничества и развития; КОАФФ — Комиссия по охране арктической флоры и фауны; АМАР — Арктическая программа по мониторингу и оценке окружающей среды; РАМЕ — Программа защиты арктической морской среды; НАТО — Северо-Атлантический военный блок; WNF — Фонд дикой природы; МСОП — Международный союз охраны природы; WLI — Международная организация по сохранению водно-болотных угодий; АСОПС — Консультативный комитет по защите морей; БАЛТИКА-21 — Программа на XXI в. для региона Балтийского моря; МЭК — Межгосударственный экономический комитет; МЭС — Межгосударственный экологический совет; ПРОЦЕСС «ВОСЬМЁРКИ» — развитие договоренностей, достигнутых в рамках консультаций руководителей ведущих стран мира; МВФ — Международный валютный фонд; ЕБРР — Европейский банк реконструкции и развития; ГЭФ — Глобальный экологический фонд;

ственном комитете Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (1992), Положение «О Межведомственной комиссии по проблеме геологического обеспечения безопасного захоронения радиоактивных отходов» (1993), Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении порядка определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей природной среды, размещение отходов, других видов вредного воздействия» (1992, 2000), методики определения от 1999 и 2000), Федеральные законы «Об энергосбережении» (от 03.04.1996 № 28-ФЗ), «Об отходах производства и потребления» (от 24.06.1998 № 89-ФЗ (в ред. от 29.12.2000)), Постановление Правительства Российской Федерации «О порядке проведения государственной экологической экспертизы» (1996) и др.

Возможности права в ООПС, обеспечении рационального использования природных ресурсов, экологической и промышленной безопасности (ЭБ и ПБ) осуществляются на всех уровнях; федерально-республиканском, автономных образований, краев, областей, городов — Москвы и Санкт-Петербурга, местном.

Специально уполномоченные государственные органы ООПС и экологической безопасности — Министерство природных ресурсов Российской Федерации (Минприроды России) и его подразделения на местах. Иные центральные органы федеральной исполнительной и поднадзорной власти, осуществляющие отдельные экологические функции: Государственная экологическая служба; Федеральная служба по технологическому надзору; Федеральная служба по атомному надзору; Федеральная служба гидрометеорологии; Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России); Департамент Госсанэпиднадзора Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации; Министерство внутренних дел (МВД России; Управление экологической милиции); Госстрой России (Агентство по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству) и другие.

1.4. Контроль качества окружающей среды

При обосновании требований к параметрам биосферы необходимо знать оценку разных факторов и состояние элементов окружающей среды до и после вредного воздействия. При этом большое значение имеют методы и организационные формы проведения экологического контроля (мониторинга) в стране и на местах [16].

При рассмотрении методов не следует забывать, что состояние биосферы изменяется под влиянием как естественных, так и антропогенных (техногенных) воздействий [17].

Контролем естественных изменений состояния природной среды занимаются геофизические службы, изменений под влиянием жизнедеятельности человека — службы экологического мониторинга. В общем случае под мониторингом понимается комплексная система наблюдений, оценки и прогноза изменений окружающей среды под влиянием антропогенных воздействий.

Создание универсальных методов измерения вредных выбросов как в атмосфере, так и в локальных выбросах представляет сложную метрологическую задачу. Главным образом это связано с тем, что вещества-загрязнители характеризуются многими параметрами, что затрудняет однозначное определение их концентраций и идентификацию. В зависимости от области применения измерительную аппаратуру делят на три основные группы:

1 — приборы (весовые, радиоизотопные, оптические, индукционные и др.) для контроля запыленности атмосферного воздуха и воздуха рабочей зоны;

2 — приборы (весовые, оптические, электрические, лазерные и др.) для измерения содержания и дисперсного состава пыли в аспирационных (вентиляционных) выбросах;

3 — приборы для анализа воздуха и водных сред (хроматографические, масс-спектрометрические, спектральные, электрохимические).

Существует классификация систем мониторинга по учитываемым факторам и источникам воздействий, реакциям основных составляющих биосферы на эти воздействия, методам наблюдения и т.п.

Наиболее представительна Единая государственная система экологического мониторинга (ЕГСЭМ), сочетающего как геофизические, биологические, так и техногенные аспекты.

Организационные формы проведения экологического контроля.

1. *Государственная экологическая экспертиза (ГЭЭ)* — проводится с целью установления правильности определения заказчиком хозяйственной и (или) иной деятельности, возможных экологических и связанных с ними социальных и экономических последствий ее осуществления, а также полноты и достаточности предусмотренных им мер по предотвращению отрицательных экологических последствий. Проводят ГЭЭ специально уполномоченные на это экспертные государственные органы МПР России. Главные задачи ГЭЭ: рассмотрение представленной документации в соответствии с нормами и правилами проведения экспертизы; подготовка заключения для представления его на рассмотрение органов (лиц), принимающих решение о возможности и сроках реализации намеченных мероприятий; контроль за выполнением условий, принятых к реализации проектов хозяйственной и (или) иной деятельности, прошедших ГЭЭ и получивших ее положительное заключение.

2. *Экологическое аудирование* — вид деятельности по управлению качеством окружающей среды. В общем виде экологическое аудирование можно определить как добровольную внутреннюю самопроверку деятельности некоторой производственной структуры с целью приведения этой деятельности в соответствие с документами, регламентирующими природопользование, и сокращение тем самым существующего и потенциального экологического и финансового ущерба из-за несоблюдения этих регламентирующих документов. Эффективность программ экологического аудирования обеспечивают:

непременная поддержка аудирования и оценка его результатов руководством предприятия;

независимость функции аудирования от реализуемой деятельности;

профессионализм группы аудиторов;

четко обозначенные цели, рамки, ресурсы и частота проведения экологического аудирования;

адекватность процесса сбора, анализа, интерпретации и документирования результатов целям аудирования;

наличие специальных процедур (алгоритмов), обеспечивающих объективное изложение результатов аудирования в письменных отчетах;

мероприятия, гарантирующие качество экологического аудирования.

3. *Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС)* — заключение о воздействии хозяйственного объекта на окружающую среду, составленное в соответствии с утвержденными правилами. С 1988 г. требование о проведении ОВОС было распространено на все сферы деятельности [5, 18, 20].

1.5. Стратегия взаимодействия общества и природы

Концепции и глобальные модели будущего мира

Существует ряд вариантов концепций взаимодействия общества и природы: «Предел роста»; «Человек на перепутье»; «Перестройка мирового порядка» (1972); «Цели глобального общества» (1977) и др. На базе названных выше и ряда других к концу XX в. были сформулированы три концепции.

1. *Ресурсная концепция* развития мировой системы — рассматривает Землю только, или в основном, как источник ресурсов.

2. *Биосферная концепция* развития — биосфера, включающая биоту и окружающую ее среду, обладает могучими механизмами стабилизации характеров окружающей среды для обеспечения близких к оптимальным условиям существования живых организмов.

3. Концепция устойчивого развития.

Из первых двух концепций пока предпочтение отдается ресурсной. Появившееся в последнее десятилетие понятие «устойчивое развитие» пока еще никак не способствовало пониманию путей ликвидации или смягчения развивающейся экологической катастрофы [21].

Эволюция же экологического мировоззрения, основанная на историческом опыте, привела к утверждению концепции необходимости сбалансированного развития экономики без нарушения экологических интересов общества [22, 23]. Принципы ее предполагают:

право людей на здоровую и плодотворную жизнь в гармонии с природой;

охрану окружающей среды как неотъемлемую часть процесса развития;

удовлетворение потребностей в благоприятной окружающей среде как нынешнего, так и будущих поколений;

уменьшение разрыва в уровне жизни между народами мира, а также между бедными и богатыми в каждой стране;

совершенствование природоохранного законодательства;

исключение моделей развития производства и потребления, не способствующих устойчивому развитию.

Законы, принципы и правила функционирования техносферы

Опыт XX в. показывает, что создание техносферы с высокими показателями качества среды и безопасным уровнем жизнедеятельности человека — сложная задача. Ее решение требует развития методов превентивного анализа показателей техносферы, совершенствования научных основ комплексной оценки ее состояния, разработки и широкого использования экобиозащитных технологий, аппаратуры и средств индивидуальной защиты.

Достижению указанных целей способствует ряд положений, определяющих структуру и функционирование техносферы:

а) законы [3]:

минимума (Ю. Либих, 1840) — здоровье человека определяется в том числе специфическими веществами, которые присутствуют в организме в ничтожных количествах (витамины, микроэлементы);

толерантности (В. Шелфорд, 1910) — диапазон между экологическим минимумом и экологическим максимумом определяет пределы устойчивости, т. е. толерантности данной биосистемы;

неравномерности техносферы — показатели качества техносферного региона всегда зонированы в соответствии с его структурой, в благоприятном техносферном регионе показатели качества изменяются от оптимальных до допустимых;

предельности воздействий на техносферу — устойчивое развитие техносферы возможно при соблюдении предельных антропогенных воздействий (включая допустимую плотность населения);

незаменимости биосферы в техносфере — обеспечение допустимого качества среды обитания в техносфере невозможно без сохранения в ней исторически сложившейся совокупности растений и животных, объединенных областью распространения, т. е. естественной биоты;

б) аксиомы [19]:

техногенные опасности существуют, если повседневные потоки вещества, энергии и информации в техносфере превышают пороговые значения; действуют в пространстве и во времени; ухудшают здоровье людей, приводят к травмам, материальным потерям и деградации природной среды; требуют компетентности людей в мире опасностей и способах защиты от них;

в) принципы [3]:

управления показателями техносферы: управлять показателями техносферы можно за счет изменения ее структуры, влияния на состояние ее элементов и применения экобезопасной техники;

превентивности анализа качества техносферы: качество и негативные воздействия в техносфере необходимо идентифицировать на стадии превентивного анализа ее структуры;

г) правило [3]:

системы экобиозащиты на технических объектах должны иметь приоритет ввода в эксплуатацию и средства контроля режимов работы.

Список литературы

1. *Панькова В. Н.* Экология и природопользование: Словарь-справочник. — Новосибирск: Сибирское соглашение, 2000. — 212 с.

2. *Калыгин В. Г.* Безопасность жизнедеятельности: Текст лекций. — М.: МГУИЭ, 2001. — 236 с.

3. Материалы научно-методического совета по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности». — М.: Изд-во ВГАВТ, 1996. — 82 с.

4. *Кормилицын В. И., Цицкишвили М. С., Яламов Ю. И.* Основы экологии. — М.: Изд-во МПУ, 1997. — 368 с.

5. *Мазур И. И., Молдаванов О. И., Шишов В. Н.* Инженерная экология. Общий курс. В 2-х т. Т. 2. — М.: Высш. шк., 1996. — 655 с.

6. *Дедю И. И.* Экологический энциклопедический словарь. — Кишинев: Молдавская энциклопедия, 1990. — 114 с.

7. *Винюков К. М., Дебабов С. А., Прохоцкий И. Г.* Система предупреждения к действию в чрезвычайных ситуациях. — Минск: Польша, 1992. — 278 с.

8. *Протасов В. Ф., Молчанов А. В.* Словарь экологических терминов и понятий. — М.: Финансы и статистика, 1997. — 160 с.

9. *Измалков В. И.* Экологическая безопасность, методология прогнозирования антропогенных загрязнений и основы построения химического мониторинга окружающей среды. — СПб.: НИЦ экологической безопасности, 1994. — 132 с.

10. *Стадницкий Г. В., Родионов А. И.* Экология. — СПб.: Химия, 1996. — 240 с.
11. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование: Словарь-справочник. — М.: Мысль, 1990. — 595 с.
12. Экологический словарь / Сост.: С. Делятицкий, И. Зайонц, Л. Чертков, В. Эдарьян. — М.: Конкорд Лтд: Экопром, 1993. — 208 с.
13. *Богдановский Г.А.* Химическая экология. — М.: Изд-во МГУ, 1994. — 237 с.
14. *Бондарева Т.И.* Экология химических производств. — М.: Изд-во МИХМ, 1986. — 92 с.
15. *Высторобец Е.А.* Международное сотрудничество в области охраны окружающей среды и природных ресурсов: Справочное пособие. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. — 80 с.
16. *Афанасьев Ю.А., Фомин С.А.* Мониторинг и методы контроля окружающей среды. Ч. 1. — М.: Изд-во МНЭПУ, 1998. — 208 с.
17. *Калыгин В.Г., Попов Ю.П.* Порошковые технологии: экологическая безопасность и ресурсосбережение. — М.: Изд-во МГАХМ, 1996. — 212 с.
18. *Букс И.И., Фомин С.А.* Экологическая экспертиза и оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС). — М.: Изд-во МНЭПУ, 1999. — 128 с.
19. Безопасность жизнедеятельности / С. В. Белов, А. В. Ильницкая, А. Ф. Козьяков и др. — М.: Высш. шк., 1999. — 448 с.
20. *Акимова Т.А., Хаскин В.В.* Экология. — М.: ЮНИТИ, 1998. — 455 с.
21. Экологические проблемы: что происходит, кто виноват и что делать? / Под ред. В. И. Данилова-Данильяна. — М.: Изд-во МНЭПУ, 1997. — 332 с.
22. Экология / Л. И. Цветкова, М. И. Алексеев, Б. П. Усанов и др. — М.: АСВ; СПб.: Химиздат, 1999. — 488 с.
23. *Трусов А.Г.* Международное экологическое право (Международное право окружающей среды). — М.: Изд-во МНЭПУ, 1999. — 84 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение экологии. Что такое промышленная экология?
2. Чем отличаются первоначальные и современные определения экологии как науки? Чем обусловлены эти различия?
3. Что такое экологизация знаний и чем она обусловлена? В чем состоит экологизация промышленных технологий?
4. Назовите принципиальное отличие малоотходной технологии от безотходной.
5. Что такое факторы среды? Какие экологические факторы вы знаете? Перечислите основные законы функционирования техносферы.
6. В чем заключаются международный контроль и государственное управление качеством окружающей природной среды?
7. Какова общая цель всех видов и типов экологических экспертиз, включая ОВОС, аудит и т.д.?
8. Расскажите о концепциях развития мировой системы.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ
ПРОИЗВОДСТВ

2.1. Технические и химико-технологические системы

Системный подход характеризуется представлением объектов разной природы в виде системы взаимодействующих элементов, выбором математической модели и исследованием ее на ЭВМ. Инструмент системного подхода, прежде всего, моделирование — логическое, математические, машинное, организационное.

Отнесение тех или иных инженерных объектов к системам условно и связано с тем, насколько существенны комплексные общесистемные факторы, что зависит как от свойств самой системы, так и от задач, ради которых ведется ее разработка [1].

Всякая *система* состоит из взаимосвязанных и взаимодействующих между собой и с внешней средой частей. Химическая система включает: собственно химический процесс, аппарат для его реализации, экобиозащитный узел (блок), средства для контроля, управления и связи основного и вспомогательного процессов. Соответствующие промышленные процессы протекают в так называемых химико-технологических системах (ХТС), каждая из которых — совокупность процессов и аппаратов, объединенных в единый производственный комплекс для выпуска продукции разного назначения [2—6].

Технология (греч. *technē* — искусство, мастерство, умение + лат. *logos* — наука) — совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, применяемых в процессе производства продукции; наука о способах воздействия на сырье, материалы и полуфабрикаты соответствующими орудиями производства [7]. Иными словами, технология — способ производства и/или переработки продукции с прибороаппаратным оформлением [8].

Техника — совокупность средств человеческой деятельности, созданных для осуществления процессов производства и обслуживания производственных потребностей общества [7].

Под *технической системой* (ТС) понимается совокупность методов и средств человеческой деятельности, созданных и направленных для реализации инженерных задач в разных сферах деятельности. Цель проектирования технических систем — не только достижение требуемой производительности и качества получаемой продукции, но и обеспечение экологической и промышленной безопасности эксплуатации и обслуживания ХТС. Разработка безопасных ХТС реализуется в ходе системного инженерно-конст-

рукторского проектирования, иначе — системой автоматизированного проектирования (САПР). Правила, порядок разработки и оформления графической и текстовой документации устанавливаются комплексом стандартов Единых систем конструкторской (ЕСКД) и технологической документации (ЕСТД) — ГОСТ 2.111—68 «ЕСКД. Нормоконтроль» и ГОСТ 3.1120—83 «ЕСТД. Общие правила отражения и оформления требований безопасности труда в технологической документации».

2.2. Уровни и иерархии организации производственных процессов

Системный анализ — стратегия изучения сложных систем, в частности, технологических процессов в производстве, коммунально-городском хозяйстве, в строительстве и других отраслях.

В основе стратегии системного анализа лежат следующие общие положения: четкая формулировка цели исследования; постановка задачи по реализации этой цели и определение критерия эффективности решения задачи; разработка развернутого плана исследования с указанием основных этапов и направлений решения задачи; пропорционально-последовательное продвижение по всему комплексу взаимосвязанных этапов и возможных направлений; организация последовательных приближений и повторных циклов исследований на отдельных этапах; принцип нисходящей иерархии анализа и восходящей иерархии синтеза в решении составных частных задач [8].

Основной метод исследования ХТС — математическое моделирование. Наряду с моделями отдельных аппаратов используют модель всей системы ввиду взаимовлияния процессов, протекающих в отдельных аппаратах. Предполагается, что аппараты, обеспечивающие реализацию высокоэффективных малоотходных и энергосберегающих технологий, являются элементами (подсистемами) одной большой установки. Анализ структуры такой системы связан с декомпозицией ее элементов и подсистем, выявлением их устойчивых взаимоотношений и обычно проходит в *две стадии*: *первая* включает математическое моделирование отдельных подсистем, так называемое макроисследование, *вторая* — микроисследование элементов подсистем. На второй стадии изучают процессы, протекающие в машинах или агрегатах, и совершенствуют используемое оборудование [9].

Математическое моделирование используется на уровне как отдельных процессов и аппаратов, так и их совокупностей. В модели должны учитываться принципы наилучшего использования сырья, повышения качества целевого продукта, рационального применения энергии, транспорта, информации, экологической защиты.

Процессы, например порошковых технологий, отличаются большим ассортиментом продуктов, которые можно получить из одного и того же сырья, разнообразием оборудования для получения одного и того же продукта, динамикой промышленных выбросов (газообразных, жидких и твердых), специфическими условиями их хранения и дальнейшей переработки (области использования). Поэтому за элемент системы принимают обычно технологическую операцию, включающую несколько физико-химических процессов. Превращение исходного сырья в промежуточный продукт и затем в конечное изделие происходит в результате нескольких операций, совокупность которых образует конкретную подсистему.

Учитывая условие агрегации таких подсистем в ХТС, можно ввести следующие уровни иерархии рассматриваемого производства порошковых материалов (ПМ) (табл. 2.1).

На рис. 2.1 представлен вариант системы уровней на предприятиях жилищно-коммунального комплекса (ЖКК) — в виде графа, вершиной которого являются вторичные энергоресурсы (ВЭР), получаемые в процессах с применением твердых (Т), жидких (Ж),

Таблица 2.1

Уровни иерархии производства ПМ

| Уровень иерархии ХТС | Типовой пример |
|--|---|
| Отрасль | Совокупность заводов, объединенных сырьем, полупродуктами, целевыми продуктами |
| Завод | Совокупность цехов, объединенных общим сырьем или полупродуктами, или вторично используемыми отходами, включая вспомогательные службы |
| Цех | Совокупность отделений, работающих на выпуск заданной продукции: предварительной обработки сырья, выпуска товарной продукции, переработки отходов, обеспечения и обезвреживания промышленных выбросов |
| Технологическая линия | Процесс (измельчение, смешение и т. п.) или совокупность процессов (компактирование + классификация + транспортировка), связанных общей производственной линией |
| Типовое оборудование (элемент системы) | Дробилка, измельчитель, смеситель, валковый пресс, термический реактор и т. п. |

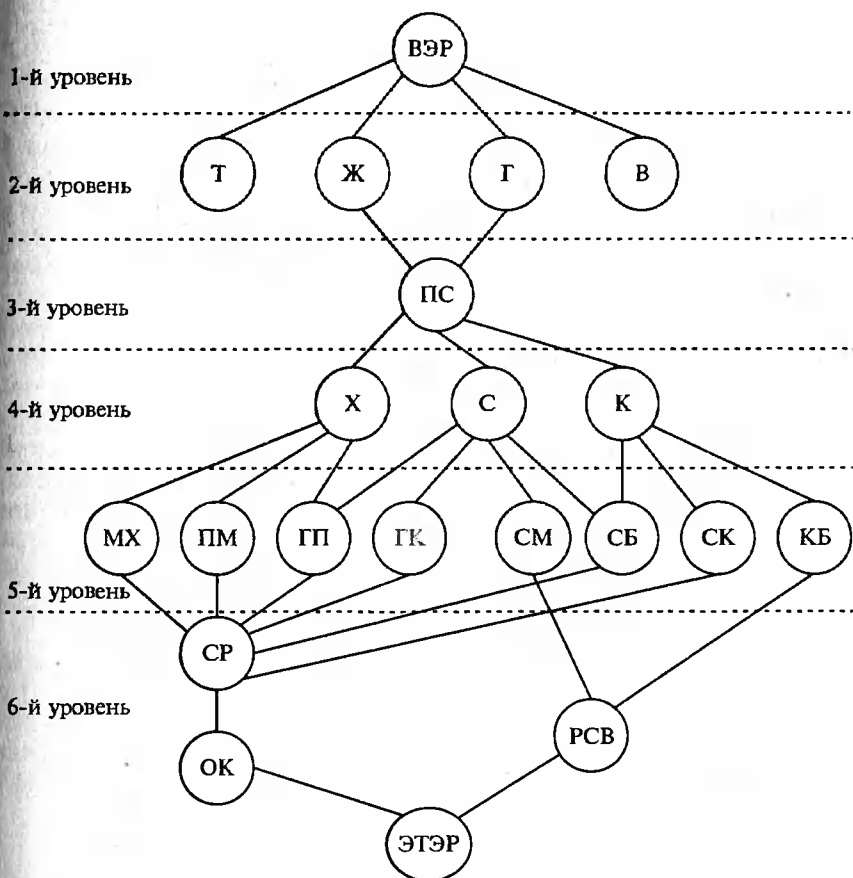


Рис. 2.1. Граф системы утилизации вторичных энергоресурсов на предприятиях химчистки, стирки и крашения

газообразных (Г) веществ и волновой энергии (В), т.е. электромагнитного поля (второй уровень). Третий уровень определяет вид предприятий сервиса (ПС), на которых исследуются технологические процессы с использованием ВЭР — химчистки (Х), стирки (С), крашения (К), образующих четвертый уровень. На пятом уровне задействуется технологическое оборудование, работающее в режиме рекуперативных теплообменников-машин химчистки (МХ), пароманекенов (ПМ), гладильных прессов (ГП), гладильных катков (ГК), смесительных теплообменников — стиральных машин (СМ), сушильных барабанов (СБ), сушильных камер (СК) и красильных барок (КБ). На шестом уровне графа задействовано энергосберегающее оборудование: сепаратор-расширитель (СР) для образования пара вторичного вскипания из отработавшего пара

(пароконденсатной эмульсии), охладителя конденсата (ОК), рекуператора сточных вод (РСВ) для использования теплоты технологических сточных вод (промстоков) стиральных машин и красильных барок. Граф показывает элементы системы теплотехнологии: вторичные энергоресурсы (ВЭР), операторы получения и использования ВЭР и результирующую систему — показатель по экономии теплоэнергетических ресурсов (ЭТЭР), для которых необходимы исследования зависимостей выхода тепловых ВЭР от параметров и расходов первичных теплоносителей на предприятиях ЖХХ.

Таким образом, системный анализ — не только стратегия изучения сложных ХТС, но и научная основа резкого сокращения сроков промышленной реализации лабораторных разработок. В качестве метода исследования в нем используется математическое моделирование, а основным принципом является декомпозиция сложной системы на более простые подсистемы (принцип иерархии системы). В этом случае математическая модель системы строится по блочному принципу: общая модель подразделяется на блоки, которые довольно просто отображаются математическими описаниями.

При этом необходимо помнить, что все подсистемы взаимодействуют, образуя обобщенную (единую) математическую модель.

Необходимо принимать во внимание, что элементы верхнего уровня иерархии — отрасли или завода — связаны взаимно и с окружающей средой многочисленными подсистемами для транспорта сырья, энергии, полупродуктов и т. п. Они также содержат многовариантные подсистемы для закупки, распределения, хранения сырья, продуктов, сроков ввода новых объектов и т. д.

| | | |
|--|-----|-------------------|
| Имеющееся сырье G_i | | |
| S_N : : : S_{N-1} | ... | S_2 : : : S_1 |
| Необходимые количества сырья, полуфабрикатов | | |
| P_N : : : P_{N-1} | ... | P_2 : : : P_1 |
| ХТС с M подсистемами Матрица коэффициентов выходов (степеней превращения a_{ij}) | | |
| q_N : : : q_{N-1} | ... | q_2 : : : q_1 |
| Продукты, полупродукты | | |
| d_N : : : d_{N-1} | ... | d_2 : : : d_1 |
| Плановая потребность в продуктах | | |

Рис. 2.2. Информационная схема (алгоритм) для построения математической модели «Отрасль»

Для решения задач на верхнем уровне предложено использовать технико-экономические линейные модели, которые отражают взаимосвязь по линии «сырье — продукты» (пример типовой системы изображен на рис. 2.2):

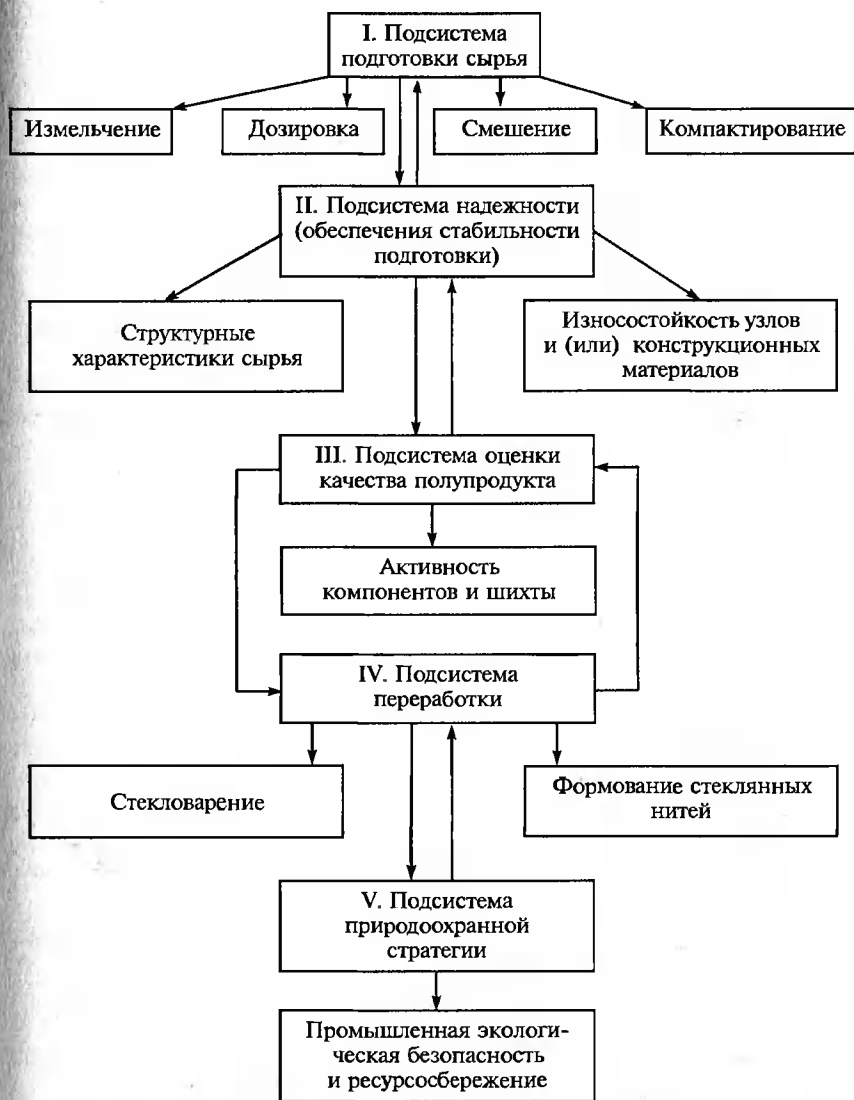


Рис. 2.3. Схема системной разработки и усовершенствования ресурсосберегающей техники подготовки и переработки стеклянных шихт

$$G_i + \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j + g_i = 0; \quad (2.1)$$

$$G_i \leq S_i g_i \leq d_i; \quad x_j \leq d_j;$$

$$j = 1, 2, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

где G_i — количество i -го вещества — сырья; m — число технологий (производственных систем); a_{ij} — коэффициент эффективности переработки i -го продукта в j -й подсистеме ($a_{ij} < 0$, если i — сырье; $a_{ij} > 0$, если i — продукт производства; $a = 0$ характеризует матрицу преобразования вещества в результате реализации технологий); x_j — количество вещества, перерабатываемого в j -й подсистеме; g_i — количество i -го вещества — продукта производства; S_i — количество сырья; d_i — требуемое количество i -го сырья; P_j — ограничение по мощности j -й подсистемы; n — число разных веществ в системе (сырье, полупродукты, продукты).

Аналогичные модели можно построить и для других балансовых величин — энергии, стоимости. Используя соответствующую целевую функцию, можно найти требуемые оптимальные решения.

Для решения задач на среднем и нижнем уровнях иерархии (с учетом применения для процессов предварительной подготовки и последующей переработки ПМ самой разнообразной аппаратуры, которую желательно рассматривать в свете функционирования всей технологической линии, т. е. решать основную задачу ХТС) необходимо иметь в виду следующее.

Анализ основных процессов подготовки и переработки ПМ (проведен на примере стекольных шихт) показал, что обобщающей стороной технологии является процесс активации сырья (механической, химической, термической или их совокупностью) с целью повышения показателей эффективности процесса стекловарения (интенсификация процесса плавления, повышение производительности печи, прогнозирование свойств стекол, снижение безвозвратных потерь компонентов) (рис. 2.3). В связи с этим выделяют пять основных (приоритетных) подсистем, обладающих, с одной стороны, полной автономностью, с другой — тесной взаимосвязью в рамках рассматриваемой технологии (см. рис. 2.3).

1. Подсистема подготовки сырья

Измельчение — образовать из сырья полупродукт с нарушенной кристаллической решеткой заданного гранулометрического состава, часто с удалением влаги и декарбонизацией.

Дозировка — обеспечить отмеривание исходных компонентов в таких количествах, соотношение которых обеспечивает соответствие показателей качества смеси требуемым значениям.

Смешение — получить химически и механически однородную смесь ингредиентов шихты или их групп, иногда с добавлением технологического связующего и отходов основного производства.

Компактирование — получить из многокомпонентного полидисперсного порошка компактные плитки (гранулы) необходимой прочности, плотности и влажности.

II. Подсистема надежности (обеспечения стабильности подготовки)

Структурные характеристики сырья — снизить интенсивность отказов оборудования и интенсифицировать активационные эффекты.

Износостойкость узлов и/или конструкционных материалов — обеспечить заданные технологией режимные параметры процесса.

III. Подсистема оценки качества полупродукта

Активность компонентов и шихты — прогнозировать степень модификации сырья (шихты) и характеристики (структуру) будущих расплавов (стекло, волокон).

IV. Подсистема переработки

Стекловарение — переработать подготовленный полупродукт (шихту) в стекломассу (чаще в стеклоизделия, например, стеклошарики) с заданными характеристиками.

Формование стеклянных нитей — перевести расплав шихты или стеклошариков в твердую фазу — элементарное волокно.

V. Подсистема природоохранной стратегии

Экологическая безопасность и ресурсосбережение — выявить приоритетные загрязнения окружающей среды, минимизировать их и оценить ХТС на соответствие критериям мало- и безотходных технологий.

Таким образом, производственные процессы получения стекла и стеклянного волокна характеризуются большим разнообразием выпускаемой продукции и сложностью. Общим признаком этих процессов является то, что для превращения исходного сырья (отдельных компонентов) в шихту или полупродуктов (шихты, стеклошариков, стекломассы) в целевой конечный продукт — стекловолокно — необходимо большое число функционально разных ступеней подготовки и переработки. Для целенаправленного осуществления этих технологий требуются разные виды энергии, вспомогательных веществ и информации, параметры процесса.

В системном анализе принято деление параметров на входные, управляющие, возмущающие и выходные.

Установить влияние характера взаимодействий разных фаз системы Т—Т; Ж—Т; Г—Т и т. п. (например, порошковой или гранулированной шихты, расплава стекла и его твердых отходов, режимных параметров оборудования и др.) на количество и состав промышленных выбросов, качество стеклоизделий, срок службы оборудования и т. д. можно следующим образом. Графически исходную технологическую линию представляют в виде блок-схемы (прямоугольника), ограничивающего систему, содержащую от двух до шести прямоугольников — *подсистем*. В подсистему входят несколько операторов, отражающих сущность технологической операции или операций, выполняемых в машине или агрегате. Границы оператора совпадают с границами такой машины или операции. Оператор содержит один или несколько *процессоров*, под которыми в данном примере понимают физико-химические процессы. Связи между операторами выражают в виде линий материальных потоков. Изображения типовых процессоров представлены на рис. 2.4.

Анализ операторной модели линии, целей подсистем и их параметров показал, что работу всей системы определяют подсистемы образования компактированной шихты и стекломассы. При их исследовании и функциональном анализе целесообразно рассматривать систему не машин и аппаратов, а протекающих в них процессов. Технологический процесс может быть представлен как преобразование множества входов (исходное состояние шихты) в множество выходов (промежуточное или конечное состояние изделия).

Сложный характер взаимосвязей элементов подсистем может быть выявлен при использовании статистических методов планирования эксперимента и вычислительной техники.

Таким образом, результаты системного анализа можно использовать для разных целей: сбора информации о процессах и структуре связей между элементами и подсистемами в зависимости от технологических и конструкционных параметров систем, составления топологических моделей, многофакторных экспериментов в производственных условиях, а главное — при синтезе новых технологических схем, обеспечивающих работу линии в оптимальном режиме по эколого-экономическим показателям.

Рассмотрим в общем виде некоторые варианты применения операторной модели по указанным целям.

Производство ПМ состоит из множества процессов, на которые влияет огромное количество факторов. При оптимизации таких процессов с помощью многофакторного эксперимента используют априорное ранжирование факторов и определяют их уровни. Важно правильно выбрать критерий оптимизации (например, ка-

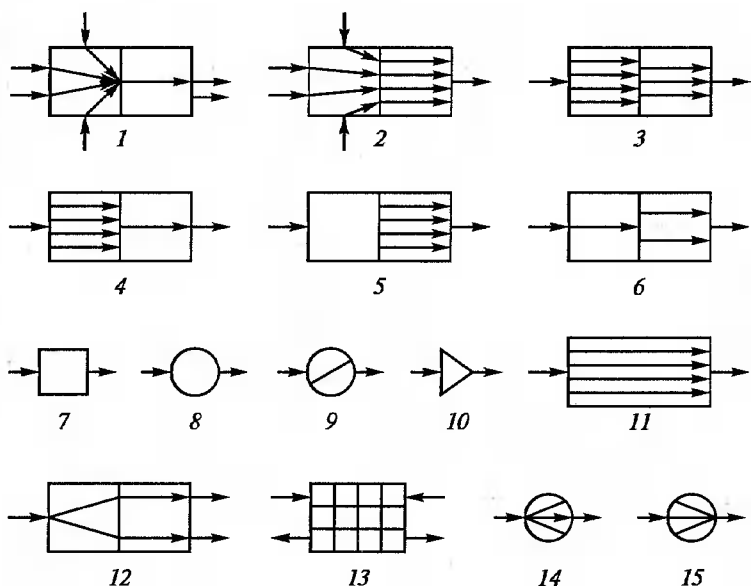


Рис. 2.4. Схема из 15 процессоров производства стекловолкна:

1 — соединение без сохранения поверхности раздела исходных компонентов (стадия силикатообразования); 2 — соединение с сохранением поверхности раздела исходных компонентов исходной шихты (смешение); 3 — уплотнение (компактирование) шихты с частичным сохранением поверхности раздела исходных компонентов при небольшом или среднем давлении прессования; 4 — компактирование шихты без сохранения поверхности раздела компонентов при высоком давлении прессования; 5 — дробление; 6 — комплекс физических, химических, тепло- и массообменных процессов; 7 — формование стекломасс; 8 — термообработка (нагрев, расплавление, отжиг, охлаждение); 9 — изменение агрегатного состояния; 10 — дозирование; 11 — перемешивание шихты без изменения агрегатного состояния; 12 — разделение (классификация); 13 — вторичное использование (рекуперация) теплоты; 14 — формование пучка волокон; 15 — соединение пучка волокон в нить

чество изделия, экологическую безопасность процесса или материала, комплексность применения сырьевых, вторичных и энергетических ресурсов, стабильность процессов, протекающих в подсистемах, и т.д.). Таких критериев может быть несколько, и они определяются конкретными условиями производства. Выбранный критерий связывает существенные факторы в математическую модель (полином). Применяя статистические методы планирования эксперимента, в зависимости от цели работы минимизируют или максимизируют критерий оптимизации. Например, определяют минимум предельно допустимых выбросов (ПДВ) по целевому или токсичному компоненту, или максимум ВМР — вторичных материальных ресурсов (возвратных или покупных), при-

меняемых как основной ингредиент смеси при сохранении стабильности комплексного показателя качества изделий. Причем в качестве управляющих факторов могут использоваться параметры разных подсистем: влажность порошковой шихты или гранул, плотность и прочность гранул, режимные характеристики оборудования, выбросы (сбросы) в биосферу, здоровье человека и т. д.

Рассмотрим с учетом накопленного опыта и последних достижений науки и техники реализацию принципов формирования и синтеза ХТС рассмотренных уровней иерархии, а затем — особенности их функционирования.

2.3. Алгоритм системной разработки и/или усовершенствования ресурсо-, энергосберегающей техники

Основой для выбора конструкции аппарата являются технико-экономические и экологические показатели. Например, производство минеральных удобрений, относящееся также к сложным ХТС, можно представить независимо от осуществляемого процесса всего *тремя группами* аппаратов (после декомпозиции, например, по способу смешения с помощью: I — движущегося корпуса; II — механического активатора; III — газообразного агента).

Первая группа наиболее широко представлена в технологии удобрений вращающимися барабанами (гладкостенными и с насадкой) и применяется для гранулирования, химического взаимодействия, сушки, охлаждения и ряда других процессов. Вторая группа — это, главным образом, емкостная аппаратура с перемешивающими устройствами, дробилки, грохоты. Наконец, группу со стационарными механическими элементами составляют аппараты колонного типа и с псевдоожиженным слоем. Последние пригодны для гранулирования, классификаций по размерам, тепло-, массообменных процессов.

Современная технология минеральных удобрений в зависимости от исходного сырья, качества конечного продукта, степени отработанности процесса, наличия требуемого оборудования, экологических условий в зоне строительства завода и других показателей может осуществляться по разным схемам. Например, только производство фосфатов аммония реализовано в промышленности в пяти вариантах, а исследованных и отработанных в промышленных условиях вариантов значительно больше.

Однако все технологические схемы предусматривают одновременное или последовательное осуществление таких операций, как тонкое измельчение фосфоритного сырья, смешение порошка фосфоритной муки с кислотой или смешение газообразного, жидкого аммиака с кислотой, осуществление химической реакции с вы-

делением тепла, выходом газообразной фазы, выпаривание образовавшихся пульп, гранулирование из жидкости с последующей сушкой или охлаждением, смешение фаз в разном сочетании и получение продукта с широким диапазоном физических свойств, классификация по размерам, дробление, охлаждение гранулированного продукта, очистка отработанных газов от пыли и вредных примесей.

Эти процессы реализуются в указанных выше *трех группах аппаратов*, что позволяет при подборе оборудования линии свести к минимуму число типов используемой аппаратуры, упростив ее эксплуатацию и ремонт. В технологии удобрений можно выделить несколько стадий производства, обладающих достаточной автономностью, независимо от схемы. Эта самостоятельность характеризуется получением полупродукта определенного качества. В любой технологии удобрений присутствует смешение реагентов и осуществление химической реакции; предварительное удаление влаги сушкой или выпаркой; гранулирование и окончательное удаление влаги; классификация по размерам и дробление крупной фракции; охлаждение готового продукта; абсорбция вредных примесей из отходящих газов. Последний процесс является вспомогательным в получении продукта, но основным для охраны окружающей среды и здоровья людей и должен рассматриваться особо.

Приведенное деление условно, поскольку каждый процесс включает, как правило, в той или иной мере элементы всех групп, а для успешного ведения любого процесса необходимы определенного качества гомогенизация или разделение компонентов. В зависимости от кинетики процесса проводят смешение: с последующим выводом смеси в виде готового продукта; с последующим разделением компонентов; с обновлением поверхности контакта ее скоростью, согласованной со скоростью химической реакции или тепло-, массообмена. Один и тот же тип смешения требуется в разных по своей сущности процессах, в связи с чем они могут осуществляться в конструктивно сходных смесителях [10].

Операторная модель производства стеклянного волокна (рис. 2.5) является базовой схемой для реализации в промышленности комплекса новых малоотходных и экологически чистых производств и выбора оптимальных режимов их функционирования.

В систему входят следующие подсистемы, операторы и процессы.

А. Подсистема выработки непрерывного стеклянного волокна с показателями качества, соответствующими стандарту:

1. Оператор выработки непрерывного стекловолокна (процессы: 1 — намотки стеклонити на бобины, 2 — смачивания (склеивания) пучка волокон замасливателем, 3 — формирования пучка волокон, 4 — расплавления стеклошариков, 5 — дозирования стеклошариков).

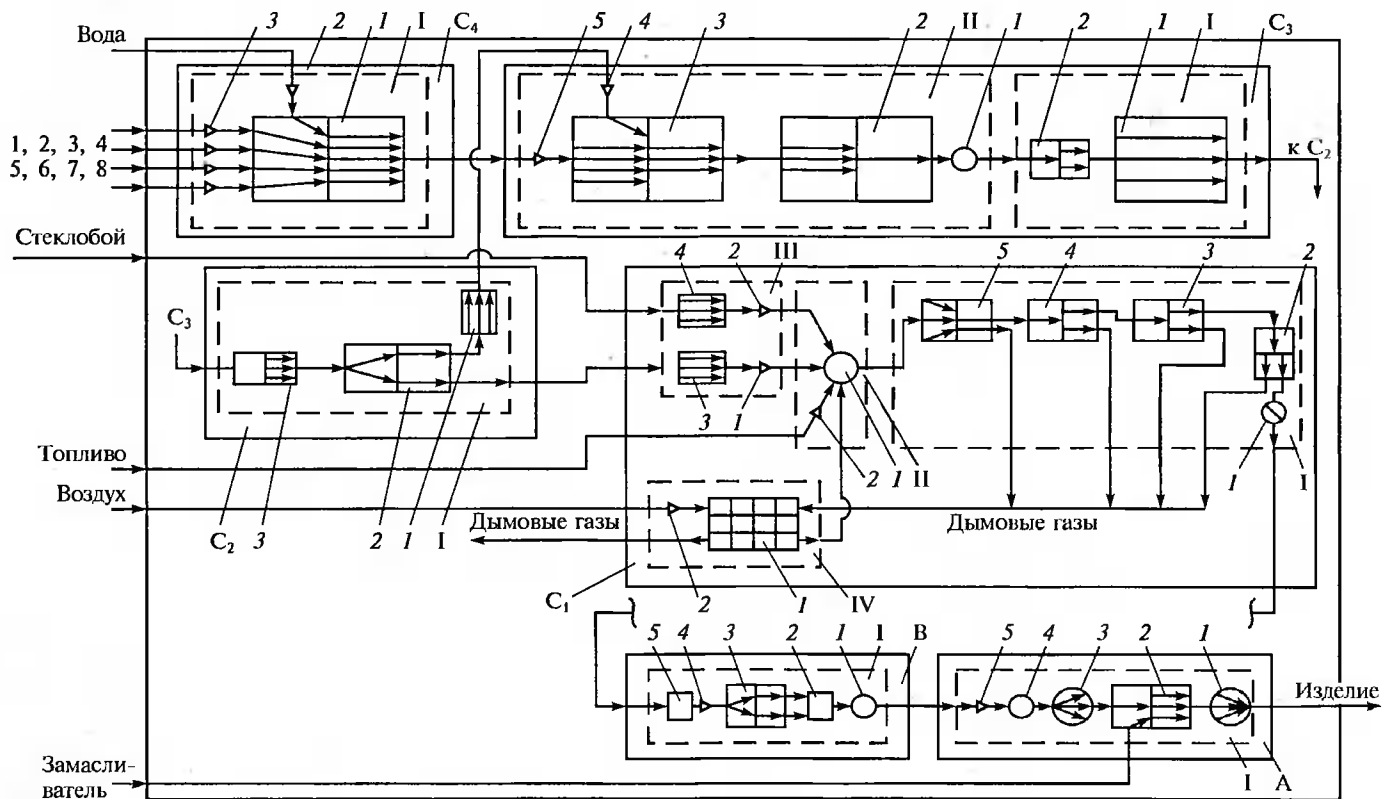


Рис. 2.5. Операторная модель линии производства стеклянного волокна:

1 — песок; 2 — глинозем; 3 — мел; 4 — доломит; 5 — борная кислота; 6 — нитрат кальция; 7 — плавиковый шпат; 8 — мышьяк

В. Подсистема выработки стеклянных шариков:

I. Оператор выработки готовых стеклошариков (процессоры: 1 — охлаждения отжига готовых стеклошариков, 2 — формования (обкатывания) заготовок стеклокапли в шарики, 3 — транспортировки заготовок стекломассы, 4 — дозирования струи стекломассы на заготовки, 5 — формирования струи стекломассы).

С₁. Подсистема образования стекломассы из компактированной шихты с заданными показателями.

I. Оператор образования стекломассы из компактированной стеклошихты с заданными показателями (процессоры: 1 — охлаждения (студки) стекломассы, 2 — гомогенизации стекломассы, 3 — осветления стекломассы, 4 — стеклообразования, 5 — силикатообразования).

II. Оператор пламенного нагрева стекломассы (процессоры: 1 — пламенного нагрева стекломассы, 2 — дозирования топлива).

III. Оператор дозирования и загрузки компактированной шихты и стеклобоя (процессоры: 1 — дозирования компактированной шихты, 2 — дозирования стеклобоя, 3 — транспортировки компактированной шихты, 4 — транспортировки стеклобоя).

IV. Оператор использования (утилизации) тепла отходящих газов (процессоры: 1 — утилизации тепла отходящих газов, 2 — дозирования воздуха).

С₂. Подсистема классификации компактированной шихты по фракциям.

I. Оператор классификации компактированной шихты (процессоры: 1 — транспортировки возвратных фракций мелочи, 2 — классификации компактированной шихты по фракциям, 3 — дробления компактированной шихты).

С₃. Подсистема образования компактированной шихты с заданными технологическими и структурно-деформационными свойствами.

I. Оператор охлаждения и упрочнения компактированной шихты (процессоры: 1 — транспортировки компактированной шихты и просыпи, 2 — упрочнения компактированной шихты за счет протекания твердофазных реакций и тепломассообменных процессов).

II. Оператор образования компактированной шихты в виде плитки с заданными технологическими и структурно-деформационными свойствами (процессоры: 1 — охлаждения (сушки) плитки после ее выхода из валков, 2 — образования из порошкообразной шихты компактированной в виде плитки, 3 — предварительного уплотнения порошкообразной шихты, 4 — дозирования возвратных фракций мелочи, 5 — дозирования порошкообразной шихты).

С₄. Подсистема увлажнения и смешения порошкообразной шихты.

I. Оператор увлажнения и смешения порошкообразной шихты (процессоры: 1 — смешения исходных компонентов в гомогенную (гетерогенную) смесь, 2 — увлажнения и дозирования связующего компонента, 3 — дозирования компонентов шихты (1—8)).

Для подсистемы образования шихты с заданными свойствами оператор образования плитки (валковой пресс) может характеризоваться группой параметров, определяющих ход физико-химических процессов и состояние подсистемы в текущий момент.

Аналогично анализируют операторную модель с эколого-экономических позиций (ранжируют факторы экологической безопасности и ресурсосбережения, сопоставляют параметры и т. п.).

Список литературы

1. *Смирнов В. Н.* Системное исследование показателей качества изделий. — Л.: Машиностроение, 1981. — 183 с.
2. *Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Арутюнов С. Ю.* Системный анализ процессов химической технологии. — М.: Наука, 1985. — 440 с.
3. *Бальцер Д., Вайс В., Викторов В. К.* Химико-технологические системы. — Л.: Химия, 1986. — 424 с.
4. *Попов Ю. П., Брянская Э. А., Смирнов Л. А.* Многовариантный синтез оптимальных химико-технологических схем и аппаратуры / Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения. — М.: Изд-во МИХМ, 1983. — С. 39—43.
5. *Калыгин В. Г.* Промышленная экология. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. — 240 с.
6. *Кафаров В. В.* Принципы создания безотходных производств. — М.: Химия, 1982. — 288 с.
7. Политехнический словарь / Редкол.: А. Ю. Ишлинский и др. — М.: Советская энциклопедия, 1989. — 656 с.
8. Безопасность жизнедеятельности / Под общей ред. С. Ф. Гребенникова. — СПб.: Лань, 2001. — 304 с.
9. *Кафаров В. В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: Химия, 1985. — 448 с.
10. *Гришаев И. Г., Назаров В. И.* Оборудование для механических процессов химической технологии. — М.: Изд-во МИХМ, 1989. — 88 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте развернутое определение ТС и ХТС.
2. Какой методологический подход к анализу является основным в промышленной экологии?
3. Почему в промышленной экологии особенно важен системный анализ (блочно-модульный подход)?
4. Какие методы исследования используются в системном анализе (блочно-модульном подходе)?
5. Каковы основные этапы процесса системного исследования при изучении промышленных объектов: типового оборудования, технологической линии, цеха и т. п.?
6. Какова цель заключительного этапа в системном анализе (блочно-модульном подходе)?

ФОРМИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТС И ХТС

Принцип системности на основе блочно-модульного подхода (независимо от сферы производства) заключается в сборе и учете необходимых, достаточных и приоритетных факторов или компонентов, которыми определяется экологическая безопасность любых технологий.

Важнейший принцип системного анализа сводится к следующему: процесс принятия решений должен начинаться с выявления и четкого формулирования конечных целей; всю проблему необходимо рассматривать как единое целое; необходим анализ альтернативных путей достижения целей; подцели не должны вступать в конфликт с общей целью (подробно см. гл. 2, а также [1—4]).

Подсистемы, в которых должны учитываться требования промышленной экологии, образуют полный цикл производственной деятельности: научный замысел; исходные и технико-экономические данные; научно-исследовательская работа; проект; промышленное производство; эксплуатация — модернизация — ремонт; ликвидация. Выполнение условий безопасности на каждой стадии предопределяется не только техническими и экономическими показателями, но и экологической ответственностью в системе «биосфера — человек — техносфера».

Рассмотрим вариант формирования и синтеза энергосберегающих и экологически безопасных ТС и ХТС на примере использования ПМ в производстве стекла и стеклянного волокна (см. рис. 2.3).

3.1. Подсистема подготовки сырья

Измельчение

Процесс измельчения сыпучих материалов — один из основных типовых процессов ХТС на первой ступени иерархической структуры химического производства [2—4]. Степень дисперсности сыпучих материалов во многом предопределяет их дальнейшее поведение в последующих химико-технологических процессах, а подходящие методы измельчения, как правило, способствуют увеличению поверхности частиц в результате уменьшения их средней крупности в узких пределах гранулометрического состава — при незначительном отклонении от средней величины. Требования, предъявляемые к методу измельчения, зависят от ряда параметров. Известно, что основными ингредиентами полидис-

персной многокомпонентной стекольной шихты являются частицы тугоплавкого кварцевого песка (52—60 масс. %, твердость по Моосу 6,5—7,0) и карбонатного сырья (35—40 масс. %, твердость по Моосу 3,0—4,0). Их размеры и степень дефектности кристаллических решеток существенно влияют на скорости отдельных стадий процесса стекловарения.

Кварцевый песок и карбонатное сырье измельчают в газоструйных, аэробильных, шаровых и валковых мельницах.

На рис. 3.1 представлен аппарат серии *JOM* (Япония) для измельчения порошков типа кварцевого песка и известняка. Сырьевой материал выгружается из сырьевого бункера, разгоняется до сверхзвуковой скорости поступающим из сопла трубы Вентури сжатым воздухом и подается во внутреннюю часть аппарата.

В зоне измельчения, образованной текучей средой, нагнетаемой из сопел, установленных в нижней части аппарата, сырьевой материал разрушается за счет энергии удара и трения. После измельчения порошок поднимается по восходящей трубе и подводится в узел классификации, где мелкие фракции отделяются направляющей лопаткой, а крупные спускаются по нисходящей трубе и смешиваются с загруженным сырьевым материалом для повторного измельчения.

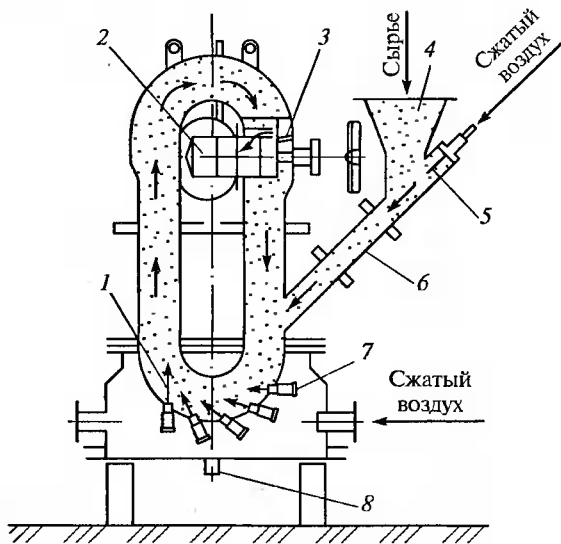


Рис. 3.1. Струйный измельчитель серии *JOM* (Япония) для кварцевого песка и известняка:

1 — зона измельчения; 2 — выгрузка; 3 — направляющая лопатка (узел классификации); 4 — сырьевой бункер; 5 — сопло толкателя; 6 — труба Вентури; 7 — сопло для измельчения; 8 — дренаж

Основные режимные параметры измельчителей.

| | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| Тип JOM | 0101C 4C | 0202C 4C | 0304F 4C | 0405F 4C | 0608F 4C | 0808F 4C |
| Давление, МПа | | | 0,65 | | 0,65—0,70 | |
| Расход воздуха, м ³ /мин | 1,0 | 2,6 | 7,6 | 16,1 | 26,4 | 35,0 |
| Потребляе- мая электро- энергия, кВт·ч | 11 | 22 | 55 | 125 | 150 | 220 |
| Производи- тельность, кг/ч | 0,5—2,0 | 2,0—20 | 20—100 | 50—300 | 200—600 | 400—1000 |

Достоинства струйных измельчителей — низкая металлоемкость, однородный гранулометрический состав измельченного материала и возможность полной автоматизации процесса.

Отечественной промышленностью разработан пневмоимпульсный измельчитель серии ИП, входящий в установку УИП для переработки порошков [5]. В основу его работы заложен метод нестационарного движения под действием перепада статического давления и ударного взаимодействия с отбойной поверхностью высококонцентрированных поршневых масс дисперсного материала. Помол осуществляется самоизмельчением частиц материала в области отбойной поверхности измельчителя. Аппарат позволяет совмещать измельчение и внутрицеховой пневмотранспорт продукта помола на расстояния до 50 м. Производительность по измельчению, например, кварцевого песка достигает 200 кг/ч при удельном расходе сжатого воздуха 0,48 кг/кг материала и рабочем давлении 0,6—1,0 МПа, а средний размер частиц D (50%) составляет 73 мкм.

На основе уравнения баланса концентрации компонентов в корпусе аппарата показано, что процесс помола многокомпонентных смесей стремится к установившемуся режиму, при котором концентрации компонентов в продукте помола равны исходным. Концентрация i -го компонента j -й фракции в корпусе измельчителя при установившемся режиме

$$E_{ij} = E_{i0} / [K_i \sum_{j=1}^m (E_{i0} / K_j)], \quad (3.1)$$

где K_i , K_j — параметры, характеризующие относительный выход из аппарата измельченного i -го компонента j -й фракции; E_{i0} — объемное содержание i -го компонента в исходной смеси; N — количество фракций.

Модификацией широко известных струйных мельниц являются газоструйные противоточные мельницы для тонкого и сверх-

тонкого измельчения продуктов. Мельница СММ-39 позволяет получать частицы готового продукта от 2 до 200 мкм при удельных энергозатратах порядка 35 кВт · ч/т. Разновидность этой мельницы — установка, разработанная Днепропетровским горным институтом. Энергоносителем в ней является нагретый воздух или газозвудушная смесь. Исходный кварцевый песок с частицами размером $\leq 0,8$ мм и влажностью до 0,5 масс. % через дозатор по течкам поступает в инъекционные узлы, где увлекается скоростным потоком горячего воздуха (сжатого до 0,35—0,40 МПа) с одновременным термическим ударом ($\Delta t \sim 500^\circ\text{C}$) и в разгонных трубках ускоряется до 300—400 м/с. Измельчение в пересечении потоков струй происходит вследствие лобового удара и истирания одних частиц о другие, а также о футеровку помольной камеры. В классификаторе недоизмельченный порошок отделяется и поступает на повторное измельчение. Годные фракции улавливаются в циклонах готового продукта. Отработанный воздух после очистки в фильтре выбрасывается в атмосферу. Мельница может работать в разных аэродинамических и температурных диапазонах. Конструкция газоструйного измельчения компактна, легко вписывается в габариты подготовительных цехов, а, главное, позволяет непрерывно измельчать компоненты шихты.

Ударно-отражательные измельчающие устройства (аэробильные мельницы) используются для получения мелкодисперсных порошков доломита, известняка и мела. В отличие от других измельчающих устройств эти мельницы (например, *Dry Mill*, Италия) при простоте конструкции имеют меньшие энергозатраты и позволяют получать тонкоизмельченный продукт, прошедший частичную декарбонизацию. Это можно объяснить доминирующим влиянием на процесс ударного высокотемпературного измельчения трех разных скоростей взаимодействия частиц материала с рабочими элементами машины, определяемых движением исходного материала, газовой и дисперсной фаз.

Результат анализа степени влияния разных факторов на осредненное движение частицы — уравнение

$$m \frac{dv}{dt} = F_c + F_{ц.б} + F_{кор} + F_{тр}, \quad (3.2)$$

где m и v — масса и скорость частицы соответственно; F_c — сила аэродинамического сопротивления; $F_{ц.б}$ — центробежная сила инерции; $F_{кор}$ — кориолисова сила; $F_{тр}$ — сила трения скольжения, возникающая при движении частицы материала вдоль рабочих элементов мельницы.

Зная зависимости изменения скорости воздушного потока в роторе мельницы от скорости его вращения, а также граничные условия, можно определить энергетические характеристики движения

частиц материалов в любой зоне измельчителя и, следовательно, скорость их взаимодействия с рабочими элементами мельницы.

Проведенные исследования показали возможность получения в газоструйных и аэробильных мельницах тонкомолотых материалов с заданной для стекловарения гранулометрией, исключая наличие в шихте частиц карбонатного сырья размером > 200 мкм и кварцевого песка > 400 мкм.

Для эффективного измельчения порошков с разными физико-механическими свойствами и получения заданных в дальнейшей технологии их характеристик рекомендуется также использовать вибрационные и валковые мельницы, не нашедшие пока широкого применения в промышленности.

Дозировка

Операциям дозирования компонентов отводится важное место в подсистеме подготовки монгокомпонентных полидисперсных порошковых материалов (МППМ). Именно на участке дозирования реализуются управляющие воздействия, вырабатываемые системами верхних уровней, осуществляющих оптимизацию и стабилизацию качества продукта смешения, компактирования, стекловарения и формования стеклянного волокна.

Для дозирования шихтовых материалов применяют дозаторы с регулированием расхода по скорости и по сечению потока, а для запираания их гравитационного истечения используют механические заслонки или затворы с электромагнитным или электромеханическим приводами. Однако существующие дозаторы (с барабанными питателями, питателями диафрагменного типа и др.) не всегда удовлетворяют возросшим требованиям к точности дозирования.

Для оценки фактического среднего значения расхода (производительности) дозируемого компонента делается выборка некоторого числа проб с измерением их масс. Затем определяют среднюю массу проб, производительность, доверительный интервал оценки среднего значения и представительность выборки. Учитывая, что компоненты шихты и сама шихта обладают невысокой сыпучестью и склонностью к сводообразованию, основной задачей дозирования является обеспечение заданного в соответствии с рецептом химического состава стекла расхода смешиваемых материалов. В общем случае погрешность дозирования

$$\Delta \leq \left| \int_{t_i}^{t_i+t} Q(t) dt - \int_{t_i}^{t_i+t} Q_{\text{зад}}(t) dt \right|, \quad (3.3)$$

где $Q(t)$ и $Q_{\text{зад}}(t)$ — фактический и заданный расходы за время t .

В промышленности для дозирования могут использоваться дозаторы как автоматические, так и без автоматического регулиро-

вания [6, 7]. Использование автоматических систем дозирования повышает качество готовых изделий, надежность и производительность процесса. Погрешность дозаторов фирм *Atlas-MAK Maschinenbau GmbH*, *Philips Industrial Elektro-Acoustic Systems Division* (ФРГ) не превышает $\pm 1\%$. Управление процессом дозирования с помощью микрокомпьютера обеспечивает погрешность дозирования $0,3-0,6\%$.

Точность дозирования кроме конструкционных факторов обусловливается устойчивым истечением сыпучих материалов, для чего используют дополнительное воздействие (вибрацию). Наиболее перспективны беззатворные электромагнитные вибрационные (бесшумные) питатели, в которых при отсутствии вибрации происходит самозапирание потока за счет образования на рабочих органах насыпей под углом естественного откоса (рис. 3.2). В зависимости от уровня подводимой к материалу энергии вибрации возможны уплотнение или псевдооживление материала, в частности, с циркуляционным движением, приводящее к дополнительным затратам энергии. Энергия диссипации ΔE *выгружаемого материала*:

$$\Delta E = \frac{\rho_s}{4} \int_0^l \int_0^h \left[[v_x(x, y)]^2 + [v_y(x, y)]^2 \right] dx dy, \quad (3.4)$$

где ρ_s — поверхностная плотность материала при его свободной засыпке; l, h — ширина и высота бункера; v_x, v_y — проекции скорости частиц материала.

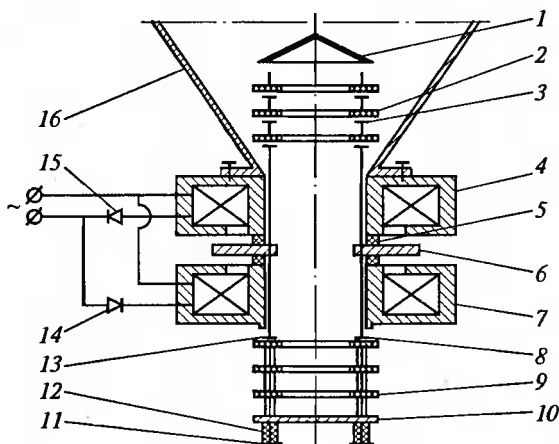


Рис. 3.2. Схема комбинированного вибрационного питателя:

1 — стабилизатор давления; 2, 9 — кольцевые диски; 3, 8, 11 — упоры; 4, 7 — электромагниты; 5 — упругая система; 6 — якорь электромагнитов; 10 — распределительный диск; 12 — упругий элемент; 13 — стержень; 14, 15 — диоды; 16 — расходный бункер

С использованием морфологической карты рабочего органа дозатора разработан ряд конструкций питателей, позволяющих осуществить связное, т.е. поэтапное, дозирование компонентов шихты. Комплектация весовых линий (особенно организованных по круговой схеме, основанной на принципе «единый бункер») такими устройствами повышает точность дозирования, производительность и значительно уменьшает габаритные размеры дозаторов. При снабжении скобой-заслонкой их можно использовать в системах пылегазоочистки в качестве пылевых затворов. Для каждого варианта дозирования или пылевыгрузки должна быть составлена с учетом рекомендаций [6, 7] определенная структурная схема или предложен определенный алгоритм управления процессом.

Смешение

На качество выпускаемого стекловолокна существенно влияет процесс смешения шести—десяти компонентов шихты с размером частиц от 5 до 800 мкм. Цель смешения — получение однородной смеси из компонентов с разными фракционными и химическими характеристиками, а также — в ряде случаев — ввод увлажняющих добавок.

Отечественной промышленностью разработаны смесители нескольких типов специально для порошкообразных материалов: периодического действия — с Z-образными лопастями (ЗЛ), с ЗЛ и загрузочным шнеком (ЗШ), планетарно-шнековые (ПШ), ленточные (Лн), плунжерные (Пж), центробежные лопастные (ЦЛ); комбинированного действия (Км) — на базе двух последовательно соединенных ЦЛ-смесителей, барабанные (Бн), пневматический сопловый (ПС), непрерывного действия — центробежный НДЦ-630, двухшнековый СНД и др. [8].

В настоящее время в цехах приготовления шихты для стекловарения применяют тарельчатые, роторные и реже пневмоструйные смесители периодического и полупериодического действия.

Тарельчатые смесители СБ-951; СБ-138А Славянского машиностроительного завода предназначены для приготовления бетонных смесей и строительных растворов. Использование их для смешения компонентов стекольной шихты приводит к появлению «мертвой» зоны, в которой шихта перемешивается менее интенсивно. Это вызывает значительные отклонения химического состава по массе от заданного, а несовершенная система местного отсоса вносит дополнительные отклонения от заданного рецепта шихты за счет уноса из объема смесителя легколетучих компонентов. Те же недостатки наблюдаются у смесителей для стекольных шихт СТ-700М и ВА-248.

Смесители аналогического класса Серпуховского механического завода модели ВА-350 и фирмы *Eirich* (ФРГ) серии *R*, *RV*, *МРМ* не имеют таких недостатков. Смесь может готовиться порциями или непрерывно.

В процессе смешения обеспечивается постоянная циркуляция всего объема шихты, отсутствует налипание сырья на дно и стенки тарели (корпуса).

Техническая характеристика тарельчатых смесителей

| Модель | R18 | RV18 | R23 | RV23 | СБ-138А | ВА-350 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| Вместимость, л/кг | $\frac{1125}{1800}$ | $\frac{1500}{2400}$ | $\frac{2250}{3000}$ | $\frac{3000}{4800}$ | $\frac{1500}{-}$ | $\frac{800}{-}$ |
| Максимальная мощность приво- да, кВт: | | | | | | |
| тарели | 15 | 22 | 2×15 | 2×22 | — | — |
| ротора | 92 | 110 | 132 | 160 | 37 | 18,5 |
| узла разгрузки | 3 | 3 | 4 | 4 | Пневмопривод | |
| Масса без матери- ала, т | 4,5 | 5,0 | 7,5 | 8,2 | 4,7 | 2,75 |

Фирма *JBAG* (ФРГ) разработала высокоскоростной смеситель стекольной шихты *Contra-Mix* в котором интенсивное перемешивание достигается встречным вращением трех групп рабочих органов в двух уровнях неподвижного корпуса (тарели), создающим высокие скорости движения одних частиц шихты относительно других при их низкой скорости относительно стенок корпуса смесителя, благодаря чему снижается его износ. Исключается расслаивание МППМ под действием центробежных сил. Смеситель может работать как в периодическом, так и в непрерывном режимах, иногда оснащается специальными рабочими органами для перемешивания стеклобоя. Время смешения уменьшено вдвое по сравнению с существующими смесителями.

Фирма *WAB* (ФРГ) разработала смеситель «Турбула» системы «Шац», реализующий принцип трехмерного, ритмически пульсирующего движения. Смесь находится в закрытых емкостях, которые могут одновременно служить контейнерами для транспортировки или хранения. В этом случае гарантируется качество смешения и отсутствие пылевых выделений. Вместимость смесителей может изменяться от 30 кг (марка T10B) до 500 кг (марка T500).

Фирма *Metalchim* (Польша) разрабатывает механические смесители, аналогичные отечественным типа ПШ-630ВКБ серии *SWW-0751-441* и *MS21*, *MS41* со встроенным перемешивающим и транспортирующим шнеком вместимостью 1,4 и 2,8 м³ с мощностью 5,5 и 7,5 кВт.

Фирма *Dynamic Air* (Великобритания) разработала силосный смеситель *Blendon* для эффективного и скоростного смешивания крупных порций сухих материалов (до 180 т).

Принцип смешения основан на использовании кинетической энергии импульсов сжатого газа с помощью инжекторов, образующих кольцо. Возможность регулирования продолжительности и частоты импульсов, а также давления и объема воздуха позволяет оптимизировать режим смешения в каждом конкретном случае. Например, порция компонентов шихты массой 18 т смешивается за 4 мин. Отработанный запыленный воздух пропускается через фильтр, а уловленный материал возвращается повторно в смеситель.

Фирма *Gardners* (Великобритания) выпускает специализированные для стекольных шихт смесители серий: *H*, в которых смешение осуществляется с помощью вала, снабженного прерывистой спиральной лопастью (отечественный аналог — ЗЛ); *L* — рабочим элементом является прерывистая спиральная лента (отечественный аналог — Лн); *E* — высокоскоростные лотковые смесители (отечественный аналог НДЦ-630).

Отличительные достоинства смесителей зарубежных фирм — их комплектация системами подогрева шихты (*Teka Maschinenbau GmbH* и др.), приборами для измерения температуры, влажности (*Maschinenfabrik Sustav Eirich* и др.) и, главное, компьютерными управляющими устройствами с монитором. Модуль включает разные программы, в том числе проверки заданных величин, автоматической оптимизации, контроля допусков, статистики расхода компонентов и шихты.

Комплексное изучение и анализ процесса смешения борсодержащих шихт свидетельствуют о перспективности пневмоструйных смесителей [9, 10]. Это подтверждает и зарубежный опыт фирм *Woodall-Duckham* и *Gardners* (Великобритания). Такой смеситель расходует меньше энергии, чем смесители серий *H*, *L*, *E*.

На рис. 3.3 представлен пневмоструйный смеситель *Woodall-Duckham*, выполняющий одновременно функцию транспортера шихты. При вместимости бункера 1250 кг время смешивания не превышает 2—3 мин, а расход воздуха — 425 м³/ч. Объем рабочей камеры отечественного смесителя ПС-100 ВБК-01 всего 0,2 м³ явно недостаточен.

В настоящее время разработан смеситель, не уступающий по технико-экономическим показателям зарубежным аналогам (рис. 3.4) [9,10]. Достоинством таких смесителей, кроме возможной активации высокооднородных МППМ и их транспортировки, является полное решение экологической проблемы. Степень очистки газа составляет 98—99,9 % в зависимости от характеристик материала. Построение математической модели пневмоструйных смесителей предложено базировать на основе теории случайных

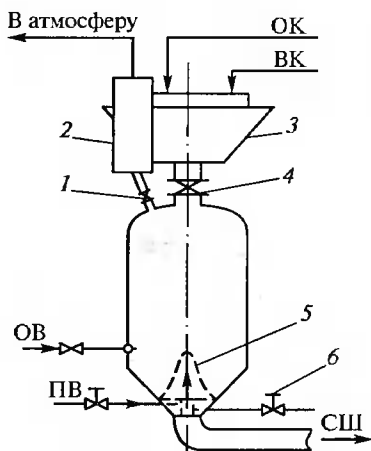


Рис. 3.3. Пневмоструйный смеситель-транспортер:

1 — воздушный клапан; 2 — фильтр рукавный; 3 — весы; 4 — впускной клапан; 5 — конусный клапан; 6 — соленоид конусного клапана; ОК и ВК — основные и вспомогательные компоненты; ОВ и ПВ — основной и подмешиваемый воздух; СШ — смешанная шихта

марковских процессов [2, 5]. При этом предполагается, что переменное силовое поле, воздействующее на частицы, можно разложить на элементы с направленным движением потоков и высокой эффективностью. В объеме смесителя можно создать несколько таких точек и образовать из них ядро. В этом случае процесс рассматривается в виде ячеечной модели с циркуляцией потоков.

В качестве новейших необходимо отметить смесители непрерывного действия, например многоступенчатые ротационные смесители с внутренними устройствами в виде дисков сложной формы, образующих байпасные области, в которых и происходит процесс смешения. К этой группе смесителей относятся также центробежные со сложным (или простым) движением рабочего органа, гравитационные полочные и др. Отмечается высокое качество получаемых смесей по сравнению, например, со смесителем типа «Intoleter» английской фирмы *Henry Simon Ltd*.

Квалифицированный подход к выбору рационального типа механических смесителей (РТМ26-01-129-80 «Машины для переработки сыпучих материалов. Методы выбора оптимального типа питателей, смесителей и мельниц») заключается в следующем. Сначала рассчитывают необходимую линейную скорость вращения рабочего органа смесителя

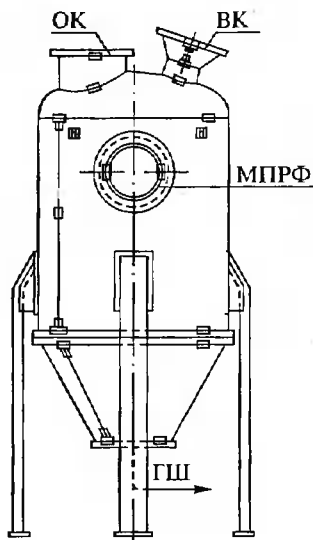
$$v = -5,25 \lg \frac{1600\sigma_g^2}{P(1-P)(C+2)}, \quad (3.5)$$

где σ_g — допустимое значение среднеквадратичного отклонения концентрации ключевого компонента в смеси, масс. %; P — содержание ключевого компонента в смеси, масс. %; C — удельное сцепление смеси (прочность сыпучего материала на разрыв), ГПа.

Рис. 3.4. Пневмоструйный смеситель — измельчитель стекольной шихты (МПРФ — место присоединения рукавов фильтра; ГШ — готовая шихта)

Затем выбирают из каталога те смесители, в которых линейная скорость вращения рабочего органа будет не меньше рассчитанной, а из них — тот, который обеспечивает максимальный технологический эффект, например, степень однородности или скорость прохождения химических реакций. Разработаны разные методики, отражающие достигнутую степень однородности шихты.

Многообразие аппаратного оформления, неоднозначность процесса пространственного распределения компонентов в объеме смеси и его случайный характер затрудняют объективную оценку практической работы того или иного смесителя в технологии шихтоподготовки. Использование методов моделирования, базирующихся на эмпирических методах, способах, основанных на анализе потоков с помощью функции распределения времени пребывания (РВП) частиц потока внутри аппарата, методах механики сплошных сред; энтропийно-информационном, статистическом подходах, упростит анализ работы, ускорит выбор и откроет дополнительные пути усовершенствования смесительной аппаратуры, способов смешения и методов контроля.



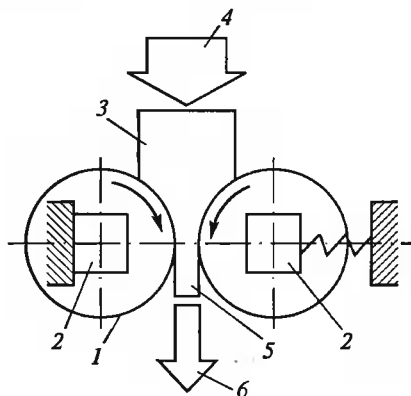
Компактирование

Высокие требования, предъявляемые к шихте: химическая и гранулометрическая однородность, исключение ее расслоения и механического загрязнения, уменьшение затрат на транспортировку и хранение, снижение пыления и испарения компонентов шихты на последующих этапах переработки, делают, как правило, процесс подготовки шихты определяющим при изготовлении высококачественных стекол. Поэтому наряду с традиционной технологией ведутся работы по приготовлению шихты методом гелей, растворов и гидротермального синтеза. С этой же целью начинают использовать гранулированные компоненты или группы компонентов, все чаще применяют шихты, уплотненные на оборудовании разных видов. Наиболее перспективным направлением совершенствования процесса приготовления шихты является ее компактирование на валковых прессах с получением продукта в виде плиток неправильной формы [11—13].

Компактированная шихта дает возможность ее предварительного нагрева перед варкой, сокращения продолжительности процесса стекловарения, повышения производительности стекловаренных печей, экономии топливно-энергетических ресурсов при соблюдении требований промышленной экологии. Кроме того, этот процесс позволяет использовать новые сырьевые материалы, например, борат кальция, которые до настоящего времени не применялись в стекольной промышленности из-за своей нетехнологичности — повышенного пыления, мелкодисперсности, гигроскопичности, низкого насыпного веса и др. Технология отличается простотой, экономичностью, высокой производительностью и включает всего три операции: увлажнение исходных компонентов, компактирование на валковом прессе, классификацию плиток по размерам (для некоторых видов стекол).

В общем случае процесс компактирования происходит следующим образом (рис. 3.5). Исходная шихта поступает в загрузочный бункер пресса и в результате встречного вращения валков, сил трения и адгезии поступает в зазор между ними и уплотняется до плиток требуемой толщины, плотности и прочности. Образующиеся при компактировании плитки и просыпь (часть уплотненной шихты) могут подаваться на ленточный конвейер и элеватором транспортироваться на классификатор (вибрационный двухситный грохот) для классификации по размерам: крупная фракция (6÷10×80×400 мм), товарная фракция (гранулы 1,5—10 мм), нетоварная фракция — просыпь (частицы размером < 1,5 мм). Крупная и товарная фракции ленточным конвейером подаются в бункер-накопитель и далее — к месту загрузки в стекловаренную печь или на склад. Образующаяся просыпь возвращается на повторное компактирование.

На рис. 3.6 представлена аппаратурно-технологическая схема компактирования стекольных шихт разного назначения производительностью до 10 т/ч.



Сырьевые компоненты шихты (кварцевый песок, глинозем, плавиковый шпат и др.), прошедшие стадии предварительной подготовки (перемешивание, увлажнение и транспортировку), направляются, например, по трубопроводу в накопитель-

Рис. 3.5. Принципиальная схема компактирования порошков:

1 — валки; 2 — пресс; 3 — загрузочный бункер; 4 — исходная шихта; 5 — готовые плитки; 6 — просыпь

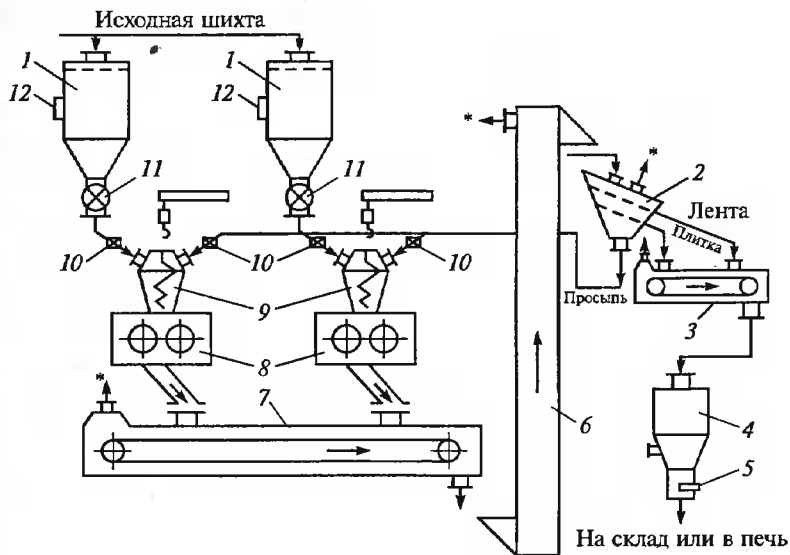


Рис. 3.6. Аппаратурно-технологическая схема для реализации универсальной технологии компактирования стекольных шихт:

1, 4 — бункеры-наполнители; 2 — классификатор (грохот); 3, 7 — конвейеры ленточные; 5 — шибер; 6 — элеватор; 8 — пресс валковый; 9 — бункер расходный; 10 — питатель вибрационный; 11 — дозатор (шлюзовый затвор); 12 — вибратор; * — аспирационный отсос

ный бункер с вибратором, а из него через дозатор в расходный бункер с подпрессователем-смесителем валкового пресса. Основной агрегат установки — валковый пресс конструкции Дзержинского филиала ЛенНИИХиммаш и МГУИЭ — имеет следующие характеристики:

| | |
|---|-----------|
| Диаметр валков, м | 0,52 |
| Длина рабочей поверхности валков, м | 0,16 |
| Частота вращения валков, мин ⁻¹ | 18 |
| Размер сечения загрузочного бункера, м | 0,16×0,40 |
| Высота заполнения бункера шихтой, м | 1,4 |
| Величина регулируемого зазора между валками, мм | 2—8 |
| Давление в гидросистеме, МПа | 10—25 |
| Производительность по плитке, т/ч | 5—6 |

Количество подаваемой шихты на компактирование (нагрузка на рабочую поверхность валков) составляет 300—1200 кг/м³ и регулируется вначале «грубо», например шлюзовым затвором, и затем «плавно» вибрационным питателем. Толщину ленты (плитки) устанавливают в зависимости от максимальных размеров наиболее твердого компонента шихты, например, кварцевого песка с

твердостью по шкале Мооса 6,5—7 ед., которую регулируют в пределах $(1 - 12) d_{\max}$. Скорость компактирования шихты при этом устанавливается в диапазоне 0,02—5,2 м/с.

Для некоторых типов стекольных шихт предусмотрено компактированную шихту после валкового пресса подавать сразу в стекловаренную печь, исключив стадию рассева по фракциям. В схеме предусмотрена очистка воздуха в отделении компактирования шихты. Запыленный воздух от аспирационных отсосов поступает в пылеосадитель и очищенным выбрасывается в атмосферу. Улавливаемая в аппаратах пыль возвращается на повторное компактирование.

В процессе компактирования формируется дисперсная структура, характеризующаяся определенной пористостью, плотностью упаковки кристаллических блоков (активированные и неактивированные компоненты шихты), концентрацией и прочностью фазовых контактов между ними, количеством и видом дефектов отдельных блоков, синтезированных фазовых образований (СФО) и плиток в целом. Характер сформировавшейся структуры компактированной шихты определяет не только ее прочность, но и свойства будущих расплавов и внутреннюю структуру стеклоизделий. Давление, влажность и наличие связующего способствуют повышению и накоплению уплотняемой системой диссипативной энергии, переходящей в тепловую. Эта энергия инициирует процессы разупорядочения кристаллической решетки твердых частиц, существенно интенсифицируя процессы диффузии, ОХР и ТФР (обменные химические и твердофазные реакции) между компонентами смеси. Однако высокое давление, вода или ПАВ способствуют изоморфной кристаллизации и рекристаллизации компонентов смеси и продуктов реакций полимеризации и поликонденсации. В любом случае эти процессы приводят к образованию кристаллов с более совершенной для процесса стекловарения структурой или к получению новых СФО, способствующих резкому снижению скорости диффузии легколетучих компонентов шихты из расплава.

Эффективность процесса, в первую очередь, определяется конструкцией валкового пресса, его надежностью в работе, простотой эксплуатации и износостойкостью валков. Приведенные в табл. 3.1 данные позволяют судить о разнообразии прессового оборудования (каждая фирма выпускает несколько моделей разных габаритов применительно к конкретному продукту). В нашей стране выпущены лишь опытные образцы аналогичного оборудования. Валки прессов изготавливают из легированных чугунов (~ 3 % Cr), или из легированных сталей типа 9Х2, или из обычных конструкционных типа Сталь 40, 45. Наружная поверхность валков закаливается на глубину до 25 мм, а сердцевина валка имеет меньшую твердость для поглощения ударов и вибрации. При обработке вы-

Режимные характеристики валковых прессов

| Пресс конструкции | $D_{в}$, мм | $B_{вз}$, мм | $P_{пресс}$, кН | v , мм/с | $N_{прив}$, кВт | Π , т/ч |
|---|--------------|---------------|------------------|------------|------------------|-------------|
| НИИХИММАШ: | | | | | | |
| вариант А | 400 | 120 | 650 | 0,95 | 10 | 0,5 |
| вариант Б | 520 | 520 | 1500 | 1,8 | 70 | 9 |
| ВНИИГ | 600 | 250 | 180 | 1,6—3,0 | — | 3—7 |
| <i>Zemag Zeitz</i> (ФРГ) | 1000 | 1250 | 3200 | 1,5—2,5 | 400 | 14—19 |
| <i>Humboldt Wedag</i> <i>AG—WP140</i> (ФРГ) | 1400 | 1200 | — | 0,9—1,1 | 400 | 40—100 |
| <i>Hutt-Compactor</i> <i>MS75</i> (ФРГ) | 520 | 230 | 750 | — | 45 | — |
| <i>Komarek-Greaves-2020A</i> (США) | 500 | 500 | 640 | — | 75 | 5 |
| <i>Sahut-Conreur</i> (Франция) | 1000 | 800 | — | — | — | 80 |

сокоабразивных материалов, к которым относятся стекольные шихты, используют валки специальной конструкции (патенты США № 4306846 и № 407215 (рис. 3.7).

Их рабочая поверхность набирается из легкоъемных сегментов (элементов), изготовленных из твердых износостойчивых материалов. Фирмой *Komarek-Greaves* (США) разработан валок,

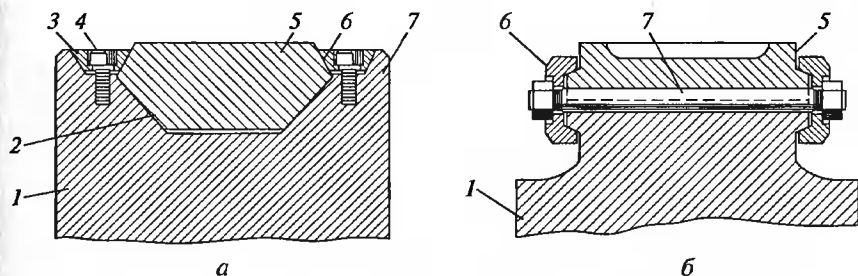


Рис. 3.7. Конструкции прессующего (а) и формующего (б) валков со сменными рабочими элементами:

1 — сердечник валка; 2 — опорная поверхность; 3 — вставка-вкладыш; 4 — винт; 5 — сменный элемент (сегмент); 6 — скоба крепежная; 7 — шпилька

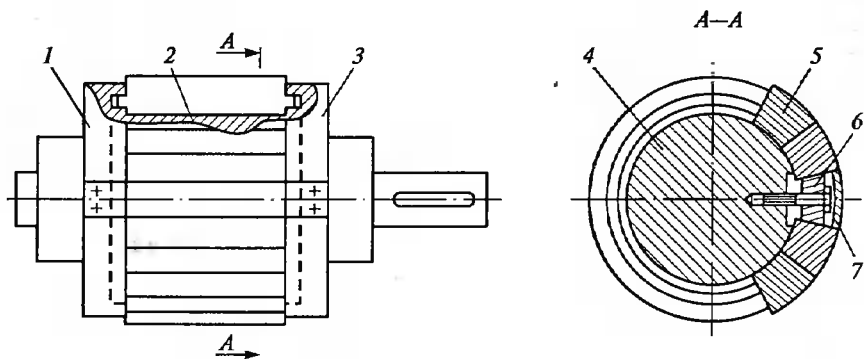


Рис. 3.8. Прессующий валок для компактирования стекловых шихт:
 1, 3 — ребра; 2 — канавка; 4 — сердечник; 5 — сменный элемент; 6 — вставка-фиксатор; 7 — крышка

сменные сегменты которого можно заменить новыми частично или полностью без необходимости демонтажа прессующих узлов. Аналогичные конструкции разработаны в МГУИЭ (Авт. свид. СССР № 1475745, № 1459704, № 1489824, рис. 3.8, 3.9).

Важнейшими геометрическими параметрами компактирования порошкообразных материалов являются центральные углы, определяющие положение некоторых поперечных сечений очага деформации.

Под очагом деформации (см. рис. 3.5) подразумевают объем порошка, расположенный между прокатными валками и боковыми стенками загрузочного устройства бункера и ограниченный сверху сечением, в котором происходит контакт между порошком и обоими валками, а снизу — сечением выхода плитки из валков.



На плотность и прочность получаемого прессата существенно влияют геометрические, кинематические параметры оборудования и характеристики перерабатываемых порошков [11, 14, 15].

Рис. 3.9. Конструкции прессующего валка с разными сменными элементами:

- 1 — шпонка; 2 — вставка-вкладыш; 3 — сердечник; 4 — винт-нож; 5 — сменный элемент; 6 — канавки; 7 — фиксирующая пластина; 8 — крышка; 9 — вставка-фиксатор

Средняя плотность компактированной шихты (плитки)

$$\rho_{\text{ср}} = \rho_{\text{н}} e_v, \quad (3.6)$$

где $\rho_{\text{н}}$ — насыпная плотность порошковой шихты; e_v — среднее интегральное значение относительной объемной деформации в зоне уплотнения.

Максимальное давление

$$P_{\text{max}} = \frac{2k \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \exp \left[\frac{2fR\alpha_{\text{н}}(1 + \sin \varphi)}{h_{\text{п}}(1 - \sin \varphi)} \right], \quad (3.7)$$

где k — коэффициент внутреннего трения; φ — угол внутреннего трения; $\alpha_{\text{н}}$ — нейтральный угол; f — коэффициент внешнего трения; R — радиус валка; $h_{\text{п}}$ — толщина плитки.

При расчете силовых параметров процесса непрерывного компактирования и получения плитки с заданными свойствами определяющими факторами являются: контактные напряжения, давление прессования, результирующее распорное усилие, крутящий момент и потребляемая мощность. При расчете основных режимно-технологических параметров прессов наряду с расчетом узлов на прочность необходимо рассчитать валки на износ. Это позволит прогнозировать долговечность оборудования и добиться стабильности технологических параметров процесса стекловарения в соответствии с экологическими нормативами.

3.2. Подсистема надежности (обеспечения стабильности подготовки)

Структурные характеристики сырья

Стекольные шихты сложны по химическому и минералогическому составу, отличаются гранулометрией и обладают комплексом свойств, которые в совокупности определяют качество целевого продукта и должны учитываться при формировании, синтезе и совершенствовании ХТС. Для их научно обоснованного учета необходима систематизация данных о структурно-механических, физико-химических, массовлагообменных и теплофизических характеристиках шихты и ее ингредиентов. В первом приближении группы этих свойств, которые дают наиболее полную информацию о возможности предопределения основных показателей функционирования перерабатывающего оборудования, качества полупродуктов и конечных изделий, можно классифицировать следующим образом.

Структурно-механические характеристики: фракционный состав, форма частиц, удельная поверхность, степень полидисперсности и многокомпонентности, модуль формуемости, реологи-

ческие характеристики, деформационно-прочностные характеристики, сыпучесть, твердость, абразивность (истираемость), склонность к сводообразованию и др.

Пример: стекольную шихту как МППМ, руководствуясь результатами экспериментов по абразивности отдельных компонентов и шкалой ВНИИСтройдормаш, можно отнести к классу высокоабразивных порошков. Основной вклад в степень абразивности шихты как по массовому содержанию, так и по твердости, вносят кварцевый песок, глинозем и плавиковый шпат. При твердости кварцевого песка 10,5—11,3 ГПа обычной granulometрии — $D(50\%)$ — 355 мкм интенсивность изнашивания оборудования $J = 4,06$ мкм/км, а при использовании измельченного кварцевого песка до $D(50\%)$ — 276 мкм $J \leq 2,1$ мкм/км. Увеличение влажности шихты с песком обычной granulometрии изменяет интенсивность изнашивания с 0,12 до 0,10 мкм/км соответственно.

Физико-химические характеристики: химический и минералогический состав, термодинамические характеристики, активность, электрическая проводимость. **Пример:** использование взамен борной кислоты бората кальция снижает износостойкость конструкционных материалов смесителей и валков пресса за счет его повышенной абразивности ($J = 0,01$ и $0,17$ мкм/км соответственно), но повышает качество стекла и уменьшает загрязнение окружающей среды борными соединениями.

Массовлагообменные характеристики: форма, вид и энергия связи влаги, химический потенциал переноса влаги, наличие и свойства связывающего, коэффициент массовлагопереноса, массоемкость (влагоемкость), растворимость, гигроскопичность, смачиваемость.

Пример: в шихту вводится водно-эмульсионная система (использовались отходы парафинового замазливателя) в количестве 6—8 % с концентрацией органической части 3—4 % [11]. Подготовленная таким образом шихта в совокупности с тонкоизмельченным песком отличается высокой формуемостью (повышенной плотностью и прочностью), а главное — прессующий узел валкового пресса находится в менее напряженном состоянии, т.е. интенсивность процесса его изнашивания значительно снижается.

Теплофизические характеристики: теплопроводность, теплопроводность, теплоемкость.

Пример: в зависимости от способа получения (вид оборудования, степень износа и др.) и скорости нагрева (охлаждения) плиток компактированной шихты изменяется их структура, а следовательно — и теплопроводность. Так, $\lambda_{\text{кш}} \approx 0,259$ Вт/(м · К) при 50 °С и $\lambda_{\text{кш}} \approx 0,409$ Вт/(м · К) при 400 °С. Из-за естественного износа рабочей поверхности валков (максимальным износом обладает ее центральная часть, а минимальным — периферийные части), форма плиток соответствует профилю износа, плитки неравноплотны, а, следовательно, характеризуются нестабильностью

теплофизических характеристик по длине валков. Таким образом, получение качественной компактированной шихты с заданными для стекловарения свойствами становится невозможным. Прогнозирование оптимальной теплопроводности шихты является и исходной предпосылкой к описанию тепло-, массопереноса в расплавах и стеклах сложного химического состава.

Износостойкость узлов и/или конструкционных материалов

Эксплуатация экологически безопасного оборудования, используемого в процессах подготовки сырьевых материалов, сопровождается интенсивным изнашиванием поверхностей основных рабочих органов: роторов мельниц, корпусов смесителей, валков пресса и др.

Согласно классификации изнашивания по разным принципам, например по виду сред и условиям работы пар трения, выделяют механическое, абразивное, высокотемпературное окислительное изнашивание и др. По механизму разрушения трущихся поверхностей различают следующие виды изнашивания: адгезионное, абразивное, при резании, коррозионное, поверхностно-усталостное, ударное, кавитационное-эрозионное, а также их разновидности: окислительное и химико-механическое.

Реальный износ деталей оборудования, как правило, является совокупностью нескольких видов износа. Поэтому часто на практике для дифференциации вклада в суммарную величину износа используют разные методы испытаний. Предлагаемая схема предусматривает три основных вида испытаний, проводимых последовательно по мере разработки конструкции, постановки на производство и контроля качества во время производства: исследовательские, технологические и эксплуатационные испытания. Испытания на износостойкость можно разделить на полные стойкостные и ускоренные. Полные испытания рабочих органов проводят в соответствии с заданными режимно-технологическими параметрами основного процесса до установления критерия отказа. Ускоренные методы позволяют сократить трудоемкость испытаний.

В основу методов ускорения испытаний положены принцип физического прогнозирования (моделирования), экстраполяции по нагрузке (форсирование режимов испытаний) и времени (статическое прогнозирование), двойной экстраполяции.

Реальные механизмы и экспериментальные исследования позволяют определить достоверность установленных на модели закономерностей. Эксперимент в реальных условиях обходится дороже, более трудоемок и не всегда раскрывает внутренние связи сложного процесса.

Логическим дополнением к модельным исследованиям следует считать теоретическое решение данной задачи. Теории подо-

бия, моделирования, основные законы механики и реологии сред с разными характеристиками служат основой научной постановки опытов и достоверного обобщения экспериментальных данных.

Задача повышения долговечности перерабатывающего оборудования, а, следовательно, и *эколого-экономических показателей технологического процесса* в целом заключается, прежде всего, в увеличении износостойкости их рабочих органов. Износостойкость металла зависит от его твердости: при низких ее значениях износ развивается интенсивно даже при малой нагрузке. При высокой твердости повышение нагрузки почти не вызывает увеличение износа. Повышение твердости металла сопровождается увеличением его износостойкости, а при одинаковой твердости износ в некоторой степени зависит от структуры металла. Установлено, что для снижения износа необходимо подбирать сопряженные детали с учетом твердости. Быстрое изнашивание и интенсивное разрушение поверхностных слоев трущихся деталей при подготовке сырья в измельчителях, смесителях, валковых прессах может повлечь за собой засорение шихты продуктами износа и, как следствие, ухудшение качества готовых стекол. Кроме этого, в результате изнашивания сопряженных пар возможно нарушение заданных технологией режимных параметров процесса. В результате воздействия на узлы тарельчатого смесителя шихты, содержащей высокоабразивные компоненты, истираются днище, смешивающие и зачищающие лопасти и боковые стенки. Продолжительность работы смесителя составляет в среднем 240 ч/мес. Смешивающие и зачищающие лопасти заменяют через каждые два-три месяца. Износ рабочих поверхностей приводит к образованию «мертвых зон» МППМ, которые снижают однородность шихты. Установка на зачищающих и смешивающих лопастях съемных накладок с твердосплавными пластинами дает возможность продлить срок службы лопастей с одного до шести месяцев, повысить качество смешения и обеспечить экономию металла. Фирма *Granella Engineering Ltd* (Великобритания) все внутренние поверхности, контактирующие со смешиваемыми материалами, изготавливает из абразивно-стойких материалов, а загрузочные и разгрузочные лотки снабжает сменной футеровкой. Смесительные лопасти ротора часто поверхностно упрочняют и делают легкоъемными, а параллельное движение чаши и материала почти полностью исключает контакты. Фирма *Rexnord (UK) Ltd* (Великобритания) выпускает состав *Nordbak Pneu-Wear* (эпоксидная смола с микрошариками из керамики) для восстановления и защиты поверхностей оборудования, работающих в условиях газоабразивного износа систем, например, пневмоструйных смесителей и газоструйных измельчителей. Наиболее характерной в процессах компактирования порошков на валковых прессах является поверхностная усталость. Этот вид износа связан с периодическим действием напряжений сдви-

га в поверхностном слое валка, результатом которых являются локальные разрушения.

Повышение нормального давления (давления прессования) ведет не только к увеличению износа рабочей поверхности валков, но и к изменению характера изнашивания. Оптимальным для повышения износостойкости следует считать метод, обеспечивающий минимальное значение суммарных удельных затрат на производство и эксплуатацию валков. На первом этапе рекомендуется натурный эксперимент на действующем объекте с целью ограничения числа факторов и укрупнения их. На втором этапе, после снижения числа возможных взаимосвязей системы (ее дробности), необходимо использовать математическое моделирование и ЭВМ.

Использование оперативных методов реставрации, например, наплавки и закалки, не всегда соответствует цели для оборудования разных классов. Поэтому наряду с процессами восстановления деталей осуществляют и поиск оптимальной их конструкции с учетом износостойкости.

Результатом поисков конструкции валков, отвечающей поставленным задачам, явилась разработка валков со сменными элементами (см. рис. 3.8, 3.9). Использование таких прессующих узлов не только повышает износостойкость рабочей поверхности валков, но и обеспечивает высокую производительность пресса и качество компактированной шихты. При расчете конструктивных и режимно-технологических параметров такого оборудования наряду с расчетом узлов на прочность необходим их расчет на износ.

Таким образом, величина износа определяется соотношением пластичных и абразивных компонентов шихты, физико-механическими свойствами материала рабочих органов оборудования, их конструкцией и др. Анализ практической работы, экспериментальные и расчетные зависимости позволяют не только прогнозировать и повышать долговечность оборудования, но и добиться стабильности технологических параметров высокотемпературных процессов дальнейшей переработки стекольной шихты и меньших затрат на утилизацию (временных и материальных) отслуживших узлов оборудования или отдельных деталей, или сырьевых отходов.

3.3. Подсистема оценки качества полупродукта

Активность компонентов и шихты

Как отмечалось, в производстве стекловолокна варку стекла целесообразно проводить из компактированной шихты, подготовленной из тонкомолотых компонентов. При этом предпочтительно использовать газо- и пневмоструйные мельницы и смесители,

валковые прессы. В аппаратах этого типа реализуется сочетание высоких скоростей ударного разрушения, механического воздействия, термической обработки и смешения, что дает возможность регулировать физико-химические, технологические свойства перерабатываемых материалов и соблюдать экологическую безопасность [10, 13]. Результат взаимодействия этих процессов — эффект механической активации порошков. Это связано с увеличением свободной энергии вещества в результате необратимого изменения структуры и состава (нарушение стехиометрии) поверхностного слоя при его подготовке. Строгий учет изменения реакционной способности твердого вещества и величины удельной поверхности показал, что во многих случаях в общем объеме реакционной способности в результате предварительной механической обработки на долю, связанную с изменением удельной поверхности вещества, приходится не более 10 %. Остальной вклад в изменение реакционной способности в результате механической обработки вносят дефекты кристаллов [16—18]. Таким образом, поверхность МППМ неоднородна, а их техническая активность определяется, как правило, энергетическими характеристиками обрабатываемой поверхности и диктует условия проведения и эффективность дальнейших технологических операций (стекловарение и формование волокна). При этом могут быть использованы разные виды механической обработки, условно составляющие три группы. К первой относятся машины, в которых для активации МППМ используют свободный удар частицы о преграду или столкновение рабочего тела с частицей, т. е. имеется трехосное нагружение и частично сдвиговые деформации (струйные мельницы, дезинтеграторы и др.). Вторым видом являются машины, в которых при воздействии на частицы порошка преобладают сдвиговые напряжения (валковые прессы, стиратели и др.). Третий вид — комбинированный вариант, в котором механическая активация возможна в широком диапазоне изменений прикладываемых напряжений (шаровая мельница, пневмоструйный смеситель и др.).

Из-за разнообразия используемого оборудования, первичного сырья, вторичных отходов и возникающих трудностей по оценке его эффективности, качеству и экологическим показателям получаемых материалов, задача исследования энергетической неоднородности имеет большое значение. Для исследования неоднородности поверхности применяется потенциометрическая методика определения адсорбции гидроксоаквакомплексов Fe(III) из водных растворов. Методика заключается в измерении потенциала окислительно-восстановительной системы $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$ в водной суспензии, в которой устанавливается равновесие между концентрацией ионов Fe^{3+} в растворе и на поверхности дисперсного материала. Используя эту методику в совокупности с определением кислотно-основных свойств поверхности индикаторным методом

и построением штрихдиаграмм, можно получить (разработчик Технологический институт, Санкт-Петербург) следующие характеристики неоднородности поверхности: доля поверхности, приходящаяся на один сорбированный гидроксоаквакомплекс иона Fe^{2+} ; доля поверхности, приходящаяся на каждый вид адсорбционно-активных центров; суммарный адсорбционный потенциал каждого вида центров и всей поверхности.

Для прогнозирования конечной активности измельченных материалов необходима информация о кинетике релаксационных процессов, протекающих после обработки материалов в аппаратах компактирования, смешения и измельчения. Вследствие отсутствия данных об удельном вкладе физико-химических явлений, инициируемых разрушением и напряженным состоянием, в механизм формирования конечной активности обрабатываемого материала для описания кинетики релаксационных процессов предлагается использовать феноменологические модели на базе основ термодинамики и марковских процессов.

Предложено, например, нелинейное стехиометрическое уравнение следующего вида

$$\frac{dE(t)}{dt} = f(E) + n(t), \quad (3.8)$$

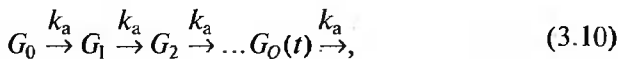
где $E(t)$ — энергия, накопленная дисперсным материалом в результате обработки; $f(E)$ — кусочно-линейная функция; $n(t)$ — нормальный марковский процесс, описывающий случайные изменения внешних параметров.

Для материалов со сложной структурой, имеющих спектр времен релаксации, получена зависимость, основанная на применении модели марковского нормального процесса:

$$\frac{dE_i(t)}{dt} = -\sum \alpha_{ij}(E_j - E_{jp}) + n(t), \quad (3.9)$$

где α_{ij} — постоянные коэффициенты; E_{jp} — равновесные значения параметра E_j .

Разработан вариант математического описания процесса механической активации дисперсных систем при их обработке в планетарных измельчителях-активаторах. Для описания изменения относительного числа активных состояний, инициируемых механическим воздействием, предложена многостадийная схема последовательных превращений типа



где $G_Q(t)$ — доля Q -го состояния активируемого вещества; k_a — константа перехода из предыдущего состояния в последующее и

соответствующая ей система обыкновенных дифференциальных уравнений, решением которых является

$$G_Q(t) = \exp(-k_a t) (k_a t) Q/Q!. \quad (3.11)$$

Получен и вероятностный аналог предыдущего соотношения, являющийся обобщенным распределением Пуассона. Поэтому практически все марковские процессы можно рассматривать как пределы псевдопуассоновских процессов.

В лабораторных и промышленных условиях показана возможность снижения температуры плавления традиционной порошковой шихты за счет эффекта механической активации ее компонентов в аппаратах измельчения с одновременным повышением качества стекломассы и снижения вредных выбросов в атмосферу. Роль смешения МППМ как самостоятельного, так и вспомогательного звена в механизмах низкотемпературных твердофазных реакций стекольных шихт до настоящего времени практически не изучалась. Данные по другим продуктам зарубежных исследователей (*P. Laccey, J. Hersey, Y. Aral* и др.), которые принимают во внимание степень начального смешения компонентов перед активацией, показывают, что структурные нарушения и гомогенизация смеси карбоната бария и анатаза при механоактивации приводит к значительному (на 300 °С) снижению температуры взаимодействия (спекания) между компонентами смеси, продуктом которого является титанат бария. Однако авторы не приводят четкой границы между смешением (гомогенизацией) обычным и сопровождающимся механохимическим эффектом. В аппаратах смешения стекольных шихт идут сложные механохимические реакции, на которые влияют внутренние и внешние факторы: степень заполнения смесителя компонентами; очередность их подачи (дозировка) и исходная влажность, температура среды, скорость перемешивания, наличие активирующих элементов, особенности предварительной обработки сырья (измельчение, декарбонизация) и др. При этом скорость химических превращений может быть представлена в виде функциональных зависимостей от указанных факторов. Активация стекольных шихт системы $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{H}_3\text{BO}_3$ в пневмоструйном смесителе оценивалась интегральной интенсивностью пиков α -кварца (SiK_α -линия). Отмечена закономерность увеличения этой характеристики с ростом давления и продолжительности смешения, что свидетельствует об измельчении кварцевых зерен при пневмоструйной обработке и благоприятно сказывается на последующих стадиях подготовки и переработки: увеличивается прочность компактированной шихты, растёт скорость силикатообразования и растворения кварцевых зерен в расплавах.

Завершающей стадией механохимической активации традиционных порошковых шихт (после процессов измельчения и смеше-

ния исходных компонентов) является ее компактирование на валковых прессах. С использованием положений механики деформирования сыпучих сред и современных методов исследования установлены и изучены основные закономерности механо-химической активации. При определенных условиях (давлении прессования, влажности и температуре шихты) уплотнения за счет обменных и твердофазных реакций образуются новые продукты, способствующие упрочнению структуры компактированной шихты и повышению ее реакционной способности при плавлении в стекловаренных печах. Например, при компактировании шихты с борной кислотой для стекла *E* возможно получение новых структурных образований типа алюмоборатов, боратов кальция, кальций-алюмоборатов и других с предшествующим дополнительным измельчением зерен кварцевого песка и изменением их формы от сферической до игольчатой, более реакционноспособной. Результатом этого механохимического процесса является снижение на 30—40 °С температур получения тугоплавких стекол, а легкоплавких — на 50—70 °С. Выбросы вредных веществ (бора, свинца) из расплава снижаются на 8—30 %.

Реализация процессов механической активации и тепловой обработки основных ингредиентов МППМ на газоструйных и аэробильных мельницах, в смесителях и валковых прессах потребовала рассмотрения вопроса термохимической активации стекольных шихт. Так как в аналогичных условиях появляются два новых фактора, способствующих протеканию твердофазного взаимодействия: повышается температура на контактах между твердыми частицами и постоянно удаляется продукт из межгранулярного пространства, становится возможным возвращение системы диффузионного режима из типичного для взаимодействия в твердой фазе в кинетический.

Накопленный экспериментальный материал показывает, что рациональное сочетание механической, механохимической и термохимической обработок порошковой и компактированной шихты, а также ее ингредиентов, например, вариация соотношения между давлением и сдвигом, дает возможность получать широкий набор метастабильных состояний самой разной природы. Таким образом, процессы полностью соответствуют общим принципам теории метастабильных состояний и, во-первых, иллюстрируют возможность перехода механической энергии и аккумуляцию ее в виде вновь образованных соединений с последующим сохранением метастабильных фаз. Во-вторых, подбор режимных параметров и минералогического состава носителя, например борсодержащего сырья, позволяет накапливать избыточную энергию в кристаллах перераспределением ионов в катионных или ионных под решетках. Синтез соединений, снижающих летучесть компонентов шихты при термической обработке и температуру их плавления

ния, в процессах измельчения (например, H_3BO_3 в присутствии SiO_2 , Al_2O_3 с CaCO_3 и $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ является новым направлением в области малоотходной предварительной подготовки шихт, и, видимо, вскоре найдет практическое применение с целью формирования структуры будущих стекол на начальном этапе обработки минерального сырья.

На основании изложенного можно заключить, что активация стекольных шихт определяется, в основном, химическим составом, структурно-механическими характеристиками порошков и способом подвода энергии к перерабатываемому материалу.

За критерий, позволяющий судить об увеличении активности обработанного материала — его качества (и прогнозировать реологические и теплофизические характеристики шихт в зависимости от условий их приготовления и хранения), принят фактор достижения некоторого *технологического эффекта* — увеличение скорости обменных химических и твердофазных реакций, получение новых комплексных соединений, улучшение реологических характеристик целевого продукта, снижение продолжительности его дальнейшей переработки (интенсификация процесса стекловарения) и уменьшение выбросов (пылевидных, газообразных и др.) в биосферу.

3.4. Подсистема переработки

Стекловарение

Совокупность рассмотренных технических решений (в частности, их выходного параметра — эффекта активации) позволяет вплотную подойти к описанию тепло-, массопереноса в средах сложного химического состава.

Чисто экспериментальное нахождение оптимальных параметров такого процесса часто невозможно или очень трудоемко. Для более строгой постановки задач оптимизации технологического процесса необходимы набор переменных, области их возможного изменения (ограничения) и определения вида целевой функции — критерия оценки.

Процесс плавления стекольной шихты (как обычной порошковой, так и компактированной) сопровождается термической диссоциацией и высокотемпературными твердофазными реакциями компонентов шихты с образованием силикатов и растворением зерен кварца в образовавшемся расплаве. Этот процесс в конечном итоге определяет производительность термических реакторов и качество вырабатываемого стекла.

Теоретический анализ механизма плавления стекольной шихты включает тепловой и динамический этапы. Особенность плавления

ления — перемещение границ раздела фаз. Иными словами, решение тепловой задачи тесно связано с проблемой Стефана (теплообмен с фазовыми превращениями). Температура на границе раздела фаз расплав/твердая шихта совпадает с температурой их равновесия, а сама граница считается непрерывной, т.е. в математической постановке не имеет разрывов и других особенностей. Математическое описание, учитывающее начальный период поведения плиток компактированной шихты в зоне плавления во взаимосвязи с режимными параметрами процесса их получения и характеристиками, приведено в [9]. После учета конкретных условий тепло-, массообменной обстановки в зоне плавления тепловые нагрузки, воспринимаемые компактированной шихтой, определяются методом численного интегрирования на ЭВМ по заданным значениям массивов входящих в модель величин.

Модель позволяет рассчитывать разные варианты температурного режима термической обработки (плавления) и выбрать тот, который во взаимосвязи с другими подсистемами при заданных технологических ограничениях дает *максимальное* снижение энергоемкости процесса при *минимальных* вредных выбросах в окружающую среду.

Комплексные экспериментальные исследования применения компактированной шихты вместо порошковой на практике доказали преимущества новой технологии. Установлено (методом ввода люминесцентного индикатора в расплав стекла), что при одинаковых условиях варки и выработки стекла время полного обмена стекломассы и «активный» объем бассейна печи увеличились, а максимальная концентрация индикатора и время до его появления в зоне выработки стеклоизделий уменьшились.

Формование стеклянных нитей

Установлению взаимосвязи параметров процесса формования нитей с условиями и особенностями процесса приготовления стекольной шихты и ее отдельных компонентов до последнего времени не уделялось должного внимания. Не учитывалась и вероятная возможность дискретного изменения структуры (макро- и микроперестройка) перерабатываемых в нить расплавов. Попытки исследовать эти процессы в их взаимосвязи, выявить технологические параметры, способствующие интенсификации вытягивания стеклонитей, и оценить корреляцию свойств шихты, приготовленного расплава и выработочных характеристик стекол и стеклоплавильного аппарата (СПА) не предпринимались.

Известно, что производительность процесса формования непрерывного волокна определяется давлением столба расплава в СПА, его конструкцией, вязкостью стекла и температурой в зоне формования (фильерной пластины). Традиционные методы при-

готовления порошковой шихты позволяют получать лишь механическую смесь исходных компонентов, сохраняющих свою индивидуальность и не изменяющих свойства как на стадии приготовления, так и хранения, а иногда и при термообработке. Использование в современной технологии приготовления стекольных шихт техники тонкого измельчения компонентов (максимальный размер зерен 400 мкм) в сочетании с их одновременной термической обработкой (при $t \leq 600^\circ\text{C}$), интенсивного смешивания с последующим компактированием (при давлении уплотнения 300—400 МПа) таких тонкоизмельченных и агрегированных систем позволяет уже на стадии приготовления шихт получать высокооднородный прочноплотный композит с вновь образованными, как правило, комплексными соединениями, изменяющими (как реологические, так и химические) первичные свойства компонентов. Таким образом, необходимым условием для решения поставленной задачи является выявление взаимосвязи между структурным состоянием отдельных ионов и конкретным свойством шихты и стекла. В наибольшей мере это относится к катионам B^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} и Si^{2+} , которые в зависимости от химико-минералогического состава исходной шихты могут играть разные функциональные (структурные) роли.

Учитывая строго специфические свойства борных соединений, например, несовпадение формы кристаллических решеток, разные интенсивности катионных и анионных обменов, можно говорить о разных длинах одинарных $\text{O}-\text{B}-\text{O}$ и двойных связей $\text{B}=\text{O}$, т. е. о разных энергиях связи. Энергия связи $\text{B}-\text{O}$ 524,14 кДж/моль, а $\text{B}=\text{O}$ 5045,2 кДж/моль. Например, борная кислота в смеси с кальциевой селитрой и плавиковым шпатом (шихта для стекла *E*) или щелочью (шихта для стекла «11») обладает способностью к катионному и анионному обмену, а кварцевый песок — только к катионному.

Вновь образованные (синтезированные) комплексные соединения типа $\text{CaB}_6\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_3\text{B}_{10}\text{O}_{30} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$, $\text{CaAl}_2\text{B}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $2\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ не только способствуют интенсификации процесса стекловарения, но и играют в дальнейшем, видимо, роль модификаторов микроструктуры получаемых стекол. Косвенно доказывают это разные вязкости, температуры кристаллизации и вспенивания стекол одинакового химического состава, полученных из порошковых и компактированных шихт с разным борсодержащим сырьем.

Рентгеноспектральное изучение состояния атомов в разных материалах является современным прямым физическим методом исследования строения твердых тел. Рентгеноспектральные исследования применялись первоначально в геохимии и минералогии. К настоящему времени этот метод получил распространение при определении зарядов ионов в соединениях, ширины валентной и

запрещенной зон, координационных состояний ионов, длины связей $Me-O$, ионности связей и др. Одно из первых корректных исследований с целью связать энергетический сдвиг эмиссионной AlK_{α} -линии (относительно металлического алюминия) с координационным числом Al , длиной связи $Al-O$ и электрическим зарядом на алюминии, описано в [19].

Исследованиями было установлено наличие: линейной связи между полушириной контура K_{α} -линии с межатомным расстоянием $Al-O$; линейной связи сдвига центра тяжести AlK_{α} -линии и межатомного расстояния (внутри двух групп минералов с 4- и 6-координированным алюминием); двух неперекрывающихся диапазонов химических сдвигов AlK_{α} -линии, соответствующих четверной и шестерной координации иона Al^{3+} [участок между ними соответствует наличию в изучаемом материале катионов, входящих в группы (AlO_4) , а части — в (AlO_6)]. Получение величины энергетического сдвига AlE_{α} -линии позволяет определить эффективный заряд, причем изменение эффективного заряда при переходе от одного соединения к другому возможно лишь по результатам расчета в рамках какой-либо одной модели. Понятие «эффективный заряд» весьма сложно, и конкретные значения заряда на катионе для одного и того же соединения при использовании разных моделей существенно разнятся. Определение изменений энергетического сдвига AlK_{α} -линии позволяет судить о вариациях в химической связи: увеличение энергетического сдвига AlK_{α} -линии свидетельствует о росте степени ионности связи $Al-O$.

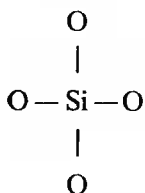
При экспериментальном изучении характеристик AlK_{β} -спектра в минералах установлено (как и для случая сдвига AlK_{α} -линии), что энергетический сдвиг центра тяжести AlK_{β} -линии связан с координационным числом алюминия, однако в этом случае получают две области значений энергетических сдвигов для четырех- и шестикоординированного алюминия, которые заметно перекрываются. Установлена линейная зависимость энергетического сдвига AlK_{β} -линии и длины связи $Al-O$ (для группы минералов, содержащих шестикоординированный алюминий). Более прецизионные измерения позволили получить спектр сателлита этой линии AlK_{β} , что дало возможность установить наличие роста расщепления «основная полоса-сателлит» с увеличением ионности связи $Al-O$ минерала. Характерно, что изменение ионности связи $Al-O$ кроме расщепления отражается и на форме (профиле) основной полосы. Говоря подробнее о связи параметров этих спектров с координационным числом алюминия, можно отметить, что для минерала с координационным числом ионов алюминия 4 характерен энергетический сдвиг центра тяжести основной полосы 5 эВ, причем увеличение этого сдвига по сравнению со случаем присутствия катионов алюминия в шестикоординированном состоянии происходит в результате перераспределения интенсив-

ностей линий, составляющих эту полосу. Низкоэнергетический спутник при наличии в структуре минералов групп (AlO_4) отстоит от основной полосы на 14 эВ, а его интенсивность составляет 17—20 % интенсивности основной полосы (против 16—17 эВ и 12—16 % для шестерной координации катионов алюминия). Эти закономерности существенно усложняются в кристаллических и стеклообразных материалах сложного химического состава.

Эмиссионная K_β -полоса бора в B_2O_3 представляет основную полосу и два спутника значительно меньшей интенсивности. Энергетическое расщепление между основной полосой и высокоэнергетическим компонентом составляет около 11 эВ, а низкоэнергетическим — 15 эВ. Проведено сопоставление энергетического расщепления: трех компонентов эмиссионного VK_β -спектра и структурно-химических и параметров изучаемого соединения (в данном случае B_2O_3 и В), среднего и коротковолнового компонентов с первым ионным потенциалом атома бора. Предполагается, что разность этих величин соответствует разности величин сродства к электрону атомов двух типов в химическом соединении. Энергетическое расщепление между средним и длинноволновым компонентом сопоставляется со вторым ионным потенциалом атома бора. Предполагается наличие зависимости этого расщепления, относенного к ионизационному (второму) потенциалу от ионности связи В—О.

Исследование особенностей ВК-спектров квантового выхода внешнего фотоэффекта (СКВ) показало, что, основываясь на анализе распределения интенсивностей ближней к краю поглощения области ВК-СКВ, можно судить о координационных изменениях, происходящих в изучаемом стекле.

При этом необходимо учитывать, что анионы F^- и OH^- способствуют процессу формирования и росту тех или иных кристаллических частиц в расплавах и защищают их от повторного растворения. Таким же свойством обладают анионы BO_3^{3-} , CO_3^{2-} , NO_3^- ; катион B^{3+} уменьшает устойчивость кристаллической решетки, а анион F^- не участвует в образовании мостиков связи между тетраэдрами



структурное состояние бора в кристаллических соединениях характеризуется двумя координационными числами относительно кислорода — 3 и 4; на рассматриваемый механизм, кроме коорди-

нации катионов, влияет и вариация характера связи $Me-O$ без изменения координационных чисел катионов. Таким образом, своеобразие алюмоборосиликатных стекол — следствие изменения структурного состояния (макро- и микроуровень) отдельных компонентов как на стадии приготовления шихты, так и в процессе дальнейшей высокотемпературной переработки (вначале в стекловаренной печи, затем — в СПА).

Однако выработка стеклянных нитей и контроль качества получаемых расплавов, стекломассы или готовых стеклошариков (часто на практике эти объекты исследования ошибочно отождествляют) ведутся без учета поэтапных (непрерывных) изменений их микроструктуры. Например, для оценки качества стеклошариков (или расплава шихты в одностадийном методе получения стекловолокна) используют показатель химической неоднородности стекла, среднюю производительность СПА, количество обрывов (капельную обрывность) нитей. Последние характеристики применяются, как правило, в производственных условиях. Их главным недостатком, кроме трудностей, связанных с субъективными причинами, например, износом оборудования, степенью подготовки оператора, состоянием охлаждающего устройства подфилерной зоны, является лишь констатация факта категории качества расплава, поступающего на формование стеклонити. Ввести же корректировку в технологию формования или на предшествующих ей стадиях в случае неудовлетворительного качества расплава не удается. Показатель химической неоднородности стекла не позволяет судить о степени механической дефектности поверхности стеклошариков, резко снижающей производительность СПА. В связи с этим отсутствие комплексного показателя качества стеклошариков, поступающих в СПА, или качества стекла, поступающего сразу на формование волокон, затрудняет не только условия создания малоотходного процесса, но и не позволяет даже прогнозировать особенности функционирования выработанных устройств (модулей) на стадии предварительной подготовки шихты и ее компонентов вследствие непредсказуемых образующихся объемов отходов (твердых, жидких, газообразных).

3.5. Подсистема природоохранной стратегии

Промышленная экология (экологическая безопасность и ресурсосбережение)

Современный уровень развития производства непрерывного волокна (как двух-, так и одностадийный методы) предъявляет требования к постоянному повышению качества стекломассы с одновременным снижением потерь ценных и вредных компонен-

тов (при функционировании как самостоятельных, так и взаимосвязанных подсистем, детально рассмотренных в [10]).

В связи с этим разрабатываются и проводятся меры непрерывного контроля и уменьшения (устранения) опасности пылевых и газообразных (кремнесодержащей пыли, оксидов бора, фтора, мышьяка, азота, серы и др.) выбросов, включая аэрозоли и сточные воды (композиции жидких и твердых углеводов, жирных спиртов и т. п.), а также большое количество твердых отходов в виде стеклобоя, стеклонитей, грубых и мягких волокон [10—13].

Аппаратурное оформление цехов по подготовке стекольной шихты и ее компонентов (размольное, смесительное и другое оборудование) включает устройства сухой (циклоны, мультициклоны, рукавные фильтры) и мокрой (скрубберы и пылеуловители) газоочистки. Другие цеха оборудованы системами очистки дымовых газов, сточных вод и переработки твердых отходов. Рассмотрим одну из таких систем.

Тепло-, массообменная аппаратура для систем санитарной очистки отходящих газов

В зависимости от сырьевых и энергетических ресурсов состояние экономики на современных предприятиях, отвечающих требованиям промышленной экологии, применяют разную тепло-, массообменную аппаратуру для систем санитарной очистки отходящих газов. Например, в МГУИЭ разработан ряд контактных устройств, способных работать при высоких скоростях газового потока и малых нагрузках по жидкости и обладающих незначительным гидравлическим сопротивлением.

Перечисленные параметры позволяют рекомендовать эти устройства для систем санитарной очистки отходящих газов. Отдельные конструкции отвечают требованиям принципа продольно-поперечного секционирования, что позволяет осуществлять масштабный переход простым суммированием элементов, исследованных в лабораторных условиях.

Тарелка малого гидравлического сопротивления (рис. 3.10) — аппаратное оформление процессов очистки отбросных газов методами абсорбции и мокрого пылеулавливания.

Аппарат с тарелками малого гидравлического сопротивления прошел опытно-промышленную проверку в процессах очистки газов от фтористых соединений водой в производстве экстракционной фосфорной кислоты.

Степень извлечения фтора на трех тарелках составляет 90 %, скорость газа в поперечном сечении аппарата достигает 3,5—3,8 м/с, а сопротивление аппарата с сепаратором не превышает 40—60 мм вод. ст. В течение одного года эксплуатации внутри аппарата

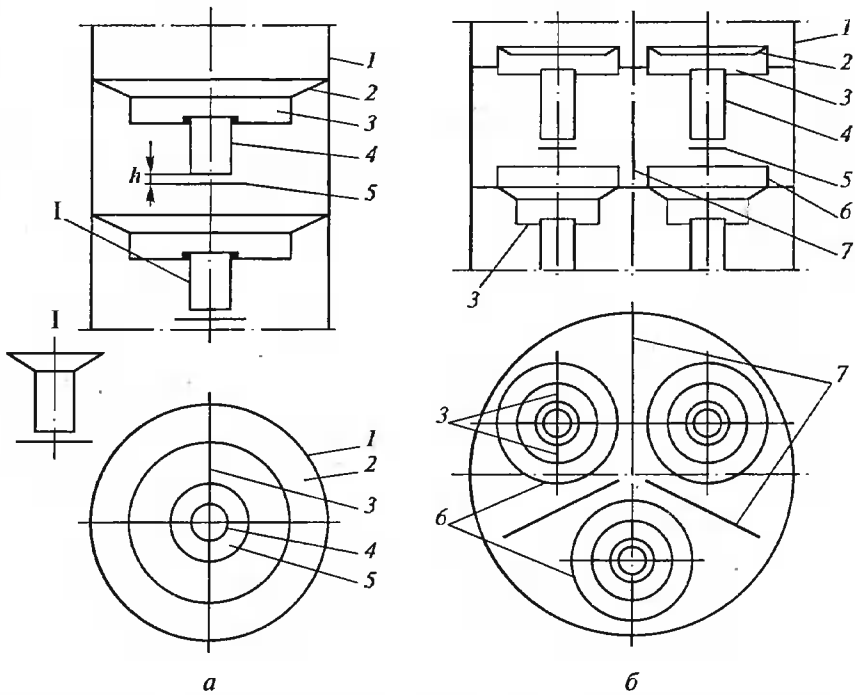


Рис. 3.10. Одно- (а) и многоэлементные (б) конструкции тарелки малого гидравлического сопротивления:

1 — колонна; 2 — направляющий конус; 3 — стабилизаторы жидкостного потока; 4, 5 — кольцевая щель переливного устройства; 6 — направляющие цилиндры; 7 — перегородка

не наблюдалось отложения кремнегеля. Свободное сечение тарелки 47%. Угол конусности тарелки 30—45°. Расстояние между тарелками 400—500 мм.

С вышележащей тарелки жидкость транспортируется в виде плоской струи из кольцевой щели переливного устройства 4, 5, которая, попадая на конус колонны 1 и на секционирующие перегородки 7, стекает на направляющий конус 2. Газ, проходя через свободное сечение тарелки, вступает во взаимодействие со стекающей с конуса 2 жидкостью.

В зависимости от скорости газа, свободного сечения тарелки и нагрузки по жидкости могут наблюдаться пленочный, барботажный или циркуляционный гидродинамические режимы.

Жидкость, проконтактировав с газом, собирается в центре элемента и поступает в переливное устройство, из нижней части которого через щель высотой h она вытекает в виде кольцевой струи или каскада, орошая нижележащую тарелку.

Для стабилизации режима работы в конусной части тарелки установлены стабилизаторы 3 жидкостного потока, выполняющие одновременно функцию фиксации переливного устройства.

В многоэлементной конструкции (рис. 3.10, б) перераспределение жидкости по плоскости между элементами осуществляется за счет цилиндра б.

Струйные аппараты типа скрубберов Вентури предназначены для аппаратурного оформления процессов отбросных газов методами абсорбции и мокрого пылеулавливания, а также для процесса теплообмена.

Аппарат с радиальным движением газа (рис. 3.11, а). Через патрубок 3 жидкость поступает на тарелку 5 и далее через отверстия 2 направляется во внутренний объем элементов 1. Кольцо 4 служит для перераспределения жидкости между элементами 1. Под действием статического столба жидкость из элементов 1 вытекает через щель 7 в пространство между ними в виде плоских вертикальных струй, которые взаимодействуют с газовым потоком, поступающим в верхнюю часть аппарата. Прохождение газового потока с большой скоростью в пространстве между элементами 1 обеспечивает интенсивное дробление жидкости, а пяти-

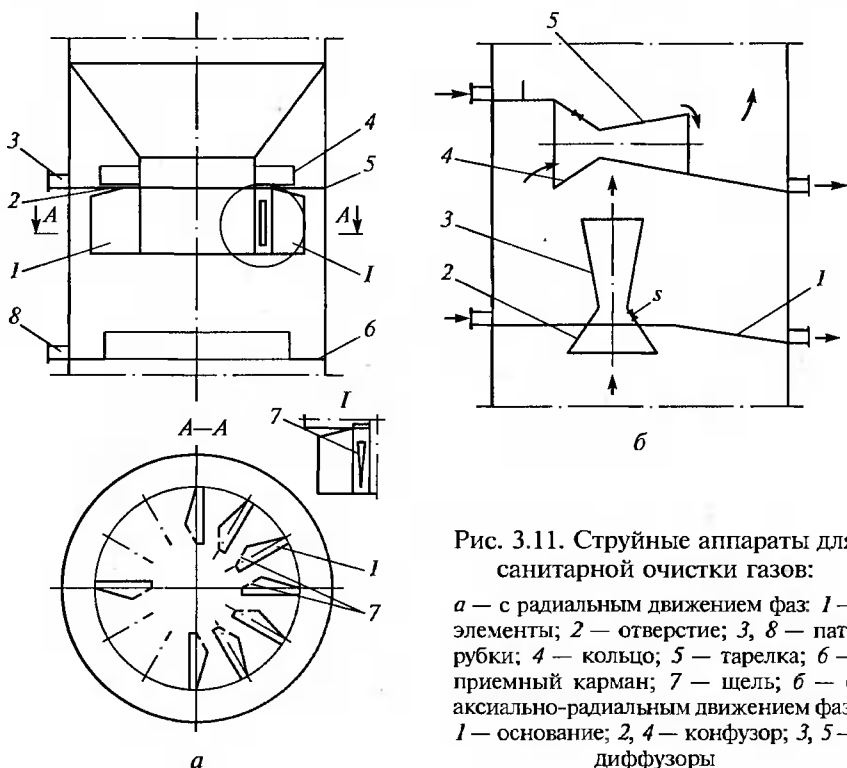


Рис. 3.11. Струйные аппараты для санитарной очистки газов:

а — с радиальным движением фаз: 1 — элементы; 2 — отверстие; 3, 8 — патрубки; 4 — кольцо; 5 — тарелка; б — с аксиально-радиальным движением фаз: 1 — основание; 2, 4 — конфузор; 3, 5 — диффузоры

гранное сечение элементов *1* придает газовому потоку закрученное движение, которое в совокупности с уменьшением скорости газа и его поворотом на 180° обеспечивает надежную сепарацию фаз. Проконтактировавшая с газом жидкость стекает по внутренней поверхности аппарата в приемный карман *б* и через патрубок *δ* удаляется из аппарата, как и газ, через отводной патрубок (на рисунке не показан).

В качестве контактных элементов *1* могут быть использованы трубы, что упрощает конструкцию.

По мере необходимости аппарат с описанным выше взаимодействием фаз может быть многоступенчатым.

Аппарат с аксиально-радиальным движением фаз (рис. 3.11, б). Газ, поступающий под основание *1*, проходя конфузор *2*, захватывает жидкость, поступающую через щель *с*, и дробит ее. Пройдя диффузор *3* плоской вертикальной трубы, газожидкостной поток сепаруется на наружной поверхности горизонтальной трубы Вентури, образованной конфузором *4* и диффузором *5*. Отделившись от жидкости, газ поступает в горизонтальную трубу Вентури, где процесс взаимодействия фаз повторяется.

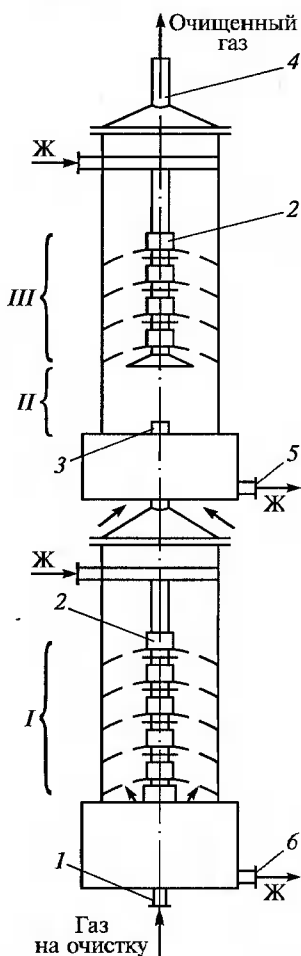
В вертикальной трубе Вентури осуществляется аксиальное движение фаз, а в горизонтальной — радиальное.

Аппарат большого диаметра может быть создан на основе секционирования.

Аппарат для очистки и сжигания отходящих технологических газов (рис. 3.12) предназначен для абсорбционной очистки горючих отходящих технологических газов, а также мокрого пылеулавливания и состоит из двух соосно-расположенных секций, в нижней происходит очистка поступающего газа, а в верхней расположена камера сжигания и пленочный конденсатор.

Рис. 3.12. Аппарат для очистки и сжигания отходящих технологических газов (Ж — жидкость):

I — зона очистки; *II* — камера сжигания; *III* — пленочный конденсатор; *1*, *3*—*б* — штуцеры; *2* — пленочный распределитель



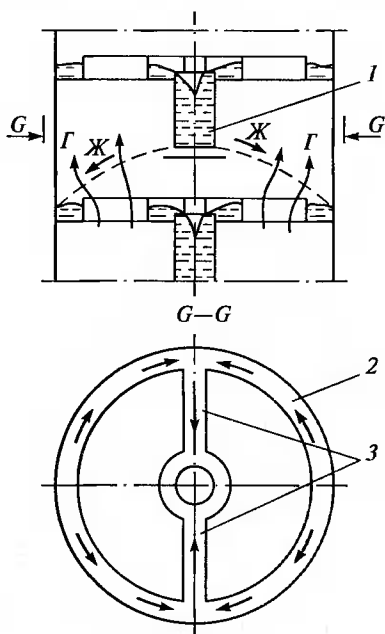
Газ, поступающий на очистку через штуцер 1, барботирует через слой жидкости и поступает в зону очистки I. В качестве контактного устройства используется многощелевой пленочный распределитель 2. Проконтактировав с жидкостью, вытекающей в виде кольцевой струи из переливного устройства, газ поступает через штуцер 3 в камеру сжигания II, а затем, пройдя многощелевой пленочный конденсатор III, через штуцер 4 удаляется в вентиляционную систему. Проконтактировавшая с газом жидкость стекает по внутренней поверхности аппарата и удаляется из него через штуцеры 5 и 6. В случае необходимости нижнюю часть секции очистки выполняют съемной.

Пленочная тарелка (рис. 3.13) — обязательный элемент аппаратурного оформления процессов абсорбции, вакуумной ректификации, мокрого пылеулавливания. Испытана на улавливании аммиака, фторида водорода, оксидов азота, пылей, сероводорода.

Жидкость с вышележащей тарелки поступает в периферийный желоб 2, откуда по центральным желобам 3 транспортируется в перелив 1. Под действием статического столба жидкость вытекает через щель в виде плоской кольцевой струи и перекрывает поперечное сечение колонны.

Газ поступает с нижележащей тарелки, проходит через пленку, взаимодействует с ней и далее идет на следующую тарелку.

Предусмотрено вторичное использование уловленных компонентов шихты. С учетом планируемого роста производительностей перерабатывающего оборудования и соответствующего увеличения безвозвратных потерь ценных компонентов со шламом и сточными водами за основу принят сухой способ очистки. Для этого используют фильтры с импульсной регенерацией и рукавами из термостойких материалов типа нетканых полотен.



Внедряются и специальные фильтры серии ФРИ, ФРИТ и ФРИД (Россия), предназначенные для эксплуатации при высоких температурах (до 350 °С) и запыленностях газового потока (до 500 г/м³). Фирмой *Du Ponte* (США) предложены фильтрующие материалы,

Рис. 3.13. Пленочная тарелка:
1 — перелив; 2 — периферийный желоб;
3 — центральный желоб

сочетающие высокую фильтрующую способность с высокой теплостойкостью и стойкостью к агрессивной химической среде. Материал *Bekunox* (Великобритания) также обладает высокой абразивной устойчивостью, температуростойкостью (до 500 °С) и хорошо зарекомендовал себя при фильтрации газов, содержащих SO₂. Острейшая проблема сокращения вредных выбросов и вторичного использования отходов существует и при варке стекла. Ее решение возможно по двум направлениям: очистка дымовых газов от вредных веществ в специальных установках и сокращение или полное исключение вредных выбросов за счет изменения технологии подготовки шихты и варки. Второе направление является определяющим и заключается в замене на стадии приготовления шихт вредных компонентов нетоксичными, обладающими к тому же лучшими характеристиками при стекловарении. Например, замена борной кислоты на борат кальция, мышьяковистого ангидрида на железный сурик позволяет в 2—3 раза снизить потери соединений бора и полностью исключить выбросы в атмосферу соединений мышьяка. Компактирование такой шихты дополнительно (на 30—50 %) снижает выбросы в атмосферу.

Вторичное использование и обезвреживание отходов на стадиях формования и получения комплексной стеклонити включает улавливание паров замазливателя, очистку сточных вод методами мембранной фильтрации и электрофлотации (снижение концентраций достигает 84—99,5 %), переработку отходов стекловолокна. Последняя занимает особое место, так как в производстве стекловолокна отходы в виде отдельных нитей, бухт, жгутов часто с включениями капель стекла и связующего сложного химического состава составляют 15—30 %. Задачи промышленной экологии, требования к малоотходным производствам и технологии стекловарения предопределили основные варианты рационального использования получаемых отходов как вторичных материальных ресурсов (ВМР). Неоднородный состав отходов, их специфические свойства (твердость, абразивность и др.) создают основные трудности повторного использования в качестве компонента шихты в процессах стекловарения. Анализ решений и комплекс исследований позволили разработать оригинальные способы их рекуперации (см. гл. 7 и 12). Например, добавление 2—45 % ВМР в виде гранул и порошка к традиционной или компактированной шихте позволяет экономить сырье, топливо и уменьшить загрязнение окружающей среды.

Важнейшее условие для комплексного решения задачи по охране окружающей среды и рациональному использованию материальных ресурсов создание малоотходной (безотходной) технологии получения стеклянных волокон. Природоохранная деятельность предприятий оценивается по разным показателям: достигаемой степени очистки вредных выбросов (ПДК, остаточные концентрации), уровню загрязнения окружающей среды, капиталъ-

ным и эксплуатационным затратам на санитарную технику и т. д. Имеется ряд подходов и к определению безотходности производств: экспертная оценка, оценки по сырьевому и энергетическим балансам, полноте использования эксергии, по общему параметру оптимизации, полученному с помощью функции желательности или технологического профиля, а также сопоставлением затрат на производство продукции (см. гл. 5).

Сочетание прогрессивной технологии с современными методами очистки и контроля газопылевых выбросов, вторичного использования отходов позволяет реконструировать существующие и проектировать новые цеха, отдельные производственные участки, отвечающие всем требованиям экологической безопасности.

Список литературы

1. *Русак О. Н., Малаян К. Р., Занько Н. Г.* Безопасность жизнедеятельности. — СПб.: Лань, 2000. — 448 с.
2. *Кафаров В. В., Дорохин И. Н., Арутюнов С. Ю.* Системный анализ процессов химической технологии. — М.: Наука, 1985. — 440 с.
3. Химико-технологические системы / Д. Бальцер, В. Вайс, В. К. Викторов и др. — Л.: Химия, 1986. — 424 с.
4. *Попов Ю. П., Брянская Э. А., Смирнов Л. А.* Многовариантный синтез химико-технологических схем и аппаратуры / В кн.: Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения. — М.: Изд-во МИХМ, 1983. — С. 39—43.
5. *Росляк А. Т., Бирюков Ю. А., Пачин В. Н.* Пневматические методы и аппараты порошковой технологии. — Томск: Изд-во ТГУ, 1990. — 272 с.
6. *Гроссман Н. Я., Шныгов Г. Д.* Автоматизированные системы взвешивания и дозирования. — М.: Машиностроение, 1988. — 296 с.
7. *Каталымов А. В., Любартович В. А.* Дозирование сыпучих и вязких материалов. — Л.: Химия, 1990. — 240 с.
8. Конструирование и расчет машин химических производств / Ю. И. Гусев, И. Н. Карасев, Э. Ф. Кольман-Иванов и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 408 с.
9. *Чехов О. С., Калыгин В. Г.* Влияние условий предварительной подготовки многокомпонентных полидисперсных порошков на технологию их дальнейшей переработки // ЖВХО им. Д. И. Менделеева. Т. 33. — 1988. — № 4. С. 405—415.
10. *Калыгин В. Г., Попов Ю. П.* Порошковые технологии: экологическая безопасность и ресурсосбережение. — М.: Изд-во МГАХМ. 1996. — 212 с.
11. *Назаров В. И., Мелкоян Р. Г., Калыгин В. Г.* Техника уплотнения стекольных шихт. — М.: Легкпромбытиздат, 1985. — 128 с.
12. *Чехов О. С., Назаров В. И., Калыгин В. Г.* Вопросы экологии в стекольном производстве. — М.: Легкпромбытиздат, 1990. — 144 с.
13. *Калыгин В. Г.* Промышленная экология. — М.: Изд-во МНЭПУ. 2000. — 240 с.
14. *Класен П. В., Гришаев И. Г.* Основы техники гранулирования. — М.: Химия, 1982. — 272 с.

15. *Генералов М. Б., Классен П. В., Степанова А. Р.* Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений. — М.: Машиностроение, 1984. — 192 с.

16. *Аввакумов Е. Г.* Механические методы активации химических процессов. — Новосибирск: Наука, 1986. — 276 с.

17. *Хайнике Г.* Трибохимия. — М.: Мир, 1987. — 584 с.

18. *Болдырев В. В.* Механические методы активации неорганических веществ // ЖВХО им. Д. И. Менделеева. Т. 33. — 1988. — № 4. — С. 374—383.

19. *Шульц М. М., Мазурин О. В.* Современные представления о строении стекол и их свойствах. — Л.: Наука, 1988. — 198 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные подсистемы постадийной разработки и усовершенствования ресурсосберегающей техники подготовки и переработки стекольных шихт.

2. Перечислите основные процессоры и их назначение в «подсистеме подготовки» (на примере ПМ).

3. Расскажите об основных процессорах и их назначении в «подсистеме надежности» (обеспечения стабильности подготовки).

4. Назовите основные процессоры и укажите их назначение в «подсистеме оценки качества полупродукта».

5. Перечислите основные процессоры и их назначение в «подсистеме переработки».

6. Расскажите об основных процессорах и их назначении в «подсистеме природоохранной стратегии».

7. Разработайте алгоритм варианта формирования и синтеза энерго-сберегающих и экологически безопасных ТС и ХТС на примере с ПМ, но для других видов сырья и отраслей промышленности.

ГЛАВА 4

ВВЕДЕНИЕ В КУРС ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЫЛЕ-, ГАЗООЧИСТКИ И ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВ

4.1. Основы инженерной реологии, физико-химической механики гомо- и гетерогенных систем, тепло- и массообменных процессов (на примере характеристик газообразных, жидких и твердых загрязнителей биосферы)

Классификация массообменных процессов

Массообменными называются процессы, характеризующиеся переходом вещества из одной фазы в другую. Под *массопередачей* понимают переход компонента смеси из области высокой кон-

центрации в область более низкой. Во всех случаях вещества, которыми обмениваются фазы, должны переместиться внутри одной из фаз к поверхности раздела, пересечь ее и далее переместиться от поверхности раздела внутрь другой фазы. Массопередача и есть совокупность всех трех стадий процесса массообмена между фазами. Перенос вещества внутри одной фазы к поверхности раздела или от нее к другой фазе называют *массоотдачей*. Исследуя и анализируя основные массообменные процессы (абсорбцию, адсорбцию, осаждение, фильтрование, выпаривание, кристаллизацию, экстракцию, термическую обработку и др.), можно сказать, что для всех общим является переход вещества из одной фазы в другую, связанный с явлениями конвективного переноса и молекулярной диффузии, поэтому перечисленные процессы иногда называют *диффузионными*.

Классификация дисперсных систем

Используя основные понятия физической и коллоидной химии, теории переноса (тепло-, массообмена), механики сплошных и дискретных сред, можно сказать, что в отличие от *гомогенных смесей*, где составляющие перемещены на молекулярном уровне, *гетерогенные, неоднородные* или *многофазные смеси* характеризуются наличием макроскопических (по отношению к молекулярным масштабам) неоднородностей или включений [1]. Явления, происходящие на межфазных границах в гетерогенных системах, существенно воздействуют на эффективность технологических процессов пыле-, газоочистки и определяют выбор той или иной конструкции экобиозащитного оборудования.

К поверхностным явлениям относятся процессы, происходящие на границе раздела фаз и проявляющиеся сильнее всего в телах с высокоразвитой поверхностью, которая придает им новые важные свойства. К таким телам относятся поверхностные слои, пленки, капилляры, мелкие частицы. Совокупность этих дисперсий вместе со средой, в которой они распределены, образуют дисперсную систему. Именно такими системами является большинство окружающих нас реальных тел. Это кристаллические, волокнистые, пористые, сыпучие вещества, находящиеся в виде суспензий, паст, эмульсий, пен, пыли и т.д. Почва, облака, туман, растения, металлы, полимеры, ткани, продукты питания, химические продукты — все это дисперсные системы, особые свойства которых используются в курсе «Промышленная экология». Введем основные понятия в соответствии с классификациями по агрегатному состоянию и степени дисперсности [2].

Макроробъект — объект, к которому могут быть применены такие статистические характеристики, как плотность, вязкость, температура, давление и др.

Термодинамическая система — совокупность макроскопических объектов, обменивающихся энергией в форме работы и тепла как между собой, так и с внешней средой.

Гомогенной называется термодинамическая система, внутри которой нет поверхностей раздела макроскопических частей системы, отличающихся по свойствам и составу.

Гетерогенной называется термодинамическая система, не удовлетворяющая этому условию.

Система является физически однородной, если ее состав и физические свойства одинаковы для всех макроскопических частей этой системы.

Фазой называют совокупность всех гомогенных частей термодинамической системы, которые в отсутствие внешнего силового воздействия являются физически однородными.

Раствор — гомогенная система, состоящая из двух или более числа химически чистых веществ.

Для объектов коллоидной химии характерны два общих признака: гетерогенность и дисперсность.

Дисперсность включает такие понятия, как размеры и распределение по размерам макрочастиц, образующих гетерогенную систему, т. е. разделенных поверхностями разделов.

Диапазон дисперсностей гетерогенных систем очень широк: от 10^{-9} до $> 10^{-5}$.

В гетерогенной системе различают *дисперсную фазу* — совокупность мелких частиц, и *дисперсионную среду*, в которой распределена дисперсная фаза. Если дисперсная фаза подвижна, то такие системы называются *свободнодисперсными*. Если подвижность дисперсной фазы ограничена, то система называется *связнодисперсной*.

В зависимости от размеров частиц дисперсной фазы *свободнодисперсные системы* подразделяются:

на ультрамикроретерогенные (10^{-9} — 10^{-7} м);

микроретерогенные (10^{-7} — 10^{-5} м);

грубодисперсные ($> 10^{-5}$ м);

связнодисперсные системы (пористые тела) подразделяются:

на микропористые ($< 10^{-9}$ м);

переходнопористые (10^{-9} — 10^{-7} м);

макропористые ($> 10^{-7}$ м).

По агрегатному состоянию дисперсной фазы и дисперсионной среды (жидкость — Ж, твердое — Т, газ — Г) для двухфазных систем возможны девять комбинаций, которые соответствуют следующим видам дисперсных систем.

Дисперсионная среда — жидкость

1. Ж—Ж: эмульсии (замастиватели, сырая нефть, латексы и др.);
2. Т—Ж: а) золи (высокодисперсные системы при невысокой концентрации дисперсной фазы);

б) гели (высокодисперсные системы при большой концентрации дисперсной фазы, когда частицы агрегируют и образуют связнодисперсную систему);

в) суспензии (грубодисперсные относительно малоцентрированные системы);

г) пасты (высококцентрированные системы);

3. Г—Ж:

а) кипящие жидкости (малоцентрированные);

б) пены высокоцентрированные.

Дисперсионная среда — газ (аэрозоли)

4. Г—Г: газ;

5. Ж—Г: туманы, дымы;

6. Т—Г: пыли, дымы.

Дисперсионная среда — твердая

7. Т—Т: горные породы, строительные материалы, сплавы, пластмассы;

8. Ж—Т: влажный грунт, почва, шлам;

9. Г—Т: пористые материалы.

Смеси газов — обычно гомогенные системы, однако часто необходимо принимать во внимание флуктуации плотности. Например, флуктуациями плотности и рассеиванием на них света объясняется голубой цвет неба (интенсивность рассеяния света обратно пропорциональна длине волны в четвертой степени).

Приведенная классификация показывает, что дисперсные системы — самые распространенные в природе состояния вещества.

В любых гетерогенных системах, особенно в высокодисперсных, природа границ между частицами дисперсной фазы и дисперсионной средой определяет многочисленные явления и процессы, характерные для данной системы: смачивание, зарождение новой фазы, все проявления сцепления и трения.

По характеру молекулярных взаимодействий на границе раздела фаз все дисперсные системы могут быть разбиты на две большие группы:

лиофильные — для них характерно сильное межмолекулярное взаимодействие на границе дисперсной фазы и дисперсионной среды. Такие системы могут образовываться самопроизвольно и являются термодинамически устойчивыми;

лиофобные — со слабым межмолекулярным взаимодействием на поверхности раздела. Такие системы требуют для своего образования затраты энергии, являются термодинамически неустойчивыми. Для их длительного существования необходима специальная стабилизация.

Четкой границы для этих групп провести нельзя. Между ними имеется широкий спектр промежуточных состояний (В. В. Бутков и др.).

Состав и строение твердых дисперсных сред (на примере ПМ и ТО)

Существует несколько определений физического состояния сырьевых материалов, объединяемых терминами «порошки», «сыпучие или порошковые материалы» и «сыпучие массы». К порошкам относят, как правило, частицы размером до нескольких сотен микрометров, а к сыпучим материалам — системы с более крупными частицами.

Дисперсными принято называть системы, состоящие из мелкоизмельченных частиц (дисперсная фаза), распределенных в какой-либо дисперсионной среде (воде, другом растворителе, воздухе). Аэродисперсными системами или аэрозолями называют системы, в которых дисперсионной средой является газ, а дисперсной фазой — твердые (пыль) или жидкие (туман) частицы. Дисперсная фаза может состоять из частиц разного размера (полидисперсная система) или из частиц одинакового размера (монодисперсная система). В том и другом случаях система может быть много- или однокомпонентной. Дисперсные системы, диаметр частиц которых не превышает несколько десятков (иногда сотен) микрометров, называют иногда пылевидными. В технике и технологии разных отраслей промышленности, в том числе и химической, принято считать подобные сыпучие системы порошковыми материалами (ПМ) или многокомпонентными порошковыми материалами (МПМ), или многокомпонентными полидисперсными порошковыми материалами (МППМ). Поэтому в дальнейшем под ПМ, МПМ и МППМ будем подразумевать дисперсные системы, состоящие из воздушной (газовой) дисперсионной среды и твердой дисперсной фазы, между частицами которой имеется физический контакт, а характерной особенностью является подвижность частиц относительно друг друга и способность перемещаться под действием внешней силы.

В соответствии с этим важнейшими характеристиками ПМ являются показатели их реологических свойств, определяемые текучестью (сыпучестью) и сопротивлением сдвигу (пределом текучести). Связь между частицами порошков обусловлена силами Ван-дер-Ваальса, имеющими молекулярную природу; когезионным взаимодействием; электрическим взаимодействием; капиллярными силами и силами механического сцепления. Прочность порошков определяется характером контактов между частицами и пропорциональна их числу на единицу площади сечения материала и средней прочности индивидуальных контактов. Число контактов определяется размером частиц и плотностью их упаковки. Аутогезия ПМ в разных технологиях может оказывать как положительное (например, в процессе грануляции), так и отрицательное действие (например, при хранении, транспортировке и др.).

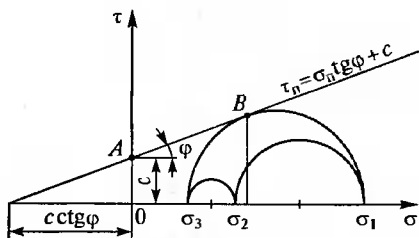


Рис. 4.1. Графическая интерпретация условия предельного равновесия ПМ:

σ_1 , σ_2 и σ_3 — соответственно наибольшее, среднее и наименьшее главные напряжения

Согласно этому в координатах (τ_n, σ_n) (рис. 4.1) прямая, проходящая через точки A, B , отсекает отрезок c , соответствующий величине сцепления. С помощью этих прямых, называемых линиями предела текучести, можно оценивать текучесть порошков и определять их исходные параметры, необходимые, например, при расчетах бункеров загрузочных устройств, циклонов и т. п. (рис. 4.2).

На основании представлений о ПМ как о сплошном твердом теле [1] можно считать, что ниже линии предела текучести порошок является жестким телом. Такое мнение позволяет применять к ПМ классические положения механики твердых тел [1, 3]. Для решения инженерных задач огибающую кривую ab обычно заменяют прямой AB (рис. 4.3).

Место реологии как одного из разделов технической механики сплошной среды показано в табл. 4.1. Упрощенная классификация ПМ, не учитывающая дисперсности и типа контактов между фазами, приведена в табл. 4.2. При определении реологического поведения ПМ данные таблицы позволяют отнести его к той или иной группе: сыпучим, жидко- и твердообразным (в зависимости от концентрации дисперсной фазы) или твердым.

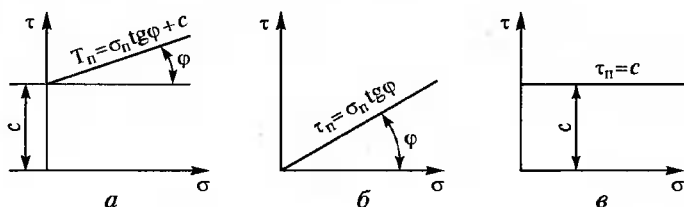


Рис. 4.2. Предельные прямые (кривые) сдвига для шихт:

a — связных; b — сыпучих; e — идеально связных

При этом один и тот же продукт, например, шихта или ее расплав в зависимости от температуры может быть отнесен к разным системам. Механическое воздействие (измельчение, компактирование) также в большинстве случаев вызывает переход из одного вида порошковой системы в другую.

Для анализа физико-химических и структурно-механических характеристик ПМ представляет интерес классификация реологических свойств сплошных сред с помощью механических моделей. Возможность такой классификации ПМ обоснована тем, что в процессе технологической обработки (увлажнения, смешения, грануляции и т.п.) МППМ переходит из одного реологического состояния в другое, часто противоположное по свойствам первому. Так, при подготовке ПМ к экструзии он увлажняется

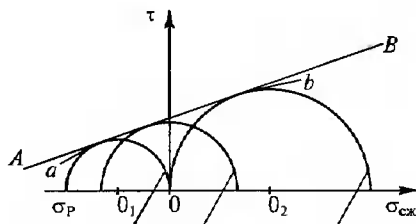


Рис. 4.3. Общий случай огибающей предельных (разрушающих) напряжений при сдвиге (по результатам испытаний образца на разрушение):

1 — простое растяжение; 2 — чистый сдвиг; 3 — простое сжатие

Таблица 4.1

Разделы технической механики сплошной среды

| Теоретическая механика Евклида | Теория упругости Р. Гука | Теория пластичности А. Сен-Венана | Реология* | Гидравлика | |
|--|---------------------------------------|---|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | И. Ньютона | Б. Паскаля |
| 1. Идеально твердое тело | 2. Упругое тело | 3. Пластическое тело | 4. Реологическое тело | 5. Истинно вязкая жидкость | 6. Идеальная жидкость |
| При любых нормальных касательных напряжениях деформация равна нулю | Напряжение пропорционально деформации | При достижении предельного напряжения сдвига начинаются пластические деформации | Линейные — составные из тел 2, 3, 5; нелинейные — эмпирические | Напряжения пропорциональны скорости | Вязкость и сжимаемость равны нулю |

* Греч. *rheos* — поток, течение.

Системы ПМ

| Дисперсионная среда | Система ПМ с дисперсной фазой | | |
|---------------------|-------------------------------|------------------|------------------|
| | твердой (т) | жидкой (ж) | газообразной (г) |
| Газ | Пыль, дым | Туман | Газ |
| Жидкость | Суспензия | Эмульсия | Пена |
| Твердое тело | Твердая суспензия, сплав | Твердая эмульсия | Пористое тело |

жидким связующим и из сыпучей среды превращается в среду с пластическими свойствами, а при дальнейшей обработке, например, сушке — в твердое (хрупкое) тело.


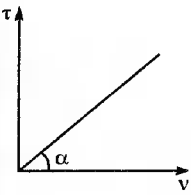
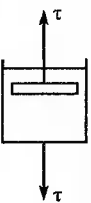
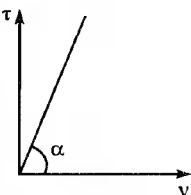
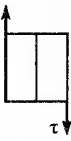
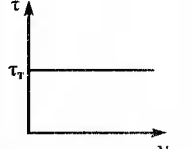
При рассмотрении механических моделей ПМ принимаются следующие положения: ПМ обладает предельным напряжением сдвига (при меньших напряжениях деформаций в ПМ не происходит); предельные напряжения сдвига разрушают ПМ; в ПМ не могут возникнуть напряжения большие предельного; напряженное состояние в любой точке ПМ описывается симметричным тензором напряжения; изменения напряжений в разных сечениях среды, проходящих через одну и ту же точку, описывает диаграмма Кулона—Мора; деформация ПМ происходит при сдвиге или скольжении объемов частиц под действием касательных напряжений вдоль поверхностей скольжения.

Реологическое поведение ПМ и дисперсных систем на их основе обуславливается столь большим числом взаимных связей, что математическое описание процесса возможно только при предварительном его упрощении. В этой связи целесообразно построение моделей (табл. 4.3), состоящих из разных комбинаций механических элементов (пружина, амортизатор, элемент трения), в которых под действием соответствующих сил возникают перемещения определенных видов. Перемещение каждого элемента моделирует подобное явление в реальных материалах [11]. При этом обычно деформации и скорости деформаций связаны линейно.

Группа нелинейных реологических тел описывается преимущественно эмпирическими зависимостями, в которых деформации и скорости деформаций связаны степенными или более сложными закономерностями. Реологические уравнения являются наиболее общими. Большинство уравнений теории упругости, пластичности, гидравлики могут быть получены в виде частных случаев из реологических.

Модель упругопластичной среды получается при последовательном соединении упругого элемента Гука (пружина с модулем упру-

Реологические модели простых сред (идеализированных тел)

| Модель | Вид модели | График течения | Уравнение | Условные обозначения |
|-------------------------------------|---|---|--|---|
| Гука (идеально упругая) |  |  | $\tau = vG$ $\sigma = \epsilon E$ | τ, σ — касательное и нормальное напряжения, Па; v, ϵ — угловая и линейная деформации; G, E — модули упругости при угловой и линейной деформации, Па |
| Ньютона (идеально вязкая) |  |  | $\tau = \eta v$ $\sigma = \eta_t \epsilon$ | v — скорость сдвига, с^{-1} ; η — вязкость при сдвиге, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ϵ — скорость продольного течения, с^{-1} ; η_t — вязкость при продольном течении (Ньютона), $\text{Па} \cdot \text{с}$ |
| Сен-Венана (идеально-пластичная) |  |  | При $\tau < \tau_T$ нет деформации, при $\tau = \tau_T$ нет течения | τ_T — предел текучести при сдвиге, Па |

гости G) и пластичного элемента Сен-Венана, имеющего предел текучести τ (рис. 4.4). При $\tau < \tau_T$ происходит упругая деформация материала, при $\tau = \tau_T$ — пластичное течение.

Модели вязкопластичных сред представлены на рис. 4.5. Используются они в основном для описания поведения ПМ при их переработке или испытаниях (процессы экструзии пластифицированных сред, термообработки паст и др.) без учета скоростей процесса.

В теории уплотнения ПМ (грануляция, брикетирование и т.п.) используют три типа обобщенных моделей, представляющих исходные порошки как сыпучесвязное, упруговязкопластичное и дискретное тела (рис. 4.5). Модель сыпучесвязного тела (рис. 4.6, а) позволяет оценить закономерности перетекания смеси уравнением предельного равновесия, показывающим соотношение напряжений по косой площадке σ_α и τ_α главных напряжений σ_1 и σ_2 , при котором происходит сдвиг, определяемый значениями коэффициентов внутреннего трения и сдвигового сцепления.

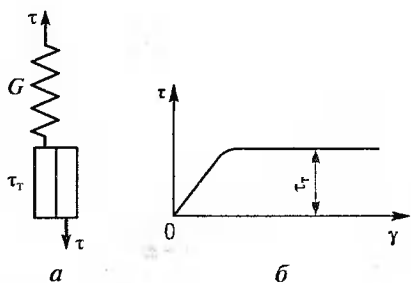


Рис. 4.4. Модель упругопластичного тела (а) и кривая зависимости $\tau-\gamma$ (б)

Упруговязкопластичная модель (рис. 4.6, б) характеризует тела, промежуточные между твердыми и жидкими. Уравнения их состояния получают разными комбинациями уравнений для эвклидова (недеформирующегося) и гукова твердых тел, паскалевой (не имеющей вязкости) и ньютоновой жидкостей.

Для определения характера деформации на разных стадиях уплотнения порошок рассматривается в виде системы, связь узлов которой описывается вязкоупругой моделью Бингама (см. рис. 4.5). При напряжении ниже минимального, вызывающем пластическую деформацию, порошок работает как упругое тело, а при превышении этого предела — как упругопластическое.

Модели, представляющие дисперсные системы (ПМ) как дискретное тело (рис. 4.6, в), построены по результатам анализа структуры смеси.

В основу всех моделей положено соотношение

$$T = F_1 n, \quad (4.2)$$

где T — прочность структуры на единицу площади; F_1 — средняя прочность единичного контакта между частицами структуры; n — число контактов на единицу площади сечения.

Это уравнение получено в предположении аддитивности работы контактов при разрушении ПМ. Все модели, характеризующие прочность сыпучего материала, делятся на три группы.

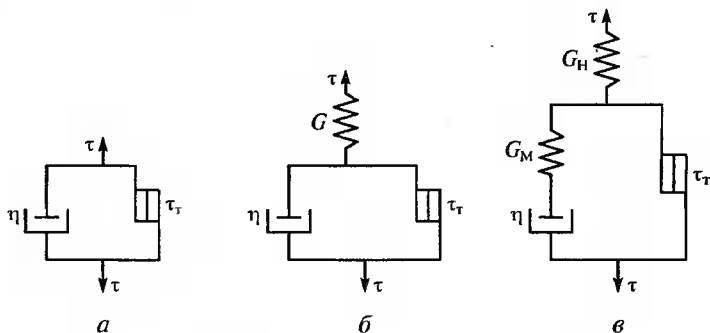


Рис. 4.5. Модели вязкопластичных сред:
а — Шведова—Бингама; б — Бингама; в — Шведова

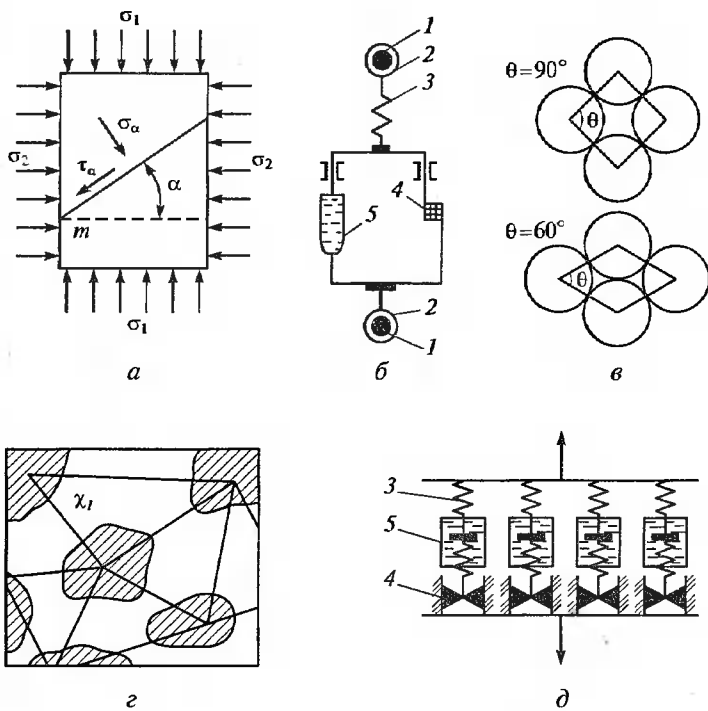


Рис. 4.6. Реологические модели ПМ:

a — сыпучесвязное тело; *b*, *d* — упруговязкопластичное тело; *в*, *г* — дискретное тело; 1 — зерна порошка; 2 — шарнирные сочленения; 3 — упругие элементы Гука; 4 — пластичные элементы Сен-Венана; 5 — вязкие элементы Ньютона

Для моделей 1-й группы принято, что ПМ состоят из сферических частиц одинаковых диаметров, т. е. монодисперсны. Необходимым условием такого расчета являются известные значения прочности индивидуальных контактов F_1 , структурного параметра m , определяющего степень упаковки частиц, размеров частиц $d(r)$ и пористости материала П.

Модель Румпфа:

$$T = (1 - \Pi) \Pi F_1 / d^2. \quad (4.3)$$

Модель Ребиндера, Щукина, Марголис:

$$T = 0,25 F_1 / (r^2 m^2). \quad (4.4)$$

Модели 2-й группы характеризуются частицами разных размеров. Формулы, предложенные на основе моделей 1-й и 2-й групп, устанавливают связь числа контактов с размерами и упаковкой частиц. Прочность индивидуальных контактов определяют экспе-

риментально или теоретически с учетом природы контактного взаимодействия тел.

Модели 3-й группы отличаются тем, что прочность индивидуальных контактов связывается с геометрическими параметрами ПМ — плотностью упаковки и размерами частиц. Прочность индивидуальных контактов принимается одинаковой.

Рассмотренные реологические характеристики и модели, основанные на теории сплошных и дискретных сред, позволяют не только оценить фактические значения структурно-механических и физико-химических свойств сред (ПМ), но и прогнозировать их изменения на разных стадиях хранения, подготовки и дальнейшей переработки (измельчения, смешения, дозирования, гранулирования и др.), обоснованно рассчитывать (выбирать) процессы и аппараты технологий, установки пылеочистки, переработки и вторичного использования твердых отходов.

Структурно-механические и физико-химические свойства рабочих сред (ПМ)

Порошковые материалы можно рассматривать как особую форму агрегатного состояния вещества, характеризующуюся определенными значениями температуры плавления, параметрами кристаллической решетки и другими известными свойствами твердых тел. Они имеют некоторые свойства, характерные для жидких сред: кинематическую вязкость, малое сопротивление напряжениям сдвига, способность гравитационно вытекать через отверстия и принимать форму сосуда, в который они помещены. Имеется и ряд свойств, характерных лишь для ПМ, — насыпная плотность, угол естественного откоса и обрушения, сводообразование, сыпучесть, слеживаемость и уплотняемость (табл. 4.4).

Именно эти свойства во многих случаях характеризуют ту или иную технологическую схему подготовки и переработки, качество целевого продукта и экологическую безопасность производства в целом. В свою очередь, они в большей степени зависят от размеров, формы и физико-химических свойств ингредиентов ПМ.

Размеры частиц ПМ, используемых на практике, колеблются в широких пределах: от долей микрометра до десятков миллиметров. Размеры частиц наполнителей и шлифовальных порошков имеют размеры 0,1 — 200 мкм, катализаторов и удобрений 1 — 5 мм, компонентов, используемых в производстве цемента, металлургических окатышей и другие 3 — 50 мм.

Широкий фракционный диапазон получаемых ПМ затрудняет правильный выбор методов их дальнейшей переработки и контроль за эффективностью установленного пылеулавливающего оборудования. Заинтересованность формой (морфологией) частиц в порошках и компактированных материалах обусловлена многими

причинами: во-первых, форма частиц — параметр экспрессной комплексной аттестации порошковых материалов (в результате кристаллохимических превращений частицы порошкообразных соединений часто приобретают свой морфологический тип, что позволяет однозначно характеризовать каждый этап предварительной подготовки сырья); во-вторых, форма частиц — параметр протекания механохимических процессов формирования структуры компактных материалов; в-третьих, знание и прогнозирование фор-

Таблица 4.4

Основные характеристики ПМ и расчетные зависимости

| Определяемый параметр | Расчетная формула | Условные обозначения |
|---|--|--|
| Эквивалентный диаметр частиц порошков | $d_3 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i/d_i)}$ | x_i — относительное содержание i -й фракции в смеси; d_i — среднегеометрический размер частицы |
| <p>Сыпучесть (текучесть) порошков:</p> <p>время, необходимое для сыпания 1 кг продукта, мин</p> <p>коэффициент сыпучести</p> <p>сыпучесть, г/(см²·с)</p> <p>коэффициент текучности порошка</p> | $\tau_c = \frac{\mu}{97146\alpha} 34,6 + \left(\frac{d}{15} + \frac{0,005}{\mu^3} \right)$ $m = 1 - 2 \left(\frac{\tau_0}{\sigma_n} + f_1 \right) \times (1 + f_1^2 - f_1)$ $Q = \frac{G_m}{S_3 \tau_1}$ $K_\tau = \frac{\tau r^n}{G}$ | <p>μ — коэффициент трения покоя; α — угол раствора конуса; d — средний диаметр частиц, мм</p> <p>τ_0 — напряжение сцепления; σ_n — нормальное напряжение; f_1 — коэффициент внутреннего трения</p> <p>G_m — количество порошка, просыпающегося за определенное время через установленный зазор, г; S_3 — площадь сечения зазора, см²</p> <p>τ — время вытекания порошка из воронки, с; r — радиус воронки, см; G — навеска порошка, г; $n = 2,58$ — коэффициент</p> |

| Определяемый параметр | Расчетная формула | Условные обозначения |
|--|--|---|
| Адгезионные свойства порошков: адгезионное напряжение, кПа сила адгезии | $A = F_0 / (0,785 d_n^2)$ $F_{ал} = 3(1 - D_ч)$ | F_0 — усилие отрыва пуансона от уплотненного материала, Н; d_n — диаметр пуансона, м $D_ч$ — диаметр частиц, мм |
| Слежалость (слеживаемость) порошка, % | $C = \frac{m_a}{m_0} 100$ | m_a — агломерированная масса, кг; m_0 — общая масса материала, кг |
| Пластическая прочность порошка, кПа | $\sigma_k = \frac{KP_m}{h_1^2}$ | K — константа конуса; P_m — сила сопротивления образца, Н; h_1 — глубина погружения конуса, м |
| Смачиваемость порошков | $\cos \theta = \frac{v_1^2 \eta_1 \sigma_2}{v_2^2 \eta_2 \sigma_1}$ | v_1, v_2 — скорости впитывания, г/мин; η_1, η_2 — вязкости, Па·с; σ_1, σ_2 — поверхностное натяжение воды и бензола, Н/см |
| Способность порошков к грануляции: коэффициент K_1 коэффициент K_2 Показатель формуемости | $K_1 = \frac{\gamma/\gamma_0}{P_{пл}}$ $K_2 = \frac{\sigma}{P_{пл}}$ $\Phi = \frac{\sigma_{сж}}{P_{пр}}$ | γ, γ_0 — текущая и начальная плотности материала, т/м ³ ; $P_{пл}$ — давление уплотнения, соответствующее началу упруго-пластических деформаций, Па; σ — прочность гранул на раздавливание, Па; $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии, Па; $P_{пр}$ — давление прессования необходимое для получения изопористого ПМ, Па |
| Водопоглощение порошка | $B = \frac{(m_1 - m) 100}{m}$ | m, m_1 — массы сухого и насыщенного водой порошка, г |

| Определяемый параметр | Расчетная формула | Условные обозначения |
|---|---|--|
| Показатель истирания порошка, г/см ² | $R_{\text{ист}} = \frac{m - m_1}{S}$ | m, m_1 — массы образца до и после истирания, г; S — площадь истирания, см ² |
| Насыпная плотность, г/см ³ | $\gamma_n = \frac{3f(\epsilon - a) + 2d(2a + \epsilon)}{6d},$ где $d = f + F\sqrt{Ff}$ | a, ϵ — насыпные плотности свободно насыпанного порошка и нижнего (сдавленного) слоя; F, f — площади нижнего и верхнего оснований пирамиды |

мы частиц необходимо для оптимального проектирования технологического оборудования, например, валковых прессов и ударных измельчителей (учитывая снижение абразивных характеристик порошков) или рукавных фильтров (с учетом максимального улавливания пыли фильтровальным материалом).

В промышленных процессах механической, термической и химической переработки сырья и полуфабрикатов образуются отходящие (отбросные) газы, в которых содержатся взвешенные частицы. Они обладают всем комплексом свойств ПМ, а газы (в том числе и воздух), содержащие взвешенные частицы, относятся к системам Г—Т (см. табл. 4.2). Промышленные газы — обычно сложные аэродисперсные системы, в которых дисперсная среда является смесью разных газов, взвешенные частицы полидисперсны и находятся в разных агрегатных состояниях.

Пыль в газах, отходящих от сырьевых и цементных сушилок, мельниц, грануляторов, смесителей, печей обжига колчедана, в аспирационном воздухе транспортных устройств и т. п., является следствием несовершенства оборудования и технологических процессов. В дымовых, генераторных, доменных, коксовых и других подобных газах содержится пыль, образующаяся в процессе горения топлива. Как продукт неполного сгорания органических веществ (топлива) при недостатке воздуха образуется и уносится сажа. Если в газах содержатся какие-либо вещества в парообразном состоянии, то при охлаждении до определенной температуры пары конденсируются и переходят в жидкое или твердое состояние. Примерами взвесей, образовавшихся в результате конденсации, могут служить: туман серной кислоты в отходящих газах выпарных аппаратов, туман смол в генераторных и коксовых газах, пыль цветных металлов (цинка, олова, свинца,

сурьмы и др.) с низкой температурой испарения в газах. Пыли, образующиеся в результате конденсации паров, называются возгонами.

Некоторые характеристики наиболее распространенных промышленных пылей приведены в табл. 4.5.

Несмотря на внешнее разнообразие исходного сырья, используемого в порошковых технологиях, ингредиенты того или иного ПМ (как было показано ранее) не только подчиняются одним и тем же теоретическим законам инженерной реологии, но и на практике обладают сходными технологическими свойствами, условиями их предварительной подготовки и последующей переработки. Например, химическая промышленность выпускает широкий ассортимент материалов и изделий в порошкообразном состоянии: минеральные удобрения, соду, фото- и химические реактивы и многие другие. Эти материалы представляют однотипные кристаллические системы, для которых процессы измельчения, смешения, дозирования, уплотнения, сушки, взвешивания, хранения и пылеулавливания, переработки отходов и другие протекают, как правило, по одному механизму и подчиняются общим закономерностям.

Правомерность применения той или иной расчетной схемы (физическая и математическая модель процесса) определяется, в конечном счете, совокупностью структурно-механических и физико-химических характеристик конкретных ПМ. Экспериментами установлено, что определяющими при решении практических задач создания высокоэффективных, малоотходных, энергосберегающих и экологически безопасных технологий являются параметры, характеризующие способность к изменению объема ПМ под действием внешних нагрузок и механохимическую активность порошков или их ингредиентов.

Классическим примером порошков МППМ является стекольная шихта, используемая как основное сырье в производстве стекла и стеклянного волокна. Основываясь на данные [1] и результаты исследований [3, 4]

доказано, что диаграмма «напряжение — упругая деформация» для шихты имеет характерный вид (рис. 4.7).

Следовательно, в качестве физической модели уплотнения шихт можно использовать (с учетом характерных особенностей стекольных шихт) обобщенную модель уплотнения порошковых материалов, разработанную проф. М. Б. Ге-

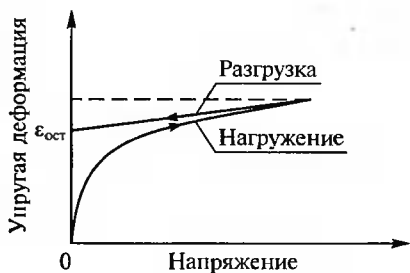


Рис. 4.7. Зависимость σ — ϵ для стекольной шихты

пераловым. Согласно такой модели для сжимаемых сред с зернисто-пористой структурой относительное изменение объема определяется средним нормальным напряжением

$$\epsilon_V = f(\sigma_c). \quad (4.5)$$

Вид функции $f(\sigma_c)$ для каждого материала зависит от структурно-механических и физико-химических свойств порошка и других параметров, но не зависит от того, при каких условиях — простом или сложном напряженном состоянии — σ_c достигает данного значения.

Все основные свойства продукта, технологии и виды оборудования для решения вопросов ресурсосбережения и экологической безопасности рассмотрим во взаимосвязи (на примере производства стекольных шихт разных составов и назначений).

Химический состав, кг/100 кг стекла, борсодержащей шихты для стекла E ($B_2O_3 = 10\%$):

| Шихта | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Кварцевый песок | 52,52 | 52,52 | 52,52 | 50,35 |
| Мел | 17,83 | 1,20 | 17,83 | 1,10 |
| Доломит | 21,11 | 21,11 | 21,1 | 3,17 |
| Глинозем | 14,70 | 14,70 | 14,70 | 14,70 |
| Плавиновый шпат | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |
| Нитрат кальция | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 1,43 |
| Мышьяковистый ангидрид | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| Борная кислота | 19,68 | — | — | — |
| Борат кальция | — | 23,39 | — | — |
| Борный ангидрид | — | — | 25,82 | — |
| Борный концентрат | — | — | — | 32,60 |

Химический состав, кг/100 кг стекла, борсодержащей шихты для хрустального стекла (содержание $PbO = 24\%$):

| Шихта | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Кварцевый песок | 52,13 | 58,3 | 58,3 | 58,3 |
| Силикат свинца | 35,7 | — | — | — |
| Нитрат свинца | — | 37,4 | — | — |
| Сурик | — | — | 25,7 | — |
| Глет | — | — | — | 25,4 |
| Поташ* | 14,1/осн. | 24,2/осн. | 16,7/осн. | 15,1/осн. |
| Селитра калиевая | 13,3 | — | 11,1 | 13,3 |
| Борная кислота | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| Оксид цинка | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Оксид мышьяка | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

* Основность < 1 мм — 78,13; остальное — H_2O .

Характеристики наиболее распространенных промышленных полей
 1950

| Вид пыли | Размер частицы d , мкм | Плотность материала γ , г/м ³ | Насыпная плотность $\gamma_{н.}$, г/м ³ | Угол естественного откоса (обрушения) $\alpha_{ст.}$, град | Разрывная прочность пылевого слоя P , Па | Удельное электросопротивление пыли ρ , Ом·м |
|--|-----------------------------|---|---|---|--|---|
| Пыль печи спекания бокситной шихты* ¹ | 1—40 (d_{50} — 8) | 2,40 | 0,80 | 63 | 151 | $6 \cdot 10^5$ ($t = 20^\circ\text{C}$) $1,2 \cdot 10^6$ ($t = 25^\circ\text{C}$) |
| Пыль печи кальцинации алюминиевого завода* ¹ | 2,5—25 (d_{50} — 9,6) | 3,22 | 0,89 | 66 | 403 | — |
| Пыль при помоле известняка в шахтной мельнице на аглофабрике | (d_{50} — 25) | 2,71 | 0,92 | 67 | 178 | $6,4 \cdot 10^8$ ($t = 20^\circ\text{C}$) $1,2 \cdot 10^9$ ($t = 200^\circ\text{C}$) |
| Пыль при сушке известняка в сушильном барабане* ² | 1,0—10 (d_{50} — 2,9) | 2,90 | 0,55 | 62 | 880 | — |
| Летучая зола от сжигания эстонских сланцев* ² | 2,5—40 (d_{50} — 13) | 2,56 | 0,88 | 50 | 34 | $1,8 \cdot 10^{10}$ ($t = 50^\circ\text{C}$) $6,5 \cdot 10^{10}$ ($t = 110^\circ\text{C}$) |
| Зола от сжигания угля Подмосковского бассейна* ¹ | 2,5—40 (d_{50} — 15) | 2,24 | 0,78 | 58 | 134 | $1,5 \cdot 10^7$ ($t = 20^\circ\text{C}$) $2,7 \cdot 10^8$ ($t = 250^\circ\text{C}$) |

| | | | | | | |
|---|------------------------------|------|------|------|-----|---|
| Пыль при рассеве и транспортировке формовочных песков в литейном цехе*3 | 1,6—25 ($d_{50} - 9$) | 2,40 | 0,59 | 59 | 63 | — |
| Пыль вращающейся печи обжига клинкера*1: | | | | | | |
| а) при мокром способе производства цемента | 1,0—10 ($d_{50} - 2,8$) | 2,75 | 0,56 | 78 | 320 | $1 \cdot 10^8 (t = 20^\circ\text{C})$ $4 \cdot 10^8 (t = 250^\circ\text{C})$ |
| б) при сухом способе производства цемента | 1,0—16 ($d_{50} - 4,9$) | 2,89 | 0,74 | 57,5 | 635 | $2,6 \cdot 10^7 (t = 20^\circ\text{C})$ $9 \cdot 10^7 (t = 250^\circ\text{C})$ |
| Пыль обжига колчедана (огарок) в печи типа КС-450 сернокислотного производства*2 | 1—10 ($d_{50} - 3,7$) | 4,50 | 0,57 | 57 | 397 | — |
| Двухосновная соль гипохлорита кальция (ДСГПК), выделяющая при сушке продукта в сушильном агрегате содового производства*2 | 16—250 ($d_{50} - 98$) | 1,98 | 0,52 | 61 | 310 | — |
| Белая сажа марки У-333 в цехе синтетического каучука*1 | 0,4—4 ($d_{50} - 1,15$) | 2,12 | 0,12 | 72 | 132 | — |

| Вид пыли | Размер частицы d , мкм | Плотность материала γ , г/м ³ | Насыпная плотность $\gamma_{н}$, г/м ³ | Угол естественного откоса (обрушения) $\alpha_{ст}$, град | Разрывная прочность пылевого слоя P , Па | Удельное электросопротивление пыли ρ , Ом·м |
|---|------------------------------|---|--|--|--|---|
| Пыль печных газов в производстве желтого фосфора в электропечи ОКБ-640*2 | 1,6—40 (d_{50} — 6) | 2,40 | 0,21 | 56 | 730 | $3,5 \cdot 10^8$ ($t = 20^\circ\text{C}$) $3 \cdot 10^9$ ($t = 250^\circ\text{C}$) |
| Пыль, выделяющаяся при развеске ингредиентов резиновой смеси завода резинотехнических изделий*4 | 4,0—40 (d_{50} — 20) | 1,41 | 0,35 | 65 | 921 | — |
| То же, при просеве на ситах*4 | 2,5—40 (d_{50} — 6,7) | 2,15 | 0,49 | 63 | 409 | — |
| Эпоксидный порошок П-ЭП, выделяющийся при нанесении защитных покрытий на лакокрасочном заводе*4 | 6,3—63 (d_{50} — 31) | 1,30 | 0,51 | 60 | 80 | — |
| Пыль распылительной сушилки производства стирального порошка «Нева» на заводе СМС*3 | 100—400 (d_{50} — 150) | 1,80 | 0,30 | 50 | 304 | — |

| | | | | | | |
|---|------------------------------|------|------|-------|-------|---|
| Пыль распылительной сушилки производства энтобактрина* ³ | 2,5—40 (d_{50} — 31) | 1,48 | 0,56 | 64 | 122,6 | — |
| Пыль при сушке и упаковке кормовых дрожжей* ³ | 4,0—25 (d_{50} — 13) | 1,35 | 0,47 | 66 | 50 | — |
| Пыль от прокаливания катализаторной массы НТК-4 в электропечи ЭПБВ-15 на заводе азотных удобрений* ¹ | 1—14 (d_{50} — 1,55) | 3,80 | 0,76 | 73 | 526 | — |
| Пыль при сушке калийного удобрения в трубе-сушилке калийного комбината* ¹ | 1,6—40 (d_{50} — 18,5) | 2,05 | 0,64 | 90 | 376 | — |
| Пыль при сушке флотационного калийно-магниевого концентрата в аппарате КС калийного комбината* ³ | 4—100 (d_{50} — 18) | 2,50 | 0,78 | 56,50 | < 30 | — |
| Пыль стекольной шихты* ¹ | 3—150 (d_{50} — 37) | 2,24 | 1,30 | 42,50 | < 620 | — |

Пыль: *¹ — перед системой газоочистки;

*² — из бункера электрофильтра;

*³ — из бункера батарейного циклона;

*⁴ — из бункера рукавного фильтра.

Далее приведены результаты предварительного ранжирования параметров и их верхние и нижние пределы:

I. Входные: 1 — гранулометрический состав шихты 0,02—1,50 мм; 2 — химический состав шихты; 3 — диаметр валков 160—1200 мм; 4 — зазор между валками 1—10 мм; 5 — угол подачи шихты 40—85 град; 6 — насыпная плотность шихты 680—1100 кг/м³; 7 — химическая однородность шихты по CaCO₃ 21—35 %; 8 — частота вращения валков 8—60 мин⁻¹; 9 — производительность пресса 0,300—5,0 т/ч; 10 — направление прокатки шихты вертикальное или горизонтальное.

II. Управляющие: 1 — плотность шихты после утряски или подпрессования 0,750—1,25 г/см³; 2 — скорость прокатки 0,3—0,7 м/с; 3 — среднее нормальное напряжение 100—300 МПа; 4 — влажность шихты 7, 3—8; 5 — коэффициент внешнего трения на контакте шихта/поверхность валка 0,2—0,6; 6 — коэффициент внутреннего трения 0,2—0,8; 7 — форма выполнения поверхности валков гладкая или профильная; 8 — сыпучесть порошкообразной шихты 250—350 кг/(м·с); 9 — пластическая прочность 10—25 кПа; 10 — коэффициент бокового давления 0,3—0,6; 11 — связующие вещества водные, органические и др.; 12 — температура шихты перед компактированием 30—300 °С; 13 — протекание обменных и твердофазных реакций между Ca(NO₃)₂·4H₂O и водой, раствором Ca(NO₃)₂·nH₂O и доломитом, борной кислотой, водой и др.; 14 — охлаждение компактированной шихты до 150—200 °С; 15 — сушка или спекание компактированной шихты при 200—800 °С.

III. Возмущающие: 1 — климатические условия (летние, зимние); 2 — линейная величина износа рабочей поверхности валков, 1—8 мм; 3 — виды износа (абразивный, коррозионный и др.); 4 — попадание в зазор между валками инородных предметов (порошка, металлов и др.).

IV. Выходные: 1 — плотность плитки 1,0—3,0 кг/м³; 2 — размеры плитки (5×10×2)—(70×100×8) мм; 3 — гранулометрический состав раздробленной плитки 1—20 мм; 4 — химическая однородность плитки по CaCO₃, 21—25; 5 — прочность плитки на сжатие 2,0—6,5 МПа, на растяжение — 1,5—3, на излом — 0,3—4,0 МПа; 6 — динамическая прочность; 7 — химический состав плитки; 8 — теплопроводность плитки 0,3—0,5 Вт/(м·°С); 9 — удельное электросопротивление плитки; 10 — слеживаемость плитки; 11 — пористость плитки; 12 — насыпная плотность плитки.

Аналогично ранжируют факторы подсистем последующей переработки стекольных шихт. Генеральное сопоставление параметров всех подсистем показало, что комплексным показателем качества функционирования этих уровней является технологическая эффективность, отражающая синтез разработанных процессов в единое малоотходное производство и эколого-экономический фактор.

Сырьевые материалы, применяемые для производства стекла, условно делят на главные и вспомогательные. К главным сырьевым материалам относят природные или искусственные вещества, служащие для введения в стекломассу кислотных, щелочных и щелочно-земельных оксидов и диоксидов, являющихся основой для образования стекол. Вспомогательными сырьевыми материалами являются соединения химических элементов, используемые для окрашивания и глушения (придания непрозрачности) стекла, улучшения качества стекломассы, ускорения варки стекла.

По назначению эти соединения разделяют:

на стеклообразующие — кремнезем (диоксид кремния), карбонат натрия, калия, кальция, магния, оксиды алюминия, цинка, свинца, бора и др.;

ускоряющие варку стекла — соединения алюминия, бора, нитраты калия, натрия;

окрашивающие стекло: в зеленый цвет — соединения хрома, железа, празеодима; в синий и голубой — соединения кобальта, меди; в фиолетовый цвет — соединения марганца, никеля, неодима; в желтый — соединения кадмия, серебра, церия, титана и урана; в красный и розовый цвета — соединения меди, селена, золота, эрбия, элементарные селен и золото;

глушащие — соединения фтора, фосфора, олова;

обесцвечивающие — соединения селена, кобальта, никеля, марганца, неодима, эрбия, церия, мышьяка, нитраты калия, натрия;

осветляющие — соединения мышьяка, сурьмы, цезия, нитраты калия и натрия, сульфат натрия;

окисляющие — нитраты натрия и калия, соединения мышьяка, цезия;

восстанавливающие — углерод, соединения олова.

Многие природные сырьевые материалы (кварцевый песок, доломит, мел, известняк, сульфат натрия и др.) нельзя использовать для приготовления стекольной шихты без предварительной подготовки, включающей, как правило, растаривание, разрыхление, измельчение, сортировку, классификацию, сушку, обогащение, смешение и грануляцию. Последовательность и состав операций зависят от вида производства и указываются в технологическом регламенте (технических условиях).

4.2. Некоторые свойства и физические основы переноса аэрозольных частиц

Большое многообразие промышленных выбросов в атмосферу в виде пыли, дыма и тумана можно определить как аэрозольные выбросы, образующие с газообразной средой дисперсную систему с твердой или жидкой дисперсной фазой. Таким образом, аэро-

золями являются дисперсные системы, лежащие в огромном интервале размеров частиц — от 10^{-3} до 10^3 мкм [12].

По способу получения аэрозоли могут быть дисперсионными, образующимися при диспергировании (измельчении, распылении) твердых тел и при переходе порошкообразных тел во взвешенное состояние под действием воздушных потоков, например, в системах аспирации. Такие аэрозоли обычно называют пылями. Другой тип аэрозолей — конденсационный, образующийся при объемной конденсации перенасыщенных паров, ведущих к образованию аэрозольных частиц. Их обычно называют дымами (например, дымы металлургических печей).

Различие между дисперсионными и конденсационными аэрозолями состоит в том, что дисперсионные аэрозоли значительно крупнее конденсационных. Аэрозольные частицы конденсационных аэрозолей — рыхлые агрегаты, состоящие из большого числа первичных частиц. Дисперсионные аэрозоли обычно состоят из индивидуальных или слабо агрегированных частиц неправильной формы.

В процессах газоочистки могут участвовать аэрозоли дисперсионные и конденсационные, а также содержащие одновременно частицы конденсационного и дисперсионного происхождения. Как правило, в этих процессах имеет место обеспыливание аэродисперсных систем с большим содержанием аэрозольных частиц в единице объема или с большой запыленностью ($> 0,1$ г/м³).

В аэродисперсных системах происходит интенсивная, коагуляция аэрозольных частиц, обуславливающая образование агрегатов с увеличенными размерами. Агрегаты в аэрозолях могут образовываться при коагуляции индивидуальных частиц, а также в результате неполной дезагрегации порошкообразных тел при их переходе в аэрозольное состояние. Число первичных частиц, образующих агрегат, может достигать многих тысяч. Так, при производстве высокодисперсного технического углерода с удельной поверхностью 95—75 м²/г в реакторе в результате газовых реакций образуются первичные сферические частицы углерода размером 33—39 нм. Однако в улавливающие фильтры поступают агрегаты технического углерода размером более 1,0 мкм.

Скорость коагуляции аэрозолей возрастает с уменьшением размера первичных частиц, а также с увеличением их концентрации. Это подтверждается экспериментами [11] по коагуляции в турбулентном потоке.

Эффективность турбулентной коагуляции

| | | | | | | | | |
|---|-----|------|-----|----|----|-----|-----|------|
| Число частиц, $10^5/\text{см}^3$ | 0,3 | 1,0 | 3,0 | 10 | 30 | 100 | 300 | 1000 |
| Скорость увеличения средней массы частицы, $10^{-2}/\text{мин}$ | 0,2 | 0,62 | 1,8 | 6 | 18 | 60 | 180 | 600 |

Таким образом, в результате интенсивной коагуляции промышленные аэрозоли обычно состоят из агрегатов.

Скоагулированные аэрозоли, как правило, являются полидисперсными, характеризующимися статистическим рядом размеров частиц или фракционным составом, определяемым распределением размеров аэрозольных частиц от минимального до максимального.

В механике аэрозолей для высокодисперсных аэрозолей, когда размер частицы соизмерим или меньше длины пути газовых молекул, вводится поправка Кенингема [12]:

| | | | | |
|--------------------------|------|------|------|-----|
| Радиус частиц, мкм | 0,15 | 0,5 | 1,5 | 5,0 |
| Поправка Кенингема | 1,57 | 1,16 | 1,03 | 1,0 |

Однако в большинстве случаев размер частиц промышленных аэрозолей более 1 мкм. Как следует из приведенных данных, для таких аэрозолей поправку Кенингема можно не учитывать; в дальнейшем изложении эта поправка исключена.

Аэрозольные частицы при газоочистке переносятся в результате действия на них сил гидродинамического, центробежного или электрического поля. Во всех случаях осаждение происходит на осадительную поверхность или с накоплением осадка (нестационарный процесс), или с его одновременным в процессе осаждения удалением (стационарный процесс).

Задача заключается в том, чтобы найти обобщенную аналитическую зависимость для скорости, определяющей осаждение аэрозольных частиц в разных силовых полях. Будем исходить из общего определения скорости аэрозольного потока в градиентном силовом поле:

$$\bar{w} = -\frac{1}{\mu} \text{grad}(F), \quad (4.6)$$

где μ — вязкий режим переноса аэрозольных частиц; знак «-» указывает противоположные направления \bar{w} и $\text{grad}(F)$.

Воспользуемся формулой (4.6) для описания переноса аэрозольных частиц в конкретном силовом поле. Так, движение аэрозольных частиц в ряде случаев может быть описано на основании закона Стокса, определяющего сопротивление среды движущимся аэрозольным частицам [12]. В соответствии с этим законом движение аэрозольных частиц в газообразной среде может быть определено их подвижностью, характеризующей соотношение между скоростью частицы w и действующей на нее стоксовой силой F_S :

$$w = BF_S, \quad (4.7)$$

где $B = 1/6\pi\mu r$ — подвижность аэрозольных частиц; $F_S = mg$ — сила тяжести.

Частным случаем такого движения является осаждение аэрозольных частиц *под действием силы тяжести*. Такое осаждение, называемое *седиментацией*, описывается уравнением (4.7). Тогда

$$w_S = Bmg. \quad (4.8)$$

Движение аэрозольных частиц в *электрическом поле* принципиально ничем не отличается от движения в поле гидродинамических сил. Униполярная зарядка аэрозольных частиц в электрическом поле обуславливает их перемещение по направлению силовых линий этого поля. Движущей силой процесса в этом случае является $\text{grad}(\varphi)$, тогда скорость переноса аэрозольных частиц записывается по аналогии с уравнением (4.6) в виде

$$\bar{w}_E = -k\text{grad}(\varphi), \quad (4.9)$$

где $k = Bq$ — электрическая подвижность аэрозольных частиц; q — заряд аэрозольной частицы; $\text{grad}(\varphi) = -\vec{E}$.

Следовательно,

$$\bar{w}_E = k\vec{E}. \quad (4.10)$$

Это уравнение аналогично уравнению (4.7), в котором $F_S = qE$.

В поле *коронного разряда* (в электрофильтрах) аэрозольные частицы приобретают максимальный заряд, с учетом которого скорость (4.10) может быть преобразована в скорость дрейфа, характеризующую перенос аэрозольных частиц в межэлектродном пространстве электрофильтра.

Широкий круг задач в газоочистке при фильтрации аэрозолей через *волоконистые, слоевые (зернистые) и рукавные фильтры* связан с переносом аэрозольных частиц в пористых средах.

Скорость такого переноса определяется известным уравнением Дарси — частным случаем уравнения (4.6), в котором движущей силой истечения газа в пористой среде является градиент давления:

$$\bar{w} = (-K_F/\mu)\text{grad}(p). \quad (4.11)$$

Однако при переносе аэрозольных частиц в пористой среде происходит их инерционное торможение перед препятствиями, на которых они осаждаются.

Таким образом, фильтрация аэрозолей через пористую перегородку отличается от чистовязкого режима истечения, когда сопротивление строго пропорционально скорости газа. При воздействии на аэрозольные частицы внешних сил движение будет определяться силовым полем $\text{grad}(\Delta F)$. Скорость переноса аэрозольных частиц в этом случае

$$\bar{w} = (-K_F/\mu)\text{grad}(\Delta F), \quad (4.12)$$

где $\Delta F = F/(\pi r^2)$ — удельная сила, действующая на аэрозольную частицу по направлению нормали к осадительной поверхности; πr^2 — мидельное сечение аэрозольной частицы;

$$K_F = (w/\Delta F)\mu_{st} \quad (4.13)$$

определим как аэрозольную проницаемость силового поля $\text{grad}(\Delta F)$; здесь $l_{st} = w\tau$ — путь инерционного торможения аэрозольной частицы.

Скорость переноса аэрозольных частиц в результате действия таких сил, как стоксовы (например, сила тяжести) и электрические, определяется только физическими свойствами аэрозольных частиц — их подвижностью и не зависит от координат силового поля. Перенос же аэрозольных частиц в силовом поле $\text{grad}(p)$ или $\text{grad}(\Delta F)$ зависит как от их физических свойств, так и от координат силового поля. Так, например, осаждение аэрозольных частиц в циклоне будет определяться как их физическими свойствами, так и размерами циклона [5].

4.3. Основные свойства и способы концентрирования растворов

Общие сведения

Раствор — гомогенная смесь, состоящая из растворителя и растворенного вещества. К растворителям относятся вода и ряд органических соединений: бензол, толуол, фенол, ацетон, дихлорэтан, спирты. Растворы могут состоять из двух, трех и более компонентов.

Концентрацией раствора принято называть массовое количество растворенных твердых веществ в определенном массовом или объемном количестве раствора или растворителя (воды). В технике часто пользуются объемной концентрацией — массой растворенного вещества, кг, в 1 м^3 раствора. Наряду с объемной концентрацией в практических расчетах применяется массовая концентрация, выраженная в массовых долях (или массовых процентах), т. е. в виде отношения массы растворенного твердого вещества к массе всего раствора.

Объемная концентрация b , г/м^3 , и массовая концентрация B , %, связаны зависимостью

$$b = 0,01 \gamma B, \quad (4.14)$$

где γ — плотность раствора, г/м^3 .

Для водных растворов многих веществ приближенное значение плотности раствора, г/м^3 , можно определить по формуле

$$\gamma = 1 + 0,009B. \quad (4.15)$$

Из формул (4.14) и (4.15) находим

$$B = \frac{-10 + \sqrt{100 - 0,36b}}{0,18}. \quad (4.16)$$

Растворение любого количества твердого вещества в воде ограничено. При заданной температуре раствор имеет определенную концентрацию насыщения, соответствующую установившемуся равновесию между растворившейся и оставшейся нерастворенной частью вещества.

Количество растворенного вещества в насыщенном растворе, отнесенное к определенному количеству раствора, называется растворимостью. Растворимость равна концентрации насыщенного раствора и зависит от температуры, а также от свойств растворенного вещества и растворителя. Для большинства минеральных солей растворимость с повышением температуры возрастает, но для некоторых веществ уменьшается или при заданной температуре принимает максимальное значение (рис. 4.8, табл. 4.6).

Насыщенный раствор содержит максимально возможное количество растворенного вещества в растворителе при данных условиях. Раствор, в котором концентрация растворенного вещества больше, чем в насыщенном, пересыщен и избыток вещества выпадает в виде кристаллов в осадок.

На практике чаще всего концентрации растворенных веществ меньше, чем в насыщенных растворах.

Такие растворы выпаривают до предельного насыщения, а затем передают на кристаллизацию и выделение солей. Растворение минеральных солей следует рассматривать как реакцию взаимодействия их с водой, протекающую в диффузионной области. Процесс растворения большинства солей в воде подчиняется законам молекулярной диффузии, скорость растворения выражается формулой

$$\frac{dm}{dt} = K_m F (b^* - b_n), \quad (4.17)$$

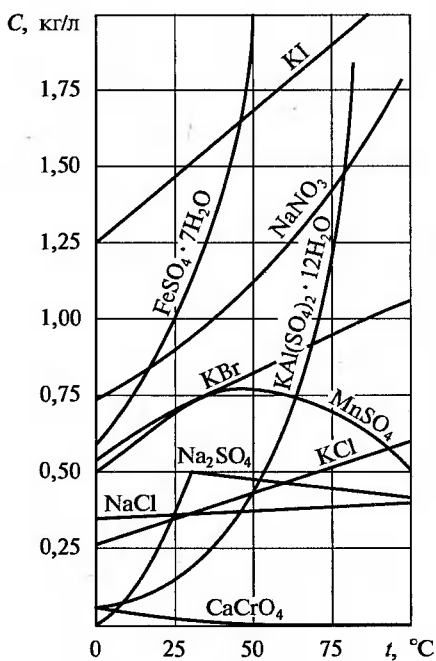


Рис. 4.8. Зависимость растворимости некоторых солей в воде от температуры

Растворимость твердых веществ в воде [6], % по массе

| Минеральные соли | Температура, °С | | | | | | | | |
|---|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 |
| CaCl ₂ | 37,3 | 39,4 | 42,7 | 50,1 | 53,5 | 56,9 | 57,8 | 59,5 | 61,4 |
| Ca(NO ₃) ₂ | 50,5 | 53,6 | 55,5 | 59,4 | 65,3 | 73,0 | 78,0 | 78,2 | 78,4 |
| CuSO ₄ | 12,9 | 14,8 | 17,2 | 20,0 | 22,8 | 25,1 | 28,1 | 34,9 | 42,4 |
| FeSO ₄ | 13,5 | 17,0 | 21,0 | 24,8 | 28,7 | 32,3 | 35,5 | 30,5 | 24,0 |
| K ₂ CO ₃ | 51,9 | 52,2 | 52,8 | 53,4 | 53,9 | 54,8 | 55,9 | 58,3 | 60,9 |
| KCl | 22,2 | 23,8 | 25,5 | 27,2 | 28,7 | 30,1 | 31,3 | 33,8 | 36,0 |
| KNO ₃ | 11,6 | 17,7 | 24,1 | 31,5 | 39,1 | 46,2 | 52,0 | 62,8 | 71,1 |
| MgCl ₂ | 34,6 | 34,9 | 35,3 | 35,6 | 36,5 | 37,0 | 37,9 | 39,8 | 42,2 |
| MgSO ₄ | — | 23,6 | 26,2 | 29,0 | 31,3 | 33,5 | 35,0 | 38,6 | 40,6 |
| NH ₄ Cl | 23,0 | 25,0 | 27,3 | 29,3 | 31,4 | 33,5 | 35,6 | 39,6 | 43,6 |
| NH ₄ NO ₃ | 54,2 | 59,1 | 63,9 | 70,8 | 74,8 | 78,0 | 80,4 | 86,2 | 91,0 |
| (NH ₄) ₂ SO ₄ | 41,4 | 42,2 | 43 | 43,8 | 44,8 | 45,8 | 46,8 | 48,8 | 50,8 |
| Na ₂ CO ₃ | 6,4 | 11,2 | 17,8 | 29,0 | 32,8 | 37,2 | 31,7 | 30,8 | 30,8 |
| NaCl | 26,3 | 26,3 | 26,4 | 26,5 | 26,7 | 26,9 | 27,1 | 27,6 | 28,2 |
| NaNO ₃ | 42,2 | 44,6 | 46,8 | 49,0 | 51,2 | 53,3 | 55,9 | 59,7 | 64,3 |
| Na ₂ SO ₄ | 4,5 | 8,2 | 16,1 | 29,1 | 32,5 | 31,8 | 31,3 | 30,4 | 29,9 |

где m — масса растворяющегося вещества, кг; K_m — коэффициент скорости растворения; F — начальная суммарная площадь поверхности частиц растворяемого вещества, м²; $b_{н}$, b^* — концентрации начальная и насыщения, кг/м³.

Массу растворенного за определенное время вещества можно представить зависимостью

$$m = K_m F (\Delta b_{н} - \Delta b_{к}) \tau / 3 \ln (\Delta b_{н} - \Delta b_{к}), \quad (4.18)$$

где $\Delta b_{н} = b^* - b_{н}$, $\Delta b_{к} = b^* - b_{к}$ — движущие силы процесса; $b_{к}$ — конечная концентрация раствора; τ — время, ч.

Для применения формулы (4.18) необходимо иметь экспериментальные данные и, особенно, для значения K_m , зависящего от температуры раствора, скорости перемешивания и природы вещества.

Скорость растворения для диффузионно-растворяющихся солей выразим в виде

$$K_m = \psi_m \Delta P^{1/3} \mu_{ж} (D_{\mu_{ж}})^{2/3}, \quad (4.19)$$

где $\psi_m = 70 \pm 10$ — постоянная для всех диффузионно-растворимых солей; ΔP — избыточное давление в аппарате, МПа; $D_{\mu_{ж}}$ — эффективный коэффициент диффузии при вязкости $\mu_{ж} = 1$:

$$(D_{\mu_{ж}})_T = (D_{\mu_{ж}})_{298} T/298, \quad (4.20)$$

где $(D_{\mu_{ж}})_T$ и $(D_{\mu_{ж}})_{298}$ — эффективные коэффициенты диффузии соли при концентрации раствора b и температурах T и 298 К.

Значения $D_{\mu_{ж}}$ или $\mu_{ж}$ при 298 К (25 °С) для растворов многих солей приводятся в справочной литературе.

Для расчета кристаллизации можно воспользоваться зависимостью

$$K_m = f(\text{Re}, \text{Ar}, E_a). \quad (4.21)$$

Здесь числа Рейнольдса $\text{Re} = \rho v l / \mu$ и Архимеда $\text{Ar} = (g l^3 / v^2) (\rho_{ж} - \rho_{г}) / \rho_{ж}$, где ρ — плотность, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости (или газа), v и l — характерные скорость и линейный размер обтекаемого тела, характеризуют движение раствора при перемешивании и осаждении солей из раствора; E_a — энергия активации процесса, Дж/моль.

Теплофизические свойства растворов

Плотность раствора в зависимости от содержания в нем сухого вещества (рис. 4.9) вычисляется по формуле

$$\rho = \rho_v / [1 - 0,01B(1 - \rho_v / \rho_c)], \quad (4.22)$$

где ρ_v, ρ_c — плотности воды и сухого растворимого вещества, г/см³; B — массовая концентрация раствора, %.

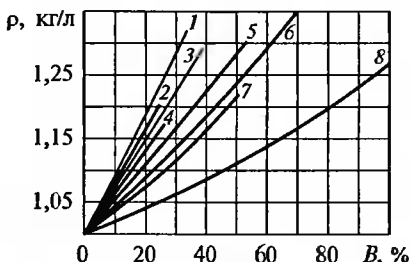


Рис. 4.9. Зависимость плотности от концентрации растворов:

1 — CaCl₂; 2 — NaCl; 3 — NaNO₃; 4 — KCl; 5 — (NH₄)₂SO₄; 6 — сахар; 7 — NH₄NO₃; 8 — глицерин

Вязкость воды зависит от температуры, солесодержания и плотности. Вязкость минерализованной воды

$$\mu_{ж}(t) = 10^n \mu_{в}(t), \quad (4.23)$$

$$\mu_{в}(t) = 1353(t + 50)^{-1,6928}. \quad (4.24)$$

где $\mu_{в}$ — вязкость дистиллированной воды при температуре t , °C;
 $n = 10^{-3} \cdot 0,8831 \Delta p$.

Удельная теплоемкость минерализованной воды:
при $B < 20\%$:

$$c = 4190(100 - B), \quad (4.25)$$

где 4190 Дж/(кг·К) — удельная теплоемкость воды;
при $B > 20\%$:

$$c = 0,0419(100 - B) + 0,01c_{кр}B, \quad (4.26)$$

где $c_{кр}$ — удельная теплоемкость безводного растворенного вещества, Дж/(кг·К).

Заметим, что приведенные формулы для определения плотности и удельной теплоемкости растворов в известной мере условны, поскольку составлены по правилу аддитивности.

При необходимости выполнения точных расчетов можно использовать справочные данные или опытные величины, полученные для заданных растворов.

Теплота парообразования жидкости при атмосферном давлении, кДж/кг, может быть вычислена по формуле

$$r = (36,4 + 19,2 \lg T) T_k / M, \quad (4.27)$$

где T_k — температура кипения, К; M — молекулярная масса жидкости, кг/моль.

Растворимость газов в жидкостях

Согласно закону Генри, при постоянной температуре растворимость газов в жидкости прямо пропорциональна парциальному давлению этого газа над раствором (табл. 4.7), т. е.

$$C_r = \psi p, \quad (4.28)$$

где C_r — равновесная растворимость газа в воде, м³/кг; ψ — коэффициент растворимости газа в воде, мг/(кг·Па); p — парциальное давление газа над раствором, Па.

Концентрация газа в жидкости зависит от температуры давления и продолжительности насыщения:

$$y = pB(1 - \exp k_p T), \quad (4.29)$$

**Коэффициенты растворимости некоторых газов в воде
в зависимости от температуры, мг/(кг·Па)**

| $t, ^\circ\text{C}$ | O ₂ | N ₂ | CO ₂ | $t, ^\circ\text{C}$ | O ₂ | N ₂ | CO ₂ |
|---------------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 0 | 68,30 | 29,15 | 3385 | 40 | 32,55 | 14,70 | 1040 |
| 5 | 60,40 | 25,80 | 2755 | 50 | 29,45 | 13,45 | 846 |
| 10 | 53,55 | 23,05 | 2335 | 60 | 27,45 | 12,65 | 734 |
| 15 | 48,50 | 20,80 | 1990 | 70 | 25,80 | 12,15 | 642 |
| 20 | 43,65 | 19,05 | 1710 | 80 | 24,80 | 11,95 | 571 |
| 25 | 39,90 | 17,75 | 1470 | 90 | 24,25 | 11,85 | 509 |
| 30 | 36,80 | 16,40 | 1295 | 100 | 24,05 | 11,75 | 459 |
| 35 | 34,35 | 15,50 | 1150 | — | — | — | — |

где B — равновесная концентрация газа в воде при данных условиях; k_p — константа скорости растворения газа в воде (при барботаже $k_p = 0,35 \text{ мин}^{-1}$, при эжекторном насыщении $k_p = 0,8 \text{ мин}^{-1}$); T — температура воды.

Время насыщения воды воздухом при барботаже достигается за 8—10 мин, а при эжекторном насыщении — за 2—3 мин [6].

Способы концентрирования растворов

Концентрирование растворов, заключающееся в удалении растворителя путем парообразования при кипении, называется *выпариванием*. В большинстве случаев из раствора удаляют лишь часть растворителя, так как в выпарных аппаратах обычных конструкций с паровым обогревом упаренный раствор должен оставаться в текучем состоянии. Температура кипения растворов зависит от химической природы растворенных веществ и растворителя (растет с увеличением концентрации раствора и внешнего давления). При одинаковом внешнем давлении температура кипения растворов всегда выше температуры кипения чистых растворителей.

В промышленности в основном выпаривают водные растворы разных веществ, поэтому в дальнейшем качестве растворителя будем принимать воду.

Повышение температуры кипения раствора по сравнению с температурой кипения воды (пара) при одинаковом внешнем давлении называется физико-химической температурной депрессией

$$\Delta_t = t_p - t_n, \quad (4.30)$$

где t_p , t_n — температуры кипения раствора и парообразования.

Температурная депрессия достигает существенных значений:

| | | |
|------------------|-----------------------|----------------------------|
| Раствор | $t_k, ^\circ\text{C}$ | $\Delta_T, ^\circ\text{C}$ |
| 50 %, NaOH | 142,2 | 42,2 |
| 60 %, KOH | 178,8 | 78,8 |

Однако образующиеся при этом водяные пары имеют ту же температуру, что и в случае кипения чистой воды, т. е. около 100°C . Парообразование связано с понижением упругости водяного пара (давления насыщения) над раствором по сравнению с упругостью водяного пара над чистой водой при одинаковой температуре. Физико-химическая температурная депрессия может быть вычислена по приближенной формуле И. А. Тищенко [6]

$$\Delta_T = \Delta_n K, \quad (4.31)$$

где Δ_T , Δ_n — температурная депрессия, искомая при давлении выпаривания, и табличная (табл. 4.8) при нормальном давлении; K — коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры кипения чистой воды:

| | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|
| $t, ^\circ\text{C}$ | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
| K | 0,6609 | 0,7106 | 0,7628 | 0,8177 | 0,8735 | 0,9362 | 1,0 | 1,0674 | 1,1384 | 1,2135 |

Повышение температуры кипения раствора определяется не только температурной, но также гидростатической и гидравлической депрессиями.

Гидростатическая депрессия Δ_c вызывается тем, что слои жидкости, находящиеся в нижней части аппарата, кипят при более высокой температуре, чем верхние из-за гидростатического давления столба жидкости.

Гидродинамическая депрессия Δ_r представляет разность температур вследствие гидродинамических сопротивлений в греющих трубах и соединительных трактах выпарных аппаратов.

Таким образом, суммарная депрессия при выпаривании растворов

$$\Delta = \Delta_T + \Delta_c + \Delta_r. \quad (4.32)$$

Практика показала, что для большинства типовых выпарных аппаратов $\Delta_c = 1 \dots 3^\circ\text{C}$, $\Delta_r < 1^\circ\text{C}$.

Важный вопрос при расчете выпарных аппаратов — определение температуры пара над кипящим раствором. Обычно ее принимают равной температуре насыщения при давлении в аппарате или же равной температуре кипения раствора за вычетом суммарной депрессии:

$$t_n = t_p - \Delta. \quad (4.33)$$

В выпарных аппаратах непрерывного действия с естественной или принудительной циркуляцией концентрация кипящего рас-

твора близка к конечной, поэтому Δ в этих аппаратах берут для раствора конечной концентрации.

При периодическом процессе выпаривания, когда исходный раствор выпаривается до заданной концентрации, рекомендуется определять Δ для средней концентрации раствора.

С целью экономии греющего пара применяются многокорпусные выпарные установки, в которых вторичный пар каждого корпуса (кроме последнего) используется для обогрева последующего корпуса. Давление от корпуса к корпусу уменьшается так, чтобы температура кипения раствора в каждом корпусе была ниже температуры насыщения пара, обогревающего этот корпус. В многокорпусной выпарной установке расход греющего пара на 1 кг выпаренной воды обратно пропорционален числу корпусов.

Кристаллизация — процесс выделения твердого вещества из его раствора. Обязательное условие кристаллизации — пересыщение раствора, которое может создаваться:

охлаждением растворов, растворимость которых заметно уменьшается с понижением температуры;

испарением части растворителя при кипении раствора в выпарном аппарате с паровым обогревом, в процессе концентрирования в аппаратах погружного давления (АПГ) или в установке мгновенного вскипания;

комбинированием, т. е. одновременным охлаждением и испарением части растворителя.

В выпарном аппарате с поверхностным теплообменником кристаллизация раствора нежелательна вследствие осаждения кристаллов на теплопередающей поверхности, что в значительной степени ухудшает условия теплопередачи.

В АПГ кристаллизация возможна, однако при охлаждении раствора получают мелкие кристаллы, которые в дальнейшем сложно отделять от маточника. Для образования крупных кристаллов требуются специальные условия.

Поэтому кристаллизацию обычно ведут в отдельных аппаратах-кристаллизаторах с водяным или воздушным охлаждением, расположенных после выпарок (см. гл. 8). В некоторых случаях кристаллизацию осуществляют в вакуум-кристаллизаторах, где одновременно протекают процессы испарения и охлаждения раствора. В основе расчета кристаллизаторов лежат уравнения материального и теплового балансов. Обозначим $B_{кр}$ массовое содержание безводного кристаллизующегося вещества в кристаллах, %. Если вещество кристаллизуется в безводной форме, то $B_{кр} = 100\%$, если в виде кристаллогидратов, то

$$B_{кр} = 100 M / M_{кр}, \quad (4.34)$$

где M , $M_{кр}$ — молекулярные массы соответственно безводного вещества и кристаллогидрата.

Экстрагирование — извлечение из твердого или жидкого вещества одного или нескольких компонентов с помощью растворителя. При этом извлекаемые компоненты переходят из твердой или жидкой фазы в растворитель [10].

Экстракция основана на разной растворимости компонентов в жидкости и растворителе, используемом в качестве *экстрагента*. При взаимодействии с экстрагентом в нем хорошо растворяются только извлекаемые компоненты и практически не растворяются остальные компоненты исходной смеси. Для повышения скорости процесса исходный раствор и экстрагент приводят в тесный обычно многократный контакт.

В результате взаимодействия фаз получают *экстракт* — раствор извлеченных веществ в экстрагенте и *рафинат* — остаточный исходный раствор.

Полученные жидкие фазы (экстракт и рафинат) разделяются отстаиванием, центрифугированием или другими механическими способами. Затем извлекают целевые продукты из экстракта и экстрагента из рафината.

Для регенерации экстрагента могут использоваться любые массообменные процессы, применимые для разделения жидких растворов, выпаривания, а также химические методы. Примеры применения экстракции: обесфеноливание сточных вод бензолом, бутилацетоном, диазопропиловым эфиром, экстракция нитробензола из воды бензолом [8, 9].

4.4. Физические и химические основы пылеочистки и очистки технологических газов

Системы пылеочистки (физические основы движения пылевых слоев)

С целью определения общих закономерностей осаждения аэрозольных частиц при газоочистке рассмотрим процесс запыления осадительной поверхности, на которой накапливается масса этих частиц в виде слоя. Представим пылевой слой как некую сплошную среду, свойства которой не выражаются непосредственно через свойства составляющих элементов (пылевых частиц), а являются осредненными характеристиками достаточно больших объемов среды.

Тогда можно рассматривать только такие объемы слоя, в которых заключено большое число первичных пылевых частиц. В этом смысле для пылевых слоев может быть использован общий принцип описания движения сплошных сред, когда приращение массы можно характеризовать скоростью приращения \bar{v}_n , нормальная составляющая которой к поверхности осаждения будет всегда на-

правлена в сторону возрастания скалярной функции, характеризующей процесс запыления. Такой функцией в газоочистке является эффективность η , определяющая степень очистки газов от аэрозольных частиц.

Исходя из общей теории потенциального поля, запишем вектор v_n через градиент скалярной функции в виде [5]

$$\vec{v}_n = -a^2 \text{grad}(\eta). \quad (4.35)$$

Знак «минус» определяет противоположные направления \vec{v}_n и $\text{grad}(\eta)$. Численный множитель a^2 будет иметь в разных точках пространства разные значения.

Уравнение (4.35) определяет движение поверхности запыления как квазистационарное, при котором скорость приращения слоя относительно аэрозольного потока будет весьма малой.

Таким образом, вектор скорости приращения определен через градиент функции η , что соответствует его направлению по нормали к соответствующей поверхности запыления, определяемой как поверхность уровня скалярного поля эффективности η . По величине вектор равен производной от функции η по направлению нормали. При этом поле \vec{v}_n будет отличаться от потенциального численным множителем a^2 . Такое поле является квазипотенциальным и, следовательно, скалярное поле эффективности в процессе образования осадка не будет иметь эквипотенциальных поверхностей, что адекватно условию $\eta \neq \text{const}$, определяющему нестационарный режим осаждения.

Условию

$$\text{div}(\vec{v}_n) = 0 \quad (4.36)$$

должен удовлетворять потенциал скорости невихревого течения и, следовательно, в этом случае v_n сохраняет одно и то же значение на некоторой плоскости, определяемой как эквипотенциальная.

Такое определение процесса запыления соответствует $\eta = \text{const}$, т. е. стационарному режиму осаждения аэрозольных частиц, когда не происходит образование пылевого слоя. Этот режим будет характеризоваться также потенциальным течением газа, когда линии тока изгибаются и обтекают тело на близком от него расстоянии (не более l_s), вследствие чего эффективность захвата аэрозольных частиц телом будет зависеть от двух критериев — St^{*1} и Re , значения которых должны превышать их критические величины.

Анализ переноса аэрозольных частиц в разных силовых полях характеризует гидродинамику этого процесса отлично от классической гидродинамики, описываемой уравнением Навье — Стокса.

*¹ Критерий (число) Стокса равен $bl\mu rv$, где μ — коэффициент динамической вязкости газа (жидкости), r — радиус, v — скорость частицы в газе (жидкости).

В связи с тем, что аналитическое решение полных уравнений Навье—Стокса до настоящего времени не получено, применяется метод макроскопического описания процессов переноса аэрозольных частиц. Скорости переноса формулируются при использовании полученных выше уравнений, которые определяют опытный макроскопический эквивалент уравнения Навье—Стокса и имеют статистический характер, поскольку все входящие в них величины усреднены для макроскопического силового поля [5].

Системы газоочистки (массообменные характеристики технологических газов в процессах хемосорбции)

В большинстве технологических процессов извлечение целевых компонентов из газовых смесей реализуется на производственных стадиях их переработки и при этом достигается экономически целесообразная степень их извлечения. Поэтому выбросные газы содержат незначительное количество примесей, вредно воздействующих на окружающую среду, а объемы газов в ряде производств крайне велики. Не случайно с целью увеличения движущей силы процесса очистки выбросных газов многих химических производств основана на использовании процессов химической абсорбции (хемосорбции), когда извлекаемый компонент газовой смеси вступает в химическую реакцию с жидким поглотителем (рис. 4.10).

При абсорбции, сопровождаемой химической реакцией, процесс можно проводить при низком парциальном давлении извлекаемого газа вследствие более высокой поглотительной способности раствора, а также становится возможным достижение заданного уровня очистки.

При реакции в жидкой фазе абсорбируемый компонент полностью или частично связывается в химическое соединение. Скорость поглощения компонента возрастает по сравнению со скоростью поглощения его при физической абсорбции. Обычно увеличение скорости поглощения в хемосорбционном процессе учитывают, вводя в уравнение массоотдачи фактор ускорения χ , показывающий, во сколько раз при химической абсорбции возрастает интенсивность массообмена по сравнению с физической абсорбцией [13, 14]. Так как хемосорбционные процессы связаны с протеканием реакции в жидкой фазе, то рассмотрим общее уравнение массоотдачи для этой фазы:

$$W = \chi \beta_L F (C_{гр} - C_L), \quad (4.37)$$

где W — количество поглощенного компонента, кг/с; β_L — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при физической абсорбции, м/с; F — поверхность контакта фаз, м²; $C_{гр}$, C_L — концентрации поглощаемого компонента на границе раздела фаз и в основной массе жидкости, г/л³.

Фактор ускорения χ зависит от концентрации поглощаемого вещества, хемосорбента и продуктов реакции, а также от констант скоростей протекающих реакций и ряда других факторов. В литературе приводятся выражения для расчета χ при реакциях разных типов.

Таким образом, для расчета кинетики массообмена по формуле (4.37) необходимо знать коэффициент массоотдачи в жидкой



Рис. 4.10. Классификация колонных аппаратов по организации движения потока легкой фазы

фазе β_L , фактор ускорения χ , поверхность раздела фазы F , движущую силу процесса.

Основой процесса в данном случае является элемент многотарельчатого аппарата пленочного типа — тарелка с орошаемой стенкой, в которой жидкость в виде тонкой пленки стекает по внутренним стенкам колонны и контактирует с движущимся противотоком по трубке газом. Поверхность раздела фаз достаточно строго фиксирована: $F = \pi dl$, где d — внутренний диаметр колонны; l — высота (рис. 4.11).

Учитывая эту методическую особенность, пленочные аппараты могут быть рекомендованы в качестве аппаратов, отвечающих ряду специфических требований промышленной экологии.

Они могут быть использованы для работы в условиях повышенных нагрузок по жидкости, что характерно, например, для процессов отдувки. Кроме того, аппараты такой конструкции обладают малым гидравлическим сопротивлением, в них может быть реализован подвод или отвод тепла и др.

На основе элемента пленочной массообменной колонны предусматривается ознакомление с методикой лабораторных исследований хемосорбционных процессов и изучение массоотдачи при физической абсорбции β_L .

При проведении исследований на лабораторных, полупромышленных аппаратах и обследовании работы промышленных колонн можно опытным путем определить лишь коэффициент массопе-

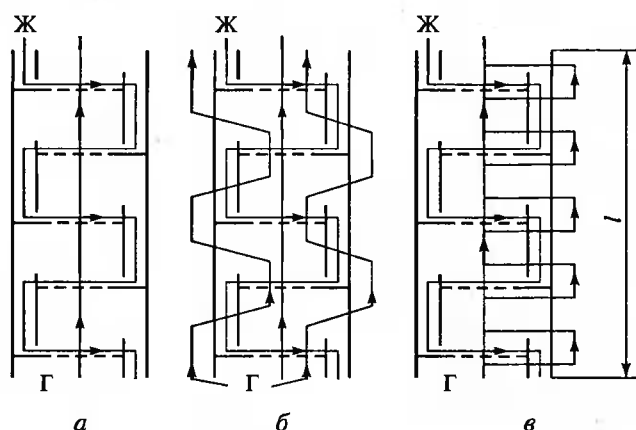


Рис. 4.11. Схемы организации движения газового потока (Г) в тарельчатых массообменных аппаратах:

а — традиционная перекрестноточная; *б* — с делением потока газа на равные части и раздельным контактированием каждой части на отдельной тарелке; *в* — с выделением части газового потока на каждой ступени и направлением байпасом с последующим перемешиванием между тарелками (Ж — жидкость)

редачи $K_{ж}$, который при условии равновесия фаз у поверхности их соприкосновения связан с коэффициентом массоотдачи в газовой β_G , в жидкой β_L фазах соотношением

$$\frac{1}{K_{ж}} = \frac{1}{\beta_L} + \frac{1}{m\beta_G}, \quad (4.38)$$

где m — константа Генри фазового равновесия.

Как показано во многих исследованиях, при абсорбции (десорбции) плохо растворимого газа (например, диоксида углерода в воде)

$$\frac{1}{\beta_L} \gg \frac{1}{m\beta_G}. \quad (4.39)$$

Поэтому для определения по экспериментальным данным коэффициента массоотдачи в пленке жидкости β_L часто при десорбции CO_2 из воды в воздух пренебрегают сопротивлением газовой фазы и принимают $\beta_L = K_{ж}$.

При определении коэффициента массопередачи движущая сила в случае десорбции принимается равной для каждого сечения колонны разности $(C_L - C_L^*)$, где C_L^* — концентрация жидкости, равновесная с концентрацией газа, C_L — средняя концентрация жидкости в данном сечении.

Концентрации газовой и жидкой фаз изменяются при движении фаз вдоль поверхности их соприкосновения, поэтому обычно изменяется и движущая сила массопередачи. При расчетах пользуются средним значением движущей силы.

4.5. Физико-химические основы очистки и обезвреживания дымовых газов

4.5.1. Очистка дымовых газов от оксидов азота (на примере ТЭС)

Способов очистки газов разного состава от оксидов азота предложено много. Их можно разделить на две группы: сорбционные и каталитические.

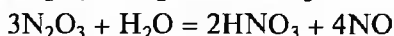
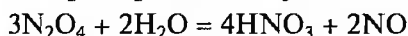
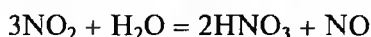
Сорбционные можно классифицировать на абсорбционные и адсорбционные, а каталитические — на способы с окислением оксидов азота до диоксида и с восстановлением оксидов до молекулярного азота.

Все эти методы могут осуществляться как в мокром (с поглощением растворами), так и в сухом (поглощение NO_x сухими сорбентами или с протеканием реакций в газовой фазе) исполнении. Методы очистки каждой из групп имеют как достоинства, так и

недостатки, существенно разнятся они и по экономическим показателям, и по эффективности очистки [15].

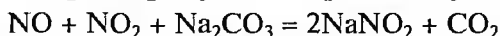
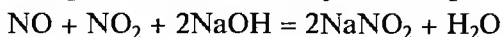
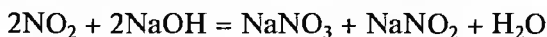
Применяются также комплексные методы очистки дымовых газов от оксидов азота и серы.

Абсорбционные методы. Оксиды азота в той или иной степени растворяются в обычной воде по реакциям:



Из оксидов азота только NO химически не реагирует с водой, хотя и растворяется в ней. Для полного поглощения NO_x необходимо окисление NO до NO_2 . В качестве окислителя можно использовать H_2O_2 . При этом степень превращения NO_x в HNO_3 составляет 0,02—0,03 %.

Более эффективная очистка газов от NO_x осуществляется при их контакте с растворами щелочей по реакциям:



Для абсорбции NO_x можно принять $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$, ряд других щелочных соединений, MgCO_3 . При использовании растворов тиосульфата натрия и сульфата железа образуется комплексное соединение $\text{NaFe}(\text{NO})_2 \cdot \text{S}_2 \cdot \text{O}_3$.

NO_x в промышленных условиях абсорбируют в скрубберах Вентури, промывных башнях, насадочных и тарельчатых абсорберах. Недостатки абсорбционных способов очистки газов от NO_x : 1) большие капитальные затраты; 2) появление новых отходов, не имеющих сбыта (малоконцентрированных солей или азотной кислоты) и недопустимых к сбрасыванию в водоемы. Более перспективны абсорбционные способы с последующей десорбцией NO_x в концентрированном виде, пригодном для переработки в азотную кислоту товарной значимости.

Адсорбционные методы. Адсорбция происходит в результате взаимодействия поверхностных сил притяжения адсорбируемой молекулы и часто сопровождается капиллярной конденсацией и хемосорбцией. С ростом температуры адсорбция снижается. Вещества с низкой температурой кипения адсорбируются хуже, чем с высокой. Интенсивность адсорбции повышается с увеличением молекулярной массы, поэтому NO_2 адсорбируется интенсивнее, чем NO.

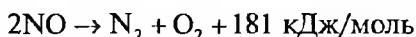
На интенсивность адсорбции влияет пористость сорбента. Оптимальная пористость находится в пределах 0,4—0,8 нм. Чем ниже концентрация NO_x в дымовых газах, тем больше необходимо вре-

мени пребывания газа в адсорбере. При концентрации NO_x на входе 0,2 % степень поглощения NO_x достигает 95—98 %.

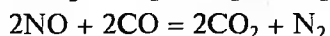
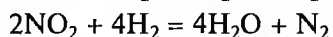
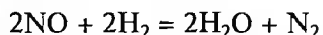
В качестве адсорбентов применяют приготовленные из каменноугольного кокса активированные угли, древесный уголь, активированный полукокс бурых углей и торфа. В качестве десорбента — воду или водяной пар. При десорбции получается азотная кислота и концентрированный оксид азота.

Определенный эффект дает применение молекулярных сит — минералов с азотами калия или натрия в структуре с пористостью, соизмеримой с размерами молекул. Десорбция подобных цеолитов осуществляется продувкой их горячим воздухом. При этом существенно возрастает концентрация NO_x в продуваемом воздухе, что позволяет получить азотную кислоту концентрацией до 50 %. Применение адсорбционных методов также связано со значительными капитальными затратами и трудностью сбыта получаемых продуктов.

Каталитические методы. При $t > 620^\circ\text{C}$ все высшие оксиды азота диссоциируют до NO . При $900\text{—}1000^\circ\text{C}$ возможна диссоциация NO по реакции

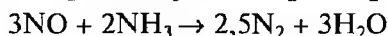
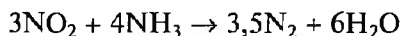


однако реакция эта протекает очень медленно (время полураспада NO при 1000°C около 1,1 ч). Для ускорения процесса разложения оксидов азота применяют катализаторы — оксиды ряда металлов (Co , Cu , Ni , Fe , Cr , Zn). Однако катализаторы очень быстро дезактивируются из-за адсорбции ими кислорода, содержащегося в дымовых газах. Более перспективны процессы восстановления оксидов азота на катализаторах. В качестве восстановителей могут быть использованы газы: H_2 , CH_4 , NH_3 , CO , а также твердый углерод. С этой целью в слое катализатора организуется беспламенное сжигание при $t \leq 500^\circ\text{C}$ смеси нитрозных газов и горючих газов при недостатке кислорода ($\alpha < 1$). При этом протекают следующие реакции:



В качестве катализаторов используются Pt , Pd , Rh , Ru , а также Co , Ni , Fe , V , Mo , Cr , Zn и их оксиды, наносимые на пористый носитель (высокопористый Al , Si). Для экономии драгоценных металлов используется двухступенчатое селективное каталитическое восстановление NO_x : на первой ступени в качестве катализатора применяется оксид благородного металла, на второй — Pt или Pd .

В качестве восстановителя применяется аммиак. В его присутствии на ванадиевом катализаторе идут реакции:



необходимая скорость которых обеспечивается при температуре катализатора 320—330 °С. В качестве восстановителя возможно применение также природного газа в сочетании с соответствующим катализатором (по данным Б. С. Белосельского).

Комплексные методы очистки от оксидов азота и серы. При сжигании на ТЭС топлив, содержащих повышенное (> 0,5 %) количество серы, возникает необходимость очистки дымовых газов от оксидов азота и серы, технически и экономически которую более выгодно проводить комплексно, используя апробированные схемы. В настоящее время за рубежом используют схемы комплексной очистки дымовых газов ТЭС на базе известнякового метода. В одной из таких схем (рис. 4.12) применены два абсорбера, орошаемые известковой водой. На первом осуществляется очистка преимущественно от SO_2 , на втором — от NO_x . Очищенный или охлажденный дымовой газ для лучшего рассеивания подогревается за счет сжигания топлива и выбрасывается через дымовую трубу.

В первом абсорбере взаимодействует в основном SO_2 с CaCO_3 и CaO с образованием насыщенного раствора CaSO_4 , который и является одним из конечных продуктов. Во втором соединения кальция реагируют с NO_x и остатком SO_2 с образованием $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$, CaSO_3 и CaSO_4 . Полученный раствор отводится в отпарную колонну, где упаривается и после отделения из него сульфита и сульфата кальция подается в специальную печь, где содержащийся в нем $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ подвергается разложению при $t \approx 700$ °С. Образующийся оксид NO направляется в специальный абсорбер, орошаемый водой, где окисляется до NO_2 и далее поступает в линию

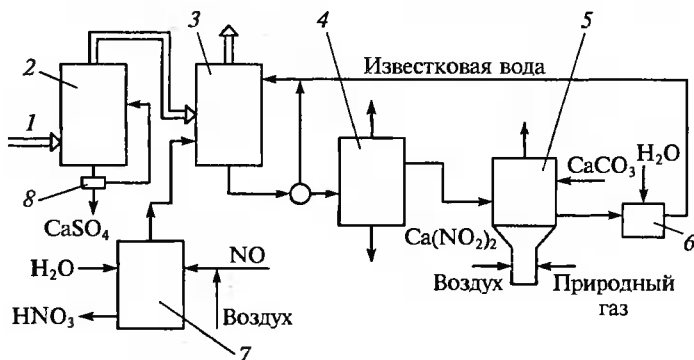


Рис. 4.12. Схема комплексной очистки дымовых газов от NO_x и SO_2 :

1 — дымовые газы на очистку; 2 — абсорбер для поглощения SO_2 ; 3 — абсорбер для поглощения NO_x ; 4 — отпарная колонна; 5 — аппарат для разложения NO_x ; 6 — бак-смеситель; 7 — специальный абсорбер; 8 — отстойник

дымовых газов перед вторым абсорбером. Часть NO_2 растворяется в воде и отводится в виде разбавленной азотной кислоты. Полученный при разложении нитрита кальция CaO смешивается с CaCO_3 , гасится водой и в виде добавки подается в линию циркуляции на абсорберы из смесительного бака.

Для комплексной очистки дымовых газов от оксидов азота и серы может быть применен также оксид магния. В схеме очистки с применением MgO используется один абсорбер, в который направляется предварительно охлажденный путем распыла в нем воды или части раствора MgO дымовой газ. Образующейся в результате сорбции оксидов азота и серы нитрит и сульфит магния выводят из цикла сорбции, отделяя кристаллы сульфита магния на центрифуге, направляя их на сушку и обжиг при $t \approx 700^\circ\text{C}$ в специальную печь. При обжиге MgSO_3 диссоциирует на MgO и SO_2 . Магнезит MgO возвращают в цикл сорбции, а SO_2 перерабатывают в концентрированную серную кислоту, являющуюся товарным продуктом.

Раствор, содержащий нитрит и нитрат магния, после отделения от него кристаллов MgSO_3 направляют в специальный аппарат для разложения нитрита азотной кислотой, в результате которой получают газообразный оксид азота и смесь избыточного количества $\text{Mg}(\text{NO}_2)_2$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Эту смесь обрабатывают аммиаком, и полученный нитрит аммония выводится из установки и может быть использован в качестве удобрения.

Образующийся при обработке $\text{Mg}(\text{OH})_2$ направляют на циркуляцию в абсорбер. Оксид азота NO направляют в аппарат для окисления его до NO_2 на специальном катализаторе, после чего орошением образующегося NO_2 водой в том же аппарате получают азотную кислоту, используемую в цикле для разложения нитрита магния. Непрореагировавшая часть NO_2 подмешивается к дымовым газам перед абсорбером. Таким образом, цикл улавления оксидов азота замыкается. Степень улавливания SO_2 и NO_x при комплексной очистке дымовых газов известняковым (известковым) и магнезитово-циклическим методами достигает 90 % по SO_2 и около 80 % по NO_x . Недостатки методов — относительная сложность, большое число операций с растворами, громоздкость применяемой аппаратуры (скрубберов, абсорберов, обжиговых печей, насосов и др.).

Определенные перспективы имеют методы каталитического окисления оксидов азота и серы. Основная трудность использования катализаторов в этом случае состоит в том, что сера является каталитическим ядром для многих веществ, используемых для каталитического окисления NO в NO_2 . В настоящее время ведется интенсивный поиск недорогих катализаторов, в частности на основе соединений хрома, марганца и меди на углеродном носителе. Весьма эффективны разработанные в Японии катализаторы — нанесенные

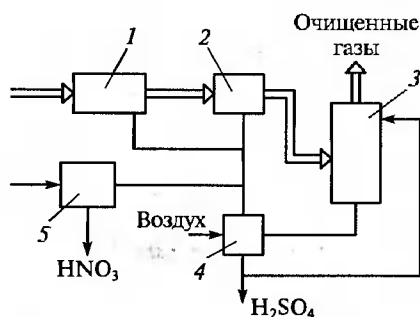
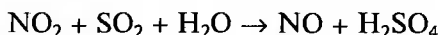
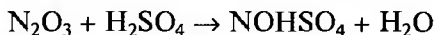


Рис. 4.13. Схема очистки дымовых газов от NO_x и SO_2 по методу *Ticko*: 1 — камера окисления SO_2 ; 2 — камера окисления NO_x ; 3 — абсорбер; 4 — аппарат для разложения нитрозилсерной кислоты; 5 — аппарат для получения азотной кислоты

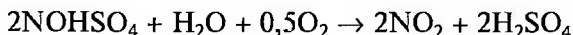
на рис. 4.13. В дымовые газы добавляют NO_2 до соотношения с SO_2 не менее 2 : 1. В этом случае при $t \approx 140^\circ\text{C}$ в присутствии водяного пара идет реакция



Образовавшийся NO вместе с непрореагировавшим NO_2 окисляется в газосмесителе на катализаторе до N_2O_3 и вместе с парами H_2SO_4 улавливается в абсорбере 80%-й серной кислотой с образованием раствора нитрозилсерной кислоты



которая затем выводится в специальный аппарат, где разлагается при продувке воздухом:



Образовавшийся NO_2 частично подается в реактор для связывания SO_2 , а остаток орошается водой с получением 50%-й HNO_3 . Серная кислота возвращается в абсорбер, а излишек ее выводится из установки в качестве товарного продукта. При содержании в исходном газе, %: 0,29 SO_2 , 0,01 SO_3 , 0,06 NO_x , в этом процессе достигается степень очистки по SO_2 — на 95 %, по NO_x — на 75 %.

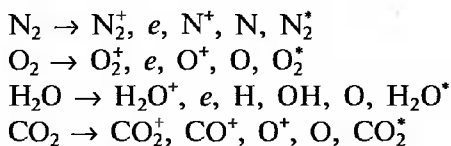
В нашей стране разработан метод окисления оксидов озонном в парогазофазном состоянии с впрыском в реактор диспергированного раствора аммиака в воде. Окисление проходит до NO_2 и SO_3 с последующим растворением их в воде и нейтрализацией кислот с получением сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, используемого в качестве удобрения. Озонный метод очистки был испытан на Мол-

на активированный уголь в виде тонкой пленки в сплавленном состоянии соединения кобальта, марганца, железа, меди и никеля. Оксиды азота и серы, сорбированные и окисленные до NO_2 и SO_3 на катализаторе подобного типа, периодически или непрерывно удаляются в виде раствора кислот из орошаемого водой реактора. Возможен и сухой метод десорбции катализатора — нагревом его до $140\text{--}180^\circ\text{C}$. Эффективность очистки дымовых газов от SO_2 достигает 90 %, от NO_x — 80 %.

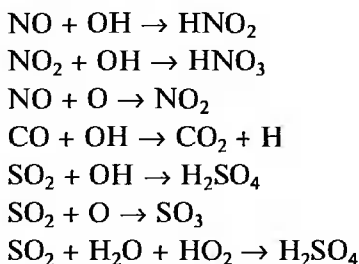
В США (фирмой *Ticko*) разработан комплексный метод очистки дымовых газов, показанный

давской ГРЭС на угольном 200-МВт блоке. При прокачке через реактор 25%-го NH_4OH в количестве 1386 т/ч была достигнута степень улавливания по NO_x около 90 %, по SO_2 около 80 %. В ходе процесса наблюдалась сильная коррозия оборудования.

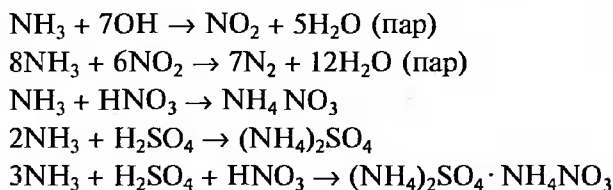
В последние годы интенсивно разрабатываются новые методы очистки дымовых газов от оксидов азота и серы с использованием ускорителей электронов для инициирования окисления NO_x и SO_2 . При облучении дымовых газов пучком электронов с энергией до 1,5 МэВ между входящими в состав дымовых газов компонентами протекают ионно-молекулярные и радикальные химические реакции с участием продуктов радиолитического разложения N_2 , O_2 , CO_2 , паров H_2O . Вслед за быстрыми первичными процессами ионизации, возбуждения, диссоциации типа



протекают ионно-молекулярные реакции перезарядки $\text{A}^+ + \text{B} \rightarrow \text{B}^+ + \text{A}$, нейтрализации $\text{x}^+ + \text{e} \rightarrow \text{x}^* \rightarrow \text{продукты}$, а также реакции с участием незаряженных частиц, ведущие к образованию конечных продуктов, в том числе



При подаче в зону реакций аммиака образуются следующие продукты:



Сульфат и нитрат аммония получают в виде сухого порошка, который можно улавливать с помощью электрофильтров и использовать в качестве азотных удобрений.

Дымовые газы, входящие из электронно-лучевого реактора, не обладают остаточной активностью, так как пороговая энергия фо-

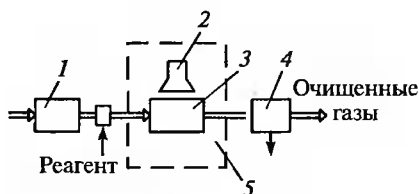


Рис. 4.14. Схема установки электронно-лучевой очистки дымовых газов NO_x и SO_2 :

1 — температурно-влажностное кондиционирование; 2 — ускоритель; 3 — реактор; 4 — фильтр; 5 — биологическая защита

уровня радиационно-химического выхода разложения того или иного вещества. Например, выход разложения NO и SO_2 составляет соответственно 7—7,5 и 5—10 молекул на 100 эВ. Большое влияние на степень очистки оказывают температура газов, их влажность и состав. Уменьшение температуры газов приводит к росту степени их очистки. Увеличение влажности газов также повышает эффективность очистки вследствие интенсивной генерации радикалов OH , HO_2 , реагирующих с оксидами азота и серы с образованием паров кислот. Запыленность газов не влияет на эффективность очистки.

Главный элемент установки электронно-лучевой очистки газов от NO_x и SO_2 (рис. 4.14) — реактор по своей форме в сочетании с конфигурацией поля излучения должен отвечать требованиям максимального коэффициента использования энергии излучения $\xi = DV/N$, где N — мощность электронного пучка; DV — поглощенная энергия излучения; D — доза; V — максимальный расход облучаемого газа. В действующих установках величина $\xi = 0,7 \div 0,75$ в значительной степени определяется схемой ввода пучка (или пучков) электронов в реактор [15].

4.5.2. Методы снижения выбросов и очистки дымовых газов от сернистого и серного ангидридов, хлорида и фторида водорода, оксидов азота (на примере стекольных производств)

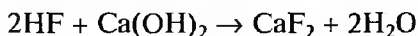
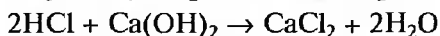
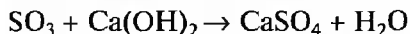
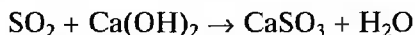
Очистка дымовых газов стекловаренных печей от SO_2 , SO_3 , HCl и HF представляет большие технические трудности. Например, для обезвреживания отходящих газов от кислых газообразных соединений (включая пыль, возгоны и др.) используют комплексные установки, состоящие из теплообменных аппаратов, в которых газы охлаждаются до 300—500 °С, скрубберов или газопромы-

тоядерных реакций с образованием нейтронов под действием тормозного излучения электронов составляет $1,666 \pm 0,002$ МэВ, т. е. при энергиях пучка электронов меньше 1,666 МэВ опасность нейтронного излучения и наведенной радиоактивности отсутствует. Биологическая защита необходима лишь для реактора и излучателей.

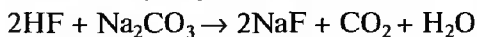
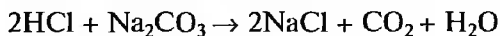
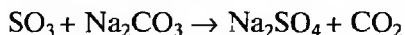
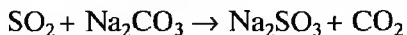
Основное влияние на степень удаления NO_x и SO_2 из дымовых газов оказывает поглощенная доза излучения, зависящая от

вателей (распылителей) для десульфурации газов, электрофильтров для очистки пылей (возгонов) и реактора для очистки оксидов азота. Для поглощения сернистого и серного ангидридов, хлорида и фторида водорода используют известь, соду, натровый щелок. При этом происходят следующие реакции [16]:

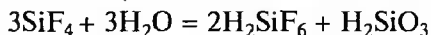
при нейтрализации известью



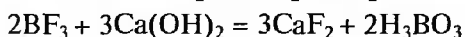
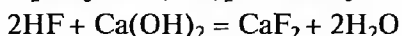
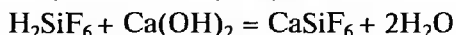
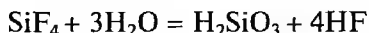
при нейтрализации содой



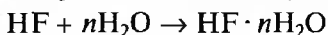
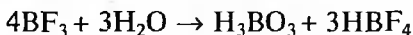
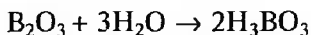
Дымовые газы стекловаренных печей в производстве стеклянного волокна очищают по следующим схемам взаимодействия ингредиентов дымовых газов с абсорбентами:



или



При этом выделяются в осадок и соединения мышьяка с кальцием. В результате нейтрализации борной кислоты гидроксидом кальция осаждается борат кальция, являющийся перспективным сырьем для стекольных шихт. Оксид бора B_2O_3 , фториды BF_3 и HF хорошо растворяются в воде с образованием соответствующих кислот [17]:



Комбинированное отопление стекловаренных печей (жидким или газообразным топливом в сочетании с электроподогревом) значительно снижает содержание N_yO_x в дымовых газах. Так, по данным одной из японских фирм, при варке натриевого стекла с использованием только природного газа (расход 70—72 м³/ч) и температуре стекломассы 1390 °С содержание N_yO_x в отходящих газах

с $t = 1320^\circ\text{C}$ составляло 0,018 %, а при одновременном использовании для нагрева газа (расход 48—50 м³/ч) и электроэнергии 30 кВт снизилось до 0,008 %.

Дополнение электроподогрева к пламенному обогреву позволяет уменьшить интенсивность последнего, что обеспечивает снижение выбросов оксидов серы и азота, а также твердых и жидких частиц. При мощности электроподогрева 2,5 МВт температура газов может быть снижена на 80—85 °С при сохранении заданной производительности печи. Расход природного газа снижается на 640 м³/ч при соответствующем уменьшении выбросов твердых и жидких частиц (Р. И. Рудер и др., Англия).

В исследованиях И. В. Кутасевича показано, что в процессе варки стекла образуется значительное (до 600 мг/м³) количество оксидов азота. Согласно Я. Б. Зельдовичу, содержание NO_x (в пересчете на NO₂) определяется формулой

$$C_{\text{NO}_2} = k\sqrt{C_{\text{O}_2}C_{\text{N}_2}} \exp[-21\,500/(RT)],$$

где C_{NO_2} , C_{O_2} , C_{N_2} — концентрации NO₂, O₂ и N₂; R — газовая постоянная; T — температура процесса, К; $k = 0,023 \dots 0,069$.

Следовательно, концентрация оксидов азота зависит от температуры и содержания кислорода в зоне горения, регулируя которые можно воздействовать на образование N_yO_x. Обратимся к опыту энергетиков по снижению выбросов N_yO_x. Снижение коэффициента избытка воздуха α с 1,1 до 1,05 привело к адекватному снижению концентрации N_yO_x с 0,00142 до 0,001 %. Использование двухступенчатого сжигания с рециркуляцией до 15 % топочных газов через горелочные устройства снизило содержание в выбросах N_yO_x до 0,00009 %.

Сформулируем режимно-конструктивные способы снижения N_yO_x при сжигании топлива:

уменьшение α до 1,03 по сравнению с 1,15—1,2 снижает N_yO_x на 25—30 %;

снижение температуры в зоне горения вследствие рециркуляции 15 % топочных газов снижает N_yO_x на 25—30 %;

двухступенчатое сжигание топлива существенно снижает генерацию N_yO_x. В первой ступени установки сжигание топлива протекает с недостатком воздуха ($\alpha = 0,81$), а во второй — при небольшом избытке воздуха. Так, двухступенчатое сжигание в циклонных топках мазута с $\alpha = 1,025$ привело к снижению N_yO_x до ≤ 300 мг/м³;

снижение теплового напряжения топочного объема также способствует уменьшению образования N_yO_x.

Указанные способы в полной мере трудно применять в стекольном производстве, но они должны быть приняты во внимание при совершенствовании режимно-технологических параметров сжигания топлива [7].

Очистка газов от оксидов азота — сложный и дорогостоящий процесс, так как они в основном (на 90 %) состоят из NO, который достаточно сложно уловить абсорбционными и адсорбционными методами. Представляет определенный интерес реализация процесса восстановления N_yO_x до N.

Использование для этих целей катализаторов (по аналогии с очисткой газов в производстве азотной кислоты) вряд ли возможно, так как наряду с N_yO_x в топочных газах стекольных печей содержится много компонентов, являющихся ядами для катализаторов. Перспективным способом восстановления N_yO_x является добавка аммиака в газы при высокой (900—1200 °С) температуре. Этот способ требует гомогенного распределения аммиака в топочных газах, что можно реализовать подачей аммиака перед рекуперационным устройством.

Использование предварительного подогрева воздуха приводит к увеличению образования оксидов азота. Например, абсолютное содержание N_yO_x при подогреве воздуха до 570 °С возрастает примерно в четыре раза.

Интересен путь, снижающий образование N_yO_x и уменьшающий расход топлива (НПО «Стеклопластик»), —повышение светимости факела. Сжигание природного газа в коаксиальных горелочных устройствах вследствие интенсивной аэрации газовых струй не обеспечивает высокой светимости факела и требуемых его размеров, поэтому способ расслоения потоков газа и воздуха на входе их в туннель при одновременном нагреве газовой струи до протекания конверсии метана позволяет повысить светимость факела. Послойное сжигание природного газа приводит к интенсивной пароуглекислотной конверсии углеводородного сырья, сопровождающейся сажеобразованием, что является причиной повышенной светимости факела.

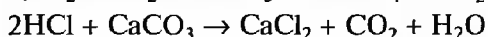
4.5.3. Метод термохимического обезвреживания дымовых газов (на примере сжигания твердых отходов)

Обезвреживают дымовые газы, образующиеся в при переработке твердых отходов, в две стадии:

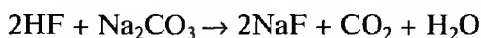
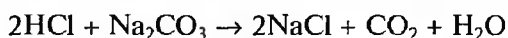
1) в электрошлаковой плавильной электропечи в процессе контакта дымовых газов с расплавом жидкого шлака;

2) в реакторе термохимического обезвреживания, состоящем из камер дожигания, нейтрализации и восстановления.

В ванне расплава кислые газы контактируют с $CaCO_3$ с образованием $CaSO_4$, $CaCl_2$, CaF_2 :



Непрореагировавшие кислые газы в камере нейтрализации контактируют с содой:



Избыток соды в камере нейтрализации составляет 20 %, что обеспечивает 100%-ю нейтрализацию кислых газов и содержание вредных веществ $\text{SO}_2 + \text{HCl} < 10 \text{ мг/м}^3$ и $\text{HF} < 1 \text{ мг/м}^3$ в расчете на сухие газы.

При сжигании отходов в потоке воздуха образуются оксиды азота NO_x и углерода CO .

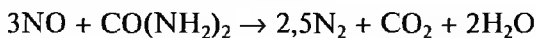
Оксид углерода устраняется в камере дожигания при подаче острого дутья и температурном уровне $> 950^\circ\text{C}$.

В камере дожигания поддерживается температурный уровень $1000\text{—}1135^\circ\text{C}$.

Время пребывания газов в камере 0,6 с. После камеры дожигания ожидаемый теоретический выход CO на уровне $< 50 \text{ мг/м}^3$ (в расчете на сухие газы).

Оксиды азота устраняются в камере восстановления NO_x в присутствии карбамида. Теоретический выход NO_x при горении отходов с учетом содержания паров воды и рециркуляции дымовых газов $300\text{—}400 \text{ мг/м}^3$.

Восстановление NO_x карбамидом



осуществляется в диапазоне $1050\text{—}960^\circ\text{C}$.

При поддержании температурного уровня и условий перемешивания на практике достигается восстановление оксидов до 85 %. Таким образом, ожидаемая концентрация NO_x после камеры восстановления составит $< 80 \text{ мг/м}^3$ (в расчете на сухие газы).

Диоксины и фураны, содержащиеся в исходных отходах или образующиеся при сжигании, устраняются при обеспечении температурного уровня 1200°C , наличии кислорода 37 % и времени пребывания газов в этих условиях 2 с. Суммарное время пребывания газов в электропечи, камерах дожигания, нейтрализации и восстановления 3,6—3,8 с.

Образование вторичных диоксинов в тракте охлаждения дымовых газов исключено за счет полной нейтрализации кислых газов и отсутствия свободного хлора.

Соблюдение вышеуказанных условий обеспечивает содержание диоксинов и фуранов в дымовых газах $< 100 \text{ мг/м}^3$ (разработчик — ВНИИЭТО, Москва).

4.6. Метод термической переработки органоcодержащих твердых отходов (пиролиз)

Пиролиз (греч. *pur* — огонь и *lysis* — разложение, распад) — высоко- или среднетемпературное превращение органических соединений, сопровождающееся их деструкцией и вторичными процессами, например, полимеризации, изомеризации, конденсации.

Процесс пиролиза применяют при переработке отходов древесины, пластмасс, резиновых изделий и шламов нефтепереработки. Пиролиз отходов — это процесс разложения отходов при их нагревании до 450—550 °С без доступа воздуха. При этом образуются газообразные и жидкие продукты и твердый углеродный остаток (например, древесный уголь при переработке древесины).

Пиролиз проводят в печах периодического и непрерывного действия разных конструкций (камерных, туннельных, шахтных, с движущимися слоями) с наружным и внутренним обогревом. На начальном этапе при повышении температуры протекают эндотермические процессы. При нагреве до 150 °С удаляется влага, а

Таблица 4.9

Основные процессы химической технологии при переработке
промышленных отходов: газов, жидкостей, твердых

| Процесс | Г | Ж | Т | Процесс | Г | Ж | Т |
|------------------------|---|---|---|---------------------------------------|---|---|---|
| Абсорбция | + | + | - | Смешение: | | | |
| Адсорбция | + | - | + | механическое | - | + | + |
| Осаждение | + | + | + | пневматическое | + | - | + |
| Фильтрование | + | + | - | Уплотнение: | | | |
| Дистилляция | - | + | - | компактирование | - | + | + |
| Ректификация | - | + | - | грануляция | - | + | + |
| Выпаривание | - | + | + | агломерация | + | + | + |
| Кристаллизация | - | + | + | капсулирование | + | + | + |
| Экстракция | - | + | + | Закачивание в глубокие слои литосферы | - | + | - |
| Химические методы | + | + | + | Затопление | - | - | + |
| Термическая обработка: | | | | Санитарное захоронение | - | + | + |
| сжигание | + | + | + | Пневмотранспорт | + | - | + |
| спекание | - | - | + | Гидротранспорт | - | + | + |
| сушка | + | + | + | Измельчение: | | | |
| пиролиз | - | - | + | механическое | - | + | + |
| катализ | + | + | + | гидравлическое | + | + | + |
| Классификация: | | | | или пневматическое | | | |
| механическая | + | - | + | | | | |
| пневматическая | + | - | + | | | | |
| гидравлическая | - | + | + | | | | |

при 170—270 °С образуются газы (СО и СО₂) и небольшие количества метилового спирта и уксусной кислоты. При 270—280 °С начинаются экзотермические превращения. Выход неконденсирующихся газов, таких как СО и СО₂ уменьшается и одновременно увеличивается выход других газообразных и парообразных веществ (СН₄, С₂Н₆, Н₂), а также метилового спирта и уксусной кислоты. На скорость процесса влияют размер, влажность перерабатываемых отходов и температура.

Выходящие из печи газы охлаждают и затем выделяют из них ценные компоненты. Получившийся, например, древесный уголь используют в производствах активных углей, черных порохов и в других процессах [18].

В табл. 4.9, с учетом данных [4, 8, 9], приведена расширенная сводка применимости основных процессов химической технологии, при помощи которых можно решить характерные экологические проблемы промышленных, энергетических, коммунально-бытовых и других предприятий, включая переработку отходов в разных агрегатных состояниях.

Список литературы

1. *Генералов М. Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии. — Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. — 592 с.
2. *Бутков В. В., Жихарев А. С., Клочин А. А.* Физикохимия гетерогенных систем. — М.: Изд-во МИХМ, 1993. — 112 с.
3. *Назаров В. И., Мелконян Р. Г., Калыгин В. Г.* Техника уплотнения стекольных шихт. — М.: Легпромбытиздат, 1985. — 128 с.
4. *Калыгин В. Г., Попов Ю. П.* Порошковые технологии: экологическая безопасность и ресурсосбережение. — М.: Изд-во МГАХМ, 1996. — 212 с.
5. *Куркин В. П.* Механика пылеулавливания. — М.: ИПКНЕФТЕХИМ, 1981. — 85 с.
6. *Алабовский А. Н., Удыма П. Г.* Аппараты погружного горения. — М.: Изд-во МЭИ, 1994. — 256 с.
7. *Сигал И. Я.* Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л.: Недра, 1988. — 312 с.
8. *Бондарева Т. И.* Экология химических производств. — М.: Изд-во МИХМ, 1986. — 92 с.
9. Основные процессы и аппараты химической технологии / Под ред. Ю. И. Дытнерского. — М.: Химия, 1983. — 272 с.
10. *Еремин Н. Ф.* Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. — М.: Высш. шк., 1986. — 280 с.
11. *Ричардсон Э.* Динамика реальных жидкостей. — М.: Мир, 1965. — 577 с.
12. *Фукс Н. А.* Механика аэрозолей. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 352 с.
13. *Семенова Т. А., Лейтес И. Л.* Очистка технологических газов. — М.: Химия, 1977. — 488 с.

14. Рамм В. М. Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976. — 655 с.
15. Белосельский Б. С. Очистка дымовых газов ТЭС от оксидов азота. — М.: Изд-во МЭИ, 1993. — 24 с.
16. Шапилова М. В., Тимофеева И. Т. Охрана атмосферного воздуха в стекольной промышленности. — М.: Легпромбытиздат, 1992. — 176 с.
17. Чехов О. С., Назаров В. И., Калыгин В. Г. Вопросы экологии в стекольном производстве. — М.: Легпромбытиздат, 1990. — 144 с.
18. Назаров В. И., Николайкина Н. Е. Инженерная защита литосферы. Переработка твердых отходов. — М.: Изд-во МГУИЭ, 1997. — 148 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Какое место занимают ПМ и ТО в классификации дисперсных систем? От каких характеристик ПМ и ТО это зависит?
2. Какие системы ПМ и ТО вам известны?
3. Перечислите реологические модели простых сред (идеализированных тел), характерных для процессов переработки большинства сырьевых материалов, полуфабрикатов, сотовых изделий и их отходов.
4. Назовите основные структурно-механические и физико-химические характеристики промышленных пылей.
5. В чем заключается механизм взаимодействия аэрозольных частиц применительно к процессам пылеулавливания при использовании гидродинамических, центробежных или электрических полей?
6. Какие способы концентрирования растворов вы знаете? Назовите принципиальную разницу.
7. Чем отличается аппаратурное оформление технологических схем очистки дымовых газов и пылегазовых потоков?

ГЛАВА 5

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ БИОСФЕРЫ

Природоохранную деятельность предприятий оценивают по достигаемой степени очистки вредных выбросов (ПДК, остаточным концентрациям); уровню загрязнения окружающей среды; капитальным и эксплуатационным затратам на экобиозащитную технику [1, 3, 5, 6] и другим показателям.

В Федеральном законе «Об охране окружающей среды» (ст. 36) говорится: «При проектировании зданий, строений, сооружений и иных объектов должны учитываться нормативы допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду, предусматриваться мероприятия по предупреждению и устранению загрязнений окружающей среды, а также способы размещения отходов производства и потребления, применяться ресурсосберегающие, малоотходные, безотходные и иные наилучшие существующие технологии, способствующие охране окружающей среды, восстановлению при-

родной среды, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов» [2].

Известно большое количество показателей оценки эффективности тех или иных инженерных решений, организационных мероприятий, инвестиционных проектов. Противостояние экономики и охраны биосферы — одна из проблем промышленной экологии. Решение этой проблемы лежит в разработке экономических механизмов, опирающихся на материальную заинтересованность в решении природоохранных задач. На рис. 5.1 представлены основные звенья (блоки) экономических механизмов охраны окружающей природной среды [3].

Экологические и экономические проблемы должны решаться во взаимосвязи. Например, экологический кризис характеризуется состоянием, при котором «потребительское давление» населения Земли, т. е. индустриальное потребление различных видов природных ресурсов становится близким к пределу способности самовоспроизводства природы. Это требует выработки такого механизма природопользования, который обеспечил бы условие безопасности существования триады: «человек — биосфера — техносфера»

$$(A + B)S < P, \quad (5.1)$$

где A и B — расходы природных ресурсов на человека соответственно для личных и производственных потребностей; S — численность населения; P — воспроизводимый потенциал природных ресурсов.

Таким образом, обеспечение экологического равновесия, предотвращение негативных последствий техногенного влияния промышленного производства и воспроизводство качественных показателей биосферы требует от природопользователя значительных экономических затрат на их реализацию. Поэтому помимо прямых затрат *экологического* назначения необходимы целевые *экономические* вложения как во вновь проектируемые, так и под-

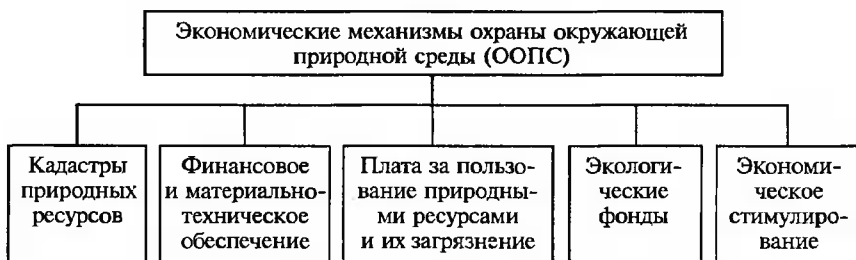


Рис. 5.1. Основные звенья (блоки) экономических механизмов ООПС

лежащие реконструкции технику и технологию, выпуск экологически чистой продукции, создание замкнутых (по материальным и энергетическим ресурсам) инженерных объектов.

Существует ряд методик расчета ущерба, причиняемого биосфере (включая человека) антропогенным воздействием. Рассмотрим некоторые из них [1—3]. Выбор алгоритма расчета зависит от поставленной цели и исходных данных. Методы количественной оценки подразделяются на прямого счета, аналитический и эмпирический (укрупненный). Первые два требуют сбора и обработки большого объема информации и на практике используются редко (чаще служат исходными данными и инструментом для создания информационной базы при разработке эмпирических моделей).

5.1. Экологическая оценка влияния промышленности на природу и человека

Федеральным законом «Об охране окружающей среды» (ст. 77/3) предусмотрено, что вред окружающей среде, причиненный субъектом хозяйственной или иной деятельности, возмещается в соответствии с утвержденными в установленном порядке таксами и методиками исчисления размера вреда окружающей среде, а при их отсутствии — из фактических затрат на восстановление нарушенного состояния окружающей среды, с учетом принесенных убытков, в том числе упущенной выгоды [2].

Взимание платы предусматривается:

за выброс в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников;

сброс загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты;

размещение отходов;

другие виды вредного воздействия (шум, вибрация, электромагнитные и радиационные воздействия и т. п.).

Установлены *базовые нормативы платы* [4, 5] за выбросы, сбросы загрязняющих веществ, размещение отходов, другие виды вредного воздействия в пределах:

допускаемых нормативов;

установленных лимитов (временно согласованных нормативов).

Порядок установления платы включает *три этапа*: определение базовых нормативов, дифференцирование ставок и конкретных размеров платы [3].

Базовые нормативы платы устанавливаются по каждому ингредиенту загрязняющего вещества (отхода), виду вредного воздействия с учетом степени опасности их для окружающей природной среды и здоровья населения.

Дифференцированные ставки платы определяются умножением базовых нормативов платы на коэффициент, учитывающий экологические факторы.

Плата за выбросы (сбросы) и размещение отходов является формой компенсации ущерба, наносимого загрязнением биосферы и является налоговым платежом (в соответствии с Законом РФ «Об основах налоговой системы в Российской Федерации» от 27.12.1991 № 2118-1). Установление цены за каждую тонну отдельного загрязняющего ингредиента (вредного вещества) позволило определить ущерб, наносимый именно этим веществом, и принять меры к уменьшению его содержания. Плата взимается согласно [4—6, 8].

С 1999 г. Налоговый кодекс Российской Федерации предусматривает замену платы за загрязнение биосферы (налоговый платеж) на *экологический налог* (см. письмо Госкомэкологии России «Об индексации платы за загрязнение окружающей природной среды на 1999 г.» от 28.12.1998 № 01-14/24-318). Определены *три вида платежей за загрязнение*:

в размерах, не превышающих установленные природопользователю предельно допустимые нормативы выбросов, сбросов загрязняющих веществ, объемы размещения отходов, уровни вредного воздействия;

в пределах установленных лимитов (временно согласованных нормативов);

за сверхлимитное загрязнение окружающей среды (штрафы).

Согласно нормативным документам при исчислении налога облагаемая им прибыль при фактически произведенных затратах и расходах за счет прибыли, остающейся в распоряжении предприятия, уменьшается на сумму взносов в экологические фонды, но не более 3 % облагаемой налогом прибыли. Налоговые льготы, включая установленные в п. 1, не должны уменьшать фактическую сумму налога, исчисленную без учета льгот более чем на 50 % [6].

Все затраты на природоохранные мероприятия (затраты экологического назначения) подразделяются на следующие группы [7]:

направленные на снижение или полное предотвращение выбросов (сбросов) ВВ;

ликвидирующие негативные последствия антропогенного воздействия на окружающую среду и нерационального природопользования;

связанные со строительством и оборудованием пунктов контроля за состоянием окружающей среды (мониторинга);

создания природоохранной индустрии, объектов природоохранного назначения и других основных фондов;

предохранения от физических загрязнителей (шум, вибрация, электромагнитное поле и др.);

предупреждение вредного воздействия отходов на биосферу (включая их переработку и отчуждение земель под полигоны); предупреждения воздействия ВВ на реципиентов и ликвидацию таких последствий.

5.1.1. Экологическая эффективность природоохранных мероприятий

Существуют нормы количества вредных веществ на 1 т готовой продукции. В качестве критерия оценки можно рекомендовать индекс относительной токсичности массы (ОТМ), используемой в химической промышленности [9]:

$$I_0 = \text{ПДК}_i / \text{ПДК}_1, \quad (5.2)$$

где ПДК_1 и ПДК_i — предельно допустимые концентрации вещества, соответственно принятого за эталон и сравниваемого (эталонные ПДК_1 : для воды 1 мг/л и для воздуха 0,01 мг/м³).

Используя индекс относительной токсичности и концентрации вещества в выбросе C , можно рассчитать относительную токсичность единичного I_j , группового I_n и суммарного I_N выбросов:

$$I_j = I_0 C_j; \quad I_n = \sum^n I_j = \sum^n I_0 C_j; \quad I_N = \sum^N I_n = \sum^N \sum I_0 C_i. \quad (5.3-5.5)$$

Общий индекс относительного загрязнения среды определяется по формуле

$$I_{\text{общ}} = \alpha I_N^a + I_N^b + \beta I_N^n, \quad (5.6)$$

где I_N^a , I_N^b , I_N^n — индексы относительной токсичности выбросов в атмосферу, воду и на поверхность литосферы; α , β — коэффициенты, характеризующие перенос загрязняющих веществ в поверхностные или грунтовые воды с учетом фильтрации, сорбции, трансформации (определяются экспериментально).

ОТМ выбросов находится с учетом единичного, группового и суммарного выбросов:

$$M_i = I_i V_i; \quad M_n = I_n V_n; \quad M_N = I_N V_N, \quad (5.7-5.9)$$

где M_i , M_n , M_N — единичная, групповая и суммарная токсичные массы выбросов; V_i , V_n , V_N — единичный, групповой и суммарный объем выбросов.

Общий баланс ОТМ технологического процесса

$$\sum (M_c + M_b + M_T) - \sum M_n - \sum M_p = 0, \quad (5.10)$$

где $M_c + M_b$ — масса отходов, поступающих в окружающую среду со сточными водами, газовыми выбросами и твердыми веществами; $\sum M_n$ — масса нейтрализованных отходов; $\sum M_p$ — масса рассеянных отходов.

Относительная экологичность процесса, инженерного объекта или предприятия, %:

$$A = \frac{\sum(M_c + M_b + M_t) - \sum M_n}{\sum(M_c + M_b + M_t)} 100. \quad (5.11)$$

Из формулы видно, что при $A \rightarrow 0$ процесс приближается к безотходному. Можно рассчитывать ОТМ производственного цикла цеха за время τ :

$$\sum(M_c + M_b + M_t)\tau - \sum M_n\tau = \sum M_{\text{общ}}\tau, \quad (5.12)$$

где $\sum M_{\text{общ}}\tau$ — сумма ОТМ отходов, поступивших в окружающую среду.

Удельная нагрузка на площадь F или объем V окружающей среды может быть определена по формулам

$$P_F = M_{\text{общ}}/F; \quad P_V = M_{\text{общ}}/V. \quad (5.13; 5.14)$$

Используя показатели токсичности, можно оценить эффективность природоохранных мероприятий, например полную эффективность очистных сооружений, %:

$$\eta = \frac{I_{N_1} - I_{N_2}}{I_{N_1}} 100 = \frac{M_{N_1} - M_{N_2}}{M_{N_1}} 100, \quad (5.15)$$

где 1, 2 — индексы, характеризующие величины либо до и после внедрения нового аппарата, метода, процесса, либо перед очистными сооружениями и после них.

Для облегчения дальнейших расчетов и получения критериев, численно сопоставимых с принятыми в других методиках, принимают для гидросферы ПДК = 1 мг/л. Значение единичной ПДК для атмосферного воздуха рассчитывается из известной системы уравнений:

$$\text{ПДК}_{\text{а.в}} = -2 + 0,86 \lg \text{ПДК}_{\text{в.п}}; \quad (5.16)$$

$$\text{ПДК}_{\text{в}} = 0,61 \lg \text{ПДК}_{\text{в.п}}, \quad (5.17)$$

где $\text{ПДК}_{\text{а.в}}$, $\text{ПДК}_{\text{в.п}}$, $\text{ПДК}_{\text{в}}$ — предельно допустимые концентрации соответственно в атмосферном воздухе, в воздухе промышленных помещений и в водоеме. ПДК для воздуха выражается в миллиграммах на кубический метр, для воды — в миллиграммах на литр.

При решении этой системы получаем

$$\text{ПДК}_{\text{а.в}} = 0,01 \text{ПДК}_{\text{в}}. \quad (5.18)$$

В качестве единицы ОТМ принята условная единица, соответствующая загрязненности 1 м^3 природной или техногенной среды 1 кг ОТМ.

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

$$\sum I_i \leq 1. \quad (5.19)$$

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

$$M_{\text{общ}}^* = \sum M_{с.т} + \sum M_t + \sum M_{ос}. \quad (5.20)$$

Сопоставление частных ОТМ в выбросах в водоем по группам вредности позволяет выявить, какие вещества создают неблагоприятную обстановку в водоеме и определить конкретные меры безопасности. ОТМ каждой группы веществ, отнесенная к площади водосброса в единицу времени, представляет *модуль химического стока* в единицах ОТМ с площади F промышленной площадки:

$$M_{\text{хс}} = M_{\text{общ}}^* / F, \quad (5.21)$$

который в сопоставлении с модулем естественно-природного стока характеризует нагрузку на окружающую среду в исследуемом районе.

Так как токсичность вещества для живых организмов — одно из проявлений его активности, можно сделать чрезвычайно важный вывод о наличии пока еще не исследованной коррелятивной связи между его токсичностью и эксергией и, далее, между токсичностью химических веществ, элементов, ионов и их энергетическими характеристиками. Это дает возможность определять в дальнейшем ПДК не эмпирическим путем, как это делается в настоящее время, а на основе строгих термодинамических характеристик, большинство из которых табулировано [9].

Оценка загрязнения атмосферного воздуха [10]. Удельный ущерб, руб./г., причиняемый выбросом загрязнений в атмосферный воздух для любого источника, определяется по формуле

$$Y_{\text{атм}} = \gamma \sigma f M, \quad (5.22)$$

где $\gamma = 2,4$ руб./усл. т — константа, которая может меняться в зависимости от курса цен; σ — коэффициент относительной опасности, зависящий от типа территории (в методике он принят равным 10 — для курортов и заповедников, 8 — для пригородных зон и зон отдыха (0,1 чел./га), n — для населенных мест с плотностью

населения n чел./га, $0,2 - 0,0025$ — для лесов, $0,25$ — для пашен и $0,5$ — для садов); f — безразмерный множитель, учитывающий характер рассеивания примеси в атмосфере (зависит от скорости оседания частиц, высоты их выбросов от земли, температуры газа: для частиц, оседающих со скоростью $1 - 20$ см/с, он находится в пределах $f = 0,89 - 4$; для частиц, оседающих со скоростью менее 1 см/с, $f = 0,08$); M — приведенная масса годового выброса загрязнений из источника, усл. т/г.

Коэффициент относительной безопасности определяется по формуле

$$\sigma = \sum_{i=1}^J \frac{S_i}{S_{3АЗ}} \sigma_i, \quad (5.23)$$

где S_i — площадь i -й части зоны активного загрязнения (ЗАЗ); $S_{3АЗ}$ — площадь зоны активного загрязнения, определяемая по методике, га; i — номер части ЗАЗ, относящейся к одному из типов территорий; J — общее число типов территорий, попавших в ЗАЗ.

Величина приведенной массы выброса загрязнений в атмосферу определяется по формуле

$$M = \sum_{i=1}^N A_i m_i, \quad (5.24)$$

где N — общее число загрязнителей; A — безразмерный показатель относительной активности примеси i -го вида, усл. т/т; m_i — масса годового i -го выброса в атмосферу, т (например, для СО в методике [12] принято $A = 1$, для SO_2 — 22, H_2S — 54,8, для паров фтора — 980, коксовой и агломерационной пыли — 100 и т.п.).

Оценка загрязнения водоемов. Удельный ущерб, руб./г., от сброса загрязняющих примесей в K -й водоем источником загрязнения определяется по формуле

$$Y_v = \gamma \sigma_k M, \quad (5.25)$$

где γ — константа [5, 12 — 14]; σ_k — константа, имеющая разные значения для разных водохозяйственных участков; например, для Волги $\sigma_k = 0,8 \dots 2,6$; для Дона $\sigma_k = 1,62 \dots 3,79$ и т.д. Аналогично (5, 24),

$$M = \sum_{i=1}^N A_i^1 m_i^1, \quad (5.26)$$

где A_i^1 — показатель относительной опасности сброса, рассчитываемый в соответствии с методикой [12]; m_i^1 — масса i -го выброса, приходящаяся, например, на производство 1 т металла.

Значение показателя A_i^1 определяется по формуле

$$A_i^1 = \frac{1 \text{ г/М}^3}{\text{ПДК}_{\text{р/х}}}, \quad (5.27)$$

где ПДК_{р/х} — определенная концентрация *i*-го вещества в воде водных объектов, используемых для рыбохозяйственных целей, г/м³; например, А₁ = 0,33 для взвешенных веществ, для нефтепродуктов — 20, для меди — 100 и т.д.

Оценка загрязнения земельных ресурсов. Удельный ущерб, нанесенный нарушением земельных ресурсов, определяется по формуле

$$Y_{зем} = (Y_{атм} + Y_{в} + Y_{зем}) S_{н} / Q_{п}, \quad (5.28)$$

где $Y_{атм}$ — ущерб от загрязнения атмосферы из-за нарушения земель, руб./га; $Y_{в}$ — ущерб от загрязнения водоемов из-за нарушения земель, руб./га; $Y_{зем}$ — ущерб от отчуждения земель, руб./га; $S_{н}$ — площадь нарушенных земель, га; $Q_{п}$ — годовой выпуск продукции, т/г.

Показатели, входящие в формулу (5.28), рассчитывают по зависимостям

$$Y_{атм} = V_{атм} C_{атм} k h z, \quad (5.29)$$

где $V_{атм}$ — объем пылегазообразных выбросов в атмосферу с 1 га земель, т; $C_{атм}$ — удельная оценка ущерба от выбросов в атмосферу в год, руб./т; k — коэффициент, учитывающий зональные особенности территории; h — коэффициент, зависящий от высоты выбросов; z — коэффициент, учитывающий характер использования территории в зоне влияния нарушенных земель;

$$Y_{в} = V_{в} C_{в}, \quad (5.30)$$

где $V_{в}$ — объем выноса загрязняющих веществ в водные бассейны с загрязнителей, расположенных на 1 га земель, т/га; $C_{в}$ — удельная оценка ущерба от поступления загрязняющих веществ в водоемы, руб./т;

$$Y_{зем} = \sum_{n=1}^N P_n (C'_n - C''_n), \quad (5.31)$$

где n — индекс вида сельскохозяйственной продукции; P_n — годовое количество недоданной сельскохозяйственной продукции из-за нарушения земель, т/га; C'_n и C''_n — себестоимость n -го вида продукции, получаемой соответственно в контрольной зоне и зоне влияния нарушенных земель, руб./т.

Полный годовой экономический ущерб от загрязнения Y , руб., определяется по формуле

$$Y = y_3 b Q_{п}, \quad (5.32)$$

где y_3 — удельный ущерб от загрязнения окружающей среды на единицу выбросов, руб./г.; b — масса выбросов на единицу продукции, т/т; $Q_{п}$ — годовой выпуск продукции.

Экономический ущерб рассчитывается по формуле

$$Y_{\text{выб}} = Y_{\text{атм}}\alpha + Y_{\text{в}}\beta + Y_{\text{зем}}\gamma + Y_{\text{н}}\eta, \quad (5.33)$$

где $Y_{\text{выб}}$ — экономический ущерб от массы всех видов выбросов, поступающих в природную среду от отдельного источника или предприятия в целом, руб./г.; $Y_{\text{атм}}$ — удельный экономический ущерб, причиняемый выбросом загрязнений в атмосферный воздух, руб./г.; $Y_{\text{в}}$ — удельный экономический ущерб, причиняемый годовым сбросом загрязняющих примесей в водные источники, руб./г.; $Y_{\text{зем}}$ — удельный экономический ущерб от годового нарушения и загрязнения земельных ресурсов, руб./г.; $Y_{\text{н}}$ — удельный экономический ущерб от годового нарушения и загрязнения недр, руб./г.; $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ — поправочные коэффициенты на степень достоверности укрупненного метода, определяются в каждой из сфер природоохранной деятельности как соотношение между показателем ущерба, определенного методом укрупненного счета, и показателем ущерба, определенным методом прямого счета.

В общем виде принцип расчета определения ущерба можно выразить формулой [3]

$$Y = \sum_{i=1}^n K_i y_i(x), \quad (5.34)$$

где i — вид хозяйственной деятельности; K_i — количество единиц основного расчетного элемента факторов восприятия (1000 чел. — для здравоохранения и коммунального хозяйства, 1 га — для лесного и сельского хозяйства и т.д.); $y_i(x)$ — удельный ущерб, наносимый единице основного расчетного элемента от частного антропогенного воздействия x (в качестве x могут приниматься концентрации вредных веществ, валовые выбросы или другие показатели).

Методика оценки ущерба по валовым атмосферным выбросам предусматривает оценку ущерба от источника загрязнения по трем ингредиентам: пыли, SO_2 и CO . Удельные ущербы на 1 т загрязняющего вещества задаются по семи зонам средних концентраций, на которые разбивается район, прилегающий к источнику выброса. Расчет ведется по формуле

$$Y = \sum_{z=1}^k M_z \sum_{j=1}^n y_{zj} R_{zj}, \quad (5.35)$$

где Y — ущерб по валовым атмосферным выбросам; z — вид загрязняющих веществ ($z = 1, 2, 3, \dots, k$); M_z — суммарное количество z -го загрязняющего вещества, тыс. т; j — зона средних концентраций загрязняющего вещества z ($j = 1, 2, 3, \dots, n$); y_{zj} — удельный

ущерб на j -й зоне на 1000 т загрязняющего вещества z в год, на-носимый расчетной единице факторов восприятия (локальные ущербы здоровью населения, коммунальному, сельскому и лес-ному хозяйствам, промышленности и др.); R_{izj} — количество рас-четных единиц факторов восприятия, попадающих на j -ю зону загрязнения z .

В отечественной практике накоплен опыт оценки удельных ущербов. Получены показатели ущерба на 1 т выбросов для пред-приятий черной металлургии, медеплавильных и коксохимиче-ских производств. Существуют оценки удельных ущербов в тепло-энергетике и алюминиевых производствах. Разрабатываются мето-ды оценки удельных ущербов для других предприятий на единицу материальных и энергетических ресурсов при выбросах в атмо-сферный воздух и водные объекты.

На основании данных, полученных на 38 объектах черной и цветной металлургии, сделана оценка экологического ущерба от промышленных загрязнений даже по стадиям производства и потребления металлопродукции: геологоразведка — 2 % (наруше-ние массива пород, загрязнение ландшафта и т. п.), добыча руд — 20 % (изъятие угодий, загрязнение территорий, водного и воз-душного бассейнов и т. д.), обогащение руд — 20 % (те же на-рушения), переработка сырья — 50 % (то же), обработка металлов и получение продукции — 5 %, использование металлопродук-ции — 1 % [3].

Экономические ущербы прогнозируют по формуле

$$Y_i^n = Y_i^6(x_i^n) j_i^n k_i^n, \quad (5.36)$$

где Y_i^n — i -й локальный ущерб на прогнозируемый период (η); $Y_i^6(x_i^n)$ — i -й удельный ущерб при уровне факторов влияния про-гнозируемого периода (x_i^n), определенный по зависимостям ба-зового года; j_i^n — индекс изменения факторов состояния i -го ло-кального ущерба в прогнозируемом году (η) по отношению к базо-вому; k_i^n — значение факторов восприятия, соответствующих i -му локальному ущербу в прогнозируемом году (η).

Таким образом экологическая эффективность в общем случае для всех затрат, связанных с ООПС, определяется отношением экологических достижений к вызвавшим их затратам. Экологи-ческие достижения рассчитываются по разности показателей каче-ства окружающей среды до и после введения природоохран-ных мероприятий. Их объем в стоимостном выражении связан с решением проблем социальной эффективности, затрат на тех-нику промышленной экологии, экономической оценки исполь-зования природных ресурсов и эффективности инвестиционных проектов и программ.

5.1.2. Экологические платежи и методы их расчета

Методы определения платежей за загрязнение атмосферы

Плата за выбросы загрязняющих веществ *в размерах, не превышающих установленные природопользователю нормативы предельно допустимых выбросов*, определяется умножением соответствующих ставок платы на величину загрязнения и суммирования полученных произведений по видам загрязняющих веществ:

$$\Pi_n^{\text{атм}} = \sum_{i=1}^n C_{n_i}^{\text{атм}} M_i^{\text{атм}} \text{ при } M_i^{\text{атм}} \leq M_{n_i}^{\text{атм}}, \quad (5.37)$$

где i — вид загрязняющего вещества; $\Pi_n^{\text{атм}}$ — плата за выбросы загрязняющих веществ в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы выбросов, руб.; $C_{n_i}^{\text{атм}}$ — ставка платы за выброс 1 т i -го загрязняющего вещества в пределах допустимых нормативов выбросов, руб.; $M_i^{\text{атм}}$ — фактический выброс i -го загрязняющего вещества, т. При этом

$$C_{n_i}^{\text{атм}} = H_{б.н_i}^{\text{атм}} K_э^{\text{атм}}, \quad (5.38)$$

где $H_{б.н_i}^{\text{атм}}$ — базовый норматив платы за выброс 1 т i -го загрязняющего вещества в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы выбросов, руб.; $K_э^{\text{атм}}$ — коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферного воздуха в данном регионе.

Плата за выбросы загрязняющих веществ *в пределах установленных лимитов* определяется путем умножения соответствующих ставок платы на разность между лимитными и предельно допустимыми выбросами загрязняющих веществ и суммирования полученных произведений по видам загрязняющих веществ.

Плата за *сверхлимитный выброс* загрязняющих веществ определяется путем умножения соответствующих ставок платы за загрязнение в пределах установленных лимитов на величину превышения фактической массы выбросов над установленными лимитами, суммирования полученных произведений по видам загрязняющих веществ и умножения этих сумм на пятикратный повышающий коэффициент.

Методика расчета общего объема платежей *предприятия* за загрязнение атмосферного воздуха предполагает следующую последовательность расчетов.

1. Расчет фактически произведенной массы выбросов:

а) в пределах установленного лимита — как суммы произведений объема выброса каждого ингредиента, т/год, в пределах лимита на коэффициент приведения к условным тоннам, усл. т;

б) сверх лимита — как суммы произведений объема выброса каждого загрязняющего вещества сверх лимита на коэффициент приведения.

2. Расчет коэффициента кратности норматива платы (K_k) за сверхлимитное загрязнение по формуле

$$K_k = M_{\text{ф}}/M_{\text{л}}, \quad (5.39)$$

т.е. на основе превышения массы фактических выбросов $M_{\text{ф}}$, в усл. т, над массой выбросов в пределах лимита $M_{\text{л}}$.

3. Расчет платежей предприятий за выбросы в атмосферу в пределах лимита:

$$П_{\text{л}} = H_{\text{л}} M_{\text{л}} \quad (5.40)$$

как произведения норматива платы за выбросы в пределах лимита $H_{\text{л}}$ на фактическую массу выбросов $M_{\text{л}}$, усл. т.

4. Расчет объема платежей за сверхлимитные выбросы как произведения размера платежей за условную тонну на коэффициент кратности и на массу выброса сверх лимита.

5. Общая сумма выплат предприятия складывается из итогов расчетов по пп. 3 и 4 как сумма выплат за загрязнение в пределах лимита и за сверхлимитные выбросы в атмосферу.

Методы определения платежей за загрязнение водных ресурсов

Плата за сбросы в водные объекты загрязняющих веществ *в размерах, не превышающих установленные природопользователю предельно допустимые нормативы сбросов*, определяется умножением соответствующих ставок платы на величину загрязнения и суммирования полученных произведений по видам загрязняющих веществ:

$$П_{\text{н}}^{\text{вод}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{н}_i}^{\text{вод}} M_i^{\text{вод}} \quad \text{при } M_i^{\text{вод}} \leq M_{\text{н}_i}^{\text{вод}}, \quad (5.41)$$

где $П_{\text{н}}^{\text{вод}}$ — плата за сбросы загрязняющих веществ в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы сбросов, руб.; i ($i = 1, 2, \dots, n$) — вид загрязняющих веществ; $C_{\text{н}_i}^{\text{вод}}$ — ставка платы за сбросы 1 т i -го загрязняющего вещества в пределах допустимых нормативов сбросов, руб.; $M_i^{\text{вод}}$ — фактический сброс i -го загрязняющего вещества, т; $M_{\text{н}_i}^{\text{вод}}$ — предельно допустимый сброс i -го загрязняющего вещества, т. Причем

$$C_{\text{н}_i}^{\text{вод}} = H_{\text{б.н}_i}^{\text{вод}} K_{\text{э}}^{\text{вод}}, \quad (5.42)$$

где $H_{\text{б.н}_i}^{\text{вод}}$ — базовый норматив платы за сброс 1 т i -го загрязняющего вещества в размерах, не превышающих предельно допусти-

мые нормативы сбросов, руб.; $K_3^{\text{вод}}$ — коэффициент экологической ситуации и экологической значимости поверхностного водного объекта.

Плата за сбросы в водные объекты загрязняющих веществ *в пределах установленных лимитов* ($\Pi_{\text{л}}^{\text{вод}}$) определяется умножением соответствующих ставок платы на разницу между лимитными и предельно допустимыми сбросами загрязняющих веществ и суммированием полученных произведений по видам загрязняющих веществ.

Плата за *сверхлимитный сброс* загрязняющих веществ ($\Pi_{\text{сл}}^{\text{вод}}$) определяется умножением соответствующих ставок платы за загрязнение в пределах установленных лимитов на величину превышения фактической массы сбросов над установленными лимитами, суммированием полученных произведений по видам загрязняющих веществ и умножением этих сумм на пятикратный повышающий коэффициент.

Общая плата за загрязнение поверхностных и подземных водных объектов определяется как сумма:

$$\Pi^{\text{вод}} = \Pi_{\text{н}}^{\text{вод}} + \Pi_{\text{л}}^{\text{вод}} + \Pi_{\text{сл}}^{\text{вод}}. \quad (5.43)$$

Методы определения платежей за размещение отходов

Размер платы за размещение отходов *в пределах установленных природопользователю лимитов* определяется путем умножения соответствующих ставок платы с учетом вида размещаемого отхода (нетоксичные, токсичные) на массу размещаемого отхода и суммирования полученных произведений по видам размещаемых отходов:

$$\Pi_{\text{л}}^{\text{отх}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{л}_i}^{\text{отх}} M_i^{\text{отх}} \quad \text{при} \quad M_i^{\text{отх}} \leq M_{\text{л}_i}^{\text{отх}}, \quad (5.44)$$

где $\Pi_{\text{л}}^{\text{отх}}$ — размер платы за размещение i -го отхода в пределах установленных лимитов, руб.; $C_{\text{л}_i}^{\text{отх}}$ — ставка платы за размещение 1 т i -го отхода в пределах установленных лимитов, руб.; $M_i^{\text{отх}}$ — фактическое размещение i -го отхода, т, м³; i ($i = 1, 2, \dots, n$) — вид отхода; $M_{\text{л}_i}^{\text{отх}}$ — годовой лимит на размещение i -го отхода, т, м³.
При этом

$$C_{\text{л}_i}^{\text{отх}} = H_{\text{б.л.}}^{\text{отх}} K_3^{\text{отх}}, \quad (5.45)$$

где $H_{\text{б.л.}}^{\text{отх}}$ — базовый норматив платы за 1 т размещаемых отходов в пределах установленных лимитов, руб.; $K_3^{\text{отх}}$ — коэффициент экологической ситуации и экологической значимости почв в данном регионе.

Размер платы за *сверхлимитное размещение токсичных и нетоксичных отходов* определяется умножением соответствующих ставок платы за размещение отходов в пределах установленных лимитов на величину превышения фактической массы размещаемых отходов над установленными лимитами, умножением этих сумм на пятикратный повышающий коэффициент и суммированием полученных произведений по видам размещения отходов:

$$П_{сл}^{отх} = 5 \sum_{i=1}^n C_{л_i}^{отх} (M_i^{отх} - M_{л_i}^{отх}) \quad \text{при } M_i^{отх} > M_{л_i}^{отх}, \quad (5.46)$$

где $П_{сл}^{отх}$ — размер платы за сверхлимитное размещение отходов, руб.; $C_{л_i}^{отх}$ — ставка платы за размещение 1 т i -го отхода в пределах установленных лимитов, руб.; $M_i^{отх}$ — фактическое размещение i -го отхода, т, м³; $M_{л_i}^{отх}$ — годовой лимит на размещение i -го отхода, т, м³.

5.2. Оценка социальной эффективности природоохранных мероприятий и программ

«Человек имеет право на благоприятную среду и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим нарушением» (ст. 29 «Декларации прав и свобод человека»). Поэтому наряду с экологическим и экономическим ущербом необходимо оценить и социальный ущерб, наносимый *здоровью человека* загрязненным ВВ воздухом, водой, грунтом и т. п. В настоящее время *социальный ущерб* оценивается *экономическими* показателями [10].

1. Эффектом от предотвращения потерь чистой продукции вследствие заболеваемости человека из-за загрязнения биосферы:

$$\mathcal{E}_1 = B_6 \Pi_4 (P_2 - P_1), \quad (5.47)$$

где B_6 — число работающих, отвлеченных по болезни или уходу за больными; Π_4 — чистая продукция на один человеко-день работы; P_1 и P_2 — трудоемкость одного работающего до и после проведения мероприятия, чел.-дни.

2. Эффектом от сокращения выплат из фонда социального страхования в результате тех же причин

$$\mathcal{E}_{II} = B_3 V_n (P_2 - P_1), \quad (5.48)$$

где B_3 — число работающих, получающих пособия вследствие заболеваемости из-за загрязнения биосферы; V_n — средний размер пособия.

3. Эффектом от сокращения затрат общества на лечение человека в результате тех же причин

$$\Theta_{III} = B_a D_a Z_a + B_c D_c Z_c, \quad (5.49)$$

где B_a и B_c — число больных соответственно, лечащихся амбулаторно и в стационарах от заболеваний, вызванных загрязнением биосферы; D_a и D_c — средняя продолжительность болезни одного больного; Z_a и Z_c — средние затраты, приходящиеся на одного больного.

4. Эффектами от улучшения использования трудовых ресурсов, материалов и оборудования.

В общем случае *социальная эффективность* измеряется отношением обобщенного показателя, выражающего социальный эффект к затратам, обеспечившим его достижение. Социальный результат определяется по разности показателей, характеризующих изменения в социальной сфере в результате осуществления природоохранных мероприятий и программ [7].

5.3. Экономическая эффективность малоотходных и ресурсосберегающих производств

Расчет экономического эффекта от внедрения малоотходных и ресурсосберегающих производств основывается на сопоставлении затрат на их осуществление с экономическим результатом, достигнутым при их реализации, выражающимся величиной ликвидированного (предотвращенного) экологического ущерба, наносимого загрязнением окружающей среды, который рассчитывается согласно [1 — 15].

При малоотходном (ресурсосберегающем) производстве рационально используются сырье и энергия, а вредное влияние на биосферу сведено к минимуму. Поэтому экономическая эффективность технических природоохранных мероприятий (экобиозащитная техника, малоотходные технологии и др.) оценивается, прежде всего, по повышению эффективности того или иного производства.

Общая (абсолютная) экономическая эффективность — эффективность затрат Θ_3 , руб., определяется как отношение годового полного экономического эффекта Θ к приведенным затратам на осуществление мероприятия [10]

$$\Theta_3 = \frac{\Theta}{C + E_n K}, \quad (5.50)$$

где C — текущие затраты в течение года; E_n — норматив эффективности для приведения капитальных вложений к годовой размерности; K — капитальные вложения, определившие эффект.

Если эффект Θ — результат проведения долговременного мероприятия, растянувшегося на несколько лет, то можно рассчитать интегральный эффект $\Sigma(C + K)$ за период, превышающий

срок окупаемости $t = 1/E_n$. Тогда эффективность затрат определится по формуле

$$\Theta_3 = \frac{\sum \Theta}{\sum (C + K)} \quad (5.51)$$

Первичный эффект от снижения отрицательного воздействия на среду (например, загрязнения), рассчитывается по формуле

$$\Theta_{п.э} = \frac{\Delta B}{C + E_n K}, \quad (5.52)$$

где ΔB — снижение показателя отрицательного воздействия на среду (например, снижение концентрации вредных веществ в атмосфере или воде).

Этот же первичный эффект может быть выражен формулой

$$\Theta_{п.э} = \frac{P}{C + E_n K}, \quad (5.53)$$

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

Экономический эффект от природоохранных мероприятий может быть определен как *общий* — по приросту чистой продукции при стоимости природного ресурса (согласно его экономической оценке), а также как *хозрасчетный* — по приросту прибыли предприятия или снижению себестоимости продукции [10].

Экономический эффект, получаемый от сокращения ущерба ΔU и увеличения прибыли предприятия $\Delta \Pi$,

$$\Theta = \Delta U + \Delta \Pi - (C + E_n K). \quad (5.54)$$

Ущерб, наносимый окружающей среде промышленным предприятием, равен сумме ущербов, наносимых атмосферному воздуху Y_a , водному бассейну Y_b , земельным ресурсам Y_3 , недрам Y_n , флоре и фауне Y_ϕ , т. е.

$$Y = Y_a + Y_b + Y_3 + Y_n + Y_\phi. \quad (5.55)$$

Например, ущерб от сокращения сельскохозяйственных угодий при строительстве предприятия рассчитывается по формуле

$$Y_3 = \sum_{k=1}^n \Pi_{kj} \sum_{j=1}^m S_{kj}, \quad (5.55)$$

где Π_{kj} — ценность, тыс. руб.; S_{kj} — площадь земли j -го участка k -го качества, га; n — число значений качества; m — число рассматриваемых участков.

Абсолютная эффективность дополнительных капитальных вложений (фактическая) на природоохранные мероприятия:

$$\Theta_{\phi} = \Delta\P/K. \quad (5.57)$$

Абсолютная экономическая эффективность природоохранных мероприятий (фактическая)

$$\Theta_{\phi}^n = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Theta_{ij}}{C + E_n K}, \quad (5.58)$$

где Θ_{ij} — экономический эффект i -го вида на j -м объекте; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ($E_n = 0,12 \div 0,16$).

Общий эффект от повышения производительности труда в отраслях материального производства рассчитывается по приросту чистой продукции, а в непромышленной сфере — по сокращению затрат; хозрасчетный эффект — по приросту прибыли или экономии затрат.

Общий эффект от сокращения сырья, топлива и материалов, в частности в отходах, сточных водах, газах и пыли, исчисляется по приросту чистой продукции, а хозрасчетный — по приросту прибыли или суммы экономии по стоимости сэкономленного за вычетом текущих затрат.

Общий эффект от лучшего использования оборудования вследствие улучшения среды определяется приростом чистой продукции в связи с сокращением простоев оборудования в ремонте и увеличением фонда машинного времени, уменьшением затрат на все виды ремонтов и обслуживания, ростом производительности труда работников. Хозрасчетный эффект рассчитывается по приросту прибыли от сокращения затрат на ремонты и от увеличения срока службы оборудования

$$\Theta_x = L_1 - L_2 + \Phi K_p (T_2 - T_1), \quad (5.59)$$

где L_1 и L_2 — затраты на ремонт до и после природоохранных мероприятий; Φ — среднегодовая стоимость оборудования; K_p — коэффициент годовой рентабельности основных фондов; T_1 и T_2 — продолжительность службы оборудования до и после проведения мероприятий.

Аналогично рассчитывают общий и хозрасчетный эффекты от повышения (понижения) качества продукции промышленности и сельского хозяйства, сокращения (увеличения) затрат на очистку воздуха и воды, на предотвращение гибели, повышение продуктивности и восстановление лесных насаждений и т.д.

При необходимости выбора самого выгодного варианта проведения природоохранных мероприятий используют методы эконо-

мического сравнения вариантов, рекомендуемые Типовой методикой определения экономической эффективности капитальных вложений [12]. Преимущество имеет вариант с наименьшими приведенными затратами, т. е. суммой эксплуатационных расходов и дисконтированных (приведенных) по нормативу эффективности капитальных вложений:

$$C + E_n K \rightarrow \min. \quad (5.60)$$

Если проводятся мероприятия, требующие длительного срока и нескольких последовательных капитальных вложений, а также изменения эксплуатационных расходов, то расчет ведется по выражению

$$\sum_{t=1}^T (K_n + K_{д,t} + C_{э,t}) / (1 + E_n), \quad (5.61)$$

где T — общий срок осуществления всех мероприятий; K_n — первоначальные капитальные вложения; $K_{д,t}$ — дополнительные капитальные вложения, необходимые для обеспечения нормальной работы природоохранных объектов в t -й год эксплуатации ($t = 1, 2, 3, \dots, T$); $C_{э,t}$ — эксплуатационные расходы в t -й год; E_n — коэффициент дисконта затрат в соответствии с Инструкцией эффективности по строительству промышленных объектов ($E_n = 0,08$).

Ниже представлен показатель экономической эффективности природоохранных затрат [3]:

$$\Theta_3 = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Theta_{ij} - C_n \right) / (C_n + E_n K_n), \quad (5.62)$$

где Θ_3 — экономическая эффективность средозащитных затрат; Θ_{ij} — экономический эффект i -го вида ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) от предотвращения потерь на j -м объекте ($j = 1, 2, 3, \dots, m$); C_n — годовые эксплуатационные расходы на основные фонды, обеспечившие полный экономический эффект; E_n — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений средозащитного назначения; K_n — капитальные вложения в строительство средозащитных сооружений; n — подстрочный индекс (C_n, K_n, E_n) означает соответствие нормативам эффективности.

Методикой предусматривается и оценка экономической эффективности капитальных вложений в природоохранные мероприятия:

$$\Theta_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\Theta_{ij} - C_n) / K_n. \quad (5.63)$$

Полный экономический эффект оценивается приростом национального дохода, который является конечной целью реализации средств на защиту окружающей среды.

Он может быть выражен как разность между полными затратами на функционирование хозяйственного комплекса (с учетом природоохранных мероприятий) и существующими затратами. Полные затраты (для сравниваемых вариантов) можно выразить суммой затрат на природоохранные мероприятия (Z'_m) и затрат в подразделениях, на которые распространяется эффект от внедрения мероприятия (Z'_n):

$$Z' = Z'_m + Z'_n, \quad (5.64)$$

$$Z'' = Z''_m + Z''_n, \quad (5.65)$$

Разность последних слагаемых каждого варианта — снижение экономического ущерба (ΔY), наносимого хозяйственной деятельностью и населению страны:

$$\Delta Y = Z'_n - Z''_n. \quad (5.66)$$

Таким образом, прирост национального дохода

$$\Delta D = Z'_m - Z''_m + \Delta Y \quad (5.67)$$

или

$$\Delta D = \Delta Y - \Delta Z_m, \quad (5.68)$$

где ΔZ_m — дополнительные траты на природоохранные мероприятия, приведшие к ΔY .

В конечном счете полный экономический эффект от затрат на охрану природы (Θ_{ij}) можно выразить через снижение экономического ущерба:

$$\Theta_{ij} = \Delta Y_{ij}. \quad (5.69)$$

Показателем экономической эффективности сравниваемых вариантов является минимум совокупных годовых эксплуатационных расходов и капитальных вложений:

$$C_n + E_n K_n \rightarrow \min. \quad (5.70)$$

Для капитальных вложений при отсутствии отраслевых инструкции принимают $E_n = 0,15$.

При мероприятиях с долгосрочным эффектом (восстановлении лесных насаждений, рекультивации земель, воспроизводстве рыбных запасов и др.) и изменением во времени эксплуатационных расходов и капитальных вложений полные затраты (приведенные к началу расчетного периода) определяются по формуле

$$\sum_{t=1}^T = K_n + K_{\Delta t} + C_{\Delta t} / (1 + E_{np}) \rightarrow \min, \quad (5.71)$$

где K_n — первоначальные капитальные вложения в мероприятия; $K_{\Delta t}$ — дополнительные капиталовложения для обеспечения работы средозащитных сооружений в t -й год эксплуатации ($t = 1, 2, 3, \dots, T$); $C_{\Delta t}$ — эксплуатационные расходы на основные фонды в t -й год; $E_{\text{нп}}$ — нормативный коэффициент приведения разновременных затрат (0,08 — для обычных затрат; 0,10 — для затрат на новую технику; 0,03 — затраты на восстановление лесных насаждений и др.), принимаемый в соответствии с отраслевыми инструкциями.

В другой методике за суммарный (ранее общий, полный) критерий эффективности природоохранных мероприятий принят *показатель эффективности*, определяемый как отношение объема полного экологического ($P_{\text{экол}}$), экономического ($P_{\text{экон}}$) и социального эффектов ($P_{\text{соц}}$) к объему затрат (Z), связанных с их проведением [7]:

$$\Theta = \sum P_{\text{экол}} + P_{\text{экон}} + P_{\text{соц}} / Z. \quad (5.72)$$

При этом необходимо помнить:

экологическая эффективность природоохранных затрат определяется отношением величины экологических результатов к вызвавшим их затратам. Экологические результаты рассчитываются по разности показателей состояния окружающей среды до и после мероприятий. Их характеристика в стоимостном выражении связана с решением проблем экономической оценки природных ресурсов;

экономическая эффективность природоохранных затрат определяется отношением достигнутого экономического эффекта к объему природоохранных затрат;

социальная эффективность природоохранных затрат измеряется отношением обобщенного показателя, выражающего социальный эффект, к затратам, обеспечившим его достижение. Социальный результат определяется по разности показателей, характеризующих изменения в социальной сфере в результате осуществления средозащитных мероприятий.

В приводимой ниже расчетной методике оценки экономической эффективности малоотходных производств эффект образуется за счет непосредственного возвращения сырья (отходов) в производство $\Theta_{\text{нв}}$, предотвращения социально-экономического ущерба от загрязнения окружающей среды Θ_y и снижения затрат на добычу сырья Θ_d [9]:

$$\Theta = \Theta_{\text{нв}} + \Theta_y + \Theta_d, \quad (5.73)$$

$$\Theta_{\text{нв}} = z n f Z_{\text{п}}, \quad (5.74)$$

где z — замыкающие затраты на данный вид продукции; n — количество используемых отходов; f — коэффициент, учитывающий

количественное соотношение отходов и исходного сырья; Z_n — приведенные затраты на вовлечение отходов в производственный цикл.

$$\Theta_y = Y_v - Y_\phi, \quad (5.75)$$

где Y_v — возможный ущерб при отсутствии природоохранных мероприятий, выраженный в стоимостной форме; Y_ϕ — фактический ущерб, выраженный в стоимостной форме и существующий в данное время.

Региональный эффект Θ_d может быть представлен в виде снижения приведенных затрат на единицу продукции за счет использования отходов производства.

Социально-экономический эффект малоотходных производств определяют по комплексному критерию

$$\eta = \sum_{i=1}^n \Theta_i - Y/Z_n \rightarrow \max, \quad (5.76)$$

где $\sum_{i=1}^n \Theta_i$ — сумма всех эффектов, достигаемых при внедрении малоотходного производства:

$$\sum_{i=1}^n \Theta_i = \Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4 + \Theta_5, \quad (5.77)$$

где Θ_1 — эффект от производства конечной продукции, полученной при внедрении малоотходного производства и более полного использования исходного сырья; Θ_2 — эффект от потребления конечной продукции, полученной при внедрении малоотходного производства и более полного использования исходного сырья; Θ_3 — экономия затрат на разведку, добычу и транспортировку отдельного ресурса; Θ_4 — эффект от комплексного развития региона и совершенствования производственных сил; Θ_5 — внешнеторговый эффект (сокращение импорта или рост экспорта сырья, продуктов переработки, конечного продукта); Y — ущерб от загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления; Z_n — полные затраты на осуществление малоотходного и ресурсосберегающего производства.

При наличии ряда вариантов таких производств должен быть выбран вариант с наибольшим коэффициентом абсолютной социально-экономической эффективности при равных или близких по величине народнохозяйственных затратах (независимо от агрегатного состояния отходов: газообразного, жидкого, твердого или комбинированного).

Список литературы

1. *Калыгин В. Г.* Промышленная экология. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. — 240 с.
2. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ.
3. Экология / Л. И. Цветкова, М. И. Алексеев, Б. П. Усанов и др. — М.: АСВ, СПб.: Химиздат, 1999. — 488 с.
4. Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении порядка определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей природной среды, размещение отходов, другие виды вредного воздействия» от 28.08.1992 № 632.
5. Базовые нормативы платы за выбросы, сбросы загрязняющих веществ в окружающую природную среду и размещение отходов. Коэффициенты, учитывающие экологические факторы. Утв. министром Минприроды России от 27.11.1992.
6. Инженерная экология и экологический менеджмент / М. В. Буторина, П. В. Воробьева, А. П. Дмитриева и др. — М.: Логос, 2002. — 528 с.
7. *Кулагина Г. Д.* Статистика окружающей среды. — М.: Изд-во МНЭПУ, 1999. — 104 с.
8. Плата за размещение отходов (нормативно-правовые документы). — М.: МГУП «Промотходы», 2000. — 56 с.
9. *Чесунов В. М., Захарова А. А.* Очистка, рекуперация отходов в кожевенно-обувной промышленности. — М.: Легпромбытиздат, 1987. — 64 с.
10. *Протасов В. Ф., Молчанов А. В.* Экология, здоровье и природопользование в России — М.: Финансы и статистика, 1995. — 528 с.
11. Экология и экономика природопользования / Под ред. Э. В. Гирусова. — М.: Закон и право: ЮНИТИ, 1998. — 455 с.
12. Эффективность капитальных вложений: Сб. утвержденных методик. — М.: Экономика, 1983. — 89 с.
13. Методические указания по разработке проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение. Утверждены приказом МПР России от 11.03.2002 № 115.
14. Федеральный закон «О плате за пользование водными объектами» от 06.05.1998 № 71-ФЗ (с изм. и доп. от 30.03.1999 и 07.08.2001).
15. Письма Госкомэкологии России «Об индексации платы за загрязнение окружающей среды» за 1993—2000 гг.
16. Постановление Правительства Российской Федерации «О нормах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, размещение отходов производства и потребления» от 12.06.2003 № 344.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается взаимосвязь экологических и экономических проблем для промышленного предприятия?
2. Назовите источники финансирования природоохранной деятельности.

3. Какие существуют виды платы за пользование природными ресурсами, загрязнение окружающей среды, другие виды воздействия?
4. Какими показателями можно оценить экологическую эффективность природоохранных мероприятий?
5. Каковы основные принципы оценки экологических ущербов?
6. Как оценивается социальная эффективность природоохранных мероприятий и программ?
7. Какими показателями можно оценить экономическую эффективность малоотходных и ресурсосберегающих производств?

ЧАСТЬ II

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

ГЛАВА 6

ПРИРОДООХРАННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

6.1. Система государственных стандартов в области охраны биосферы

Стандартизация в комплексе мер по обеспечению экологической безопасности биосферы — это разработка и внедрение в практику научно обоснованных, обязательных для выполнения технических требований и норм (стандартов), регламентирующих человеческую деятельность по отношению к окружающей среде. Стандарты качества окружающей среды устанавливают государственные органы (Госстандарт России, Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации и другие министерства, комитеты, ведомства).

Требования по охране окружающей среды регламентируются в трех видах стандартов: общетехнических, на группу однородной продукции и на конкретные виды продукции [1].

Стандарты подразделяют на *государственные* (ГОСТ и ГОСТ Р), *отраслевые* (ОСТ) и *стандарты предприятий* (СТП)¹.

Обозначения *государственных стандартов* состоят из номера системы (индекса) по классификатору (17 — индекс охраны природы)², шифра комплекса (классификационной группировки), шифра группы, порядкового номера стандарта и года его регистрации (рис. 6.1). Первый разработанный стандарт ГОСТ 17.0.0.01—76 «Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов. Основные положения» был введен 01.01.1977 и установил систему стандартов, направленных на охрану природы (табл. 6.1 и 6.2).

¹ Существуют также технические условия (ТУ), санитарные нормы (СН), строительные нормы и правила (СНиП), санитарные правила и нормы (СанПиН), гигиенические нормативы, правила устройства и безопасной эксплуатации (ПУЭ), правила и инструкции.

² Номер системы стандартов в области промышленной безопасности и охраны труда — 12; в области чрезвычайных ситуаций — 22.



Рис. 6.1. Структура государственного стандарта в области охраны природы

Комплекс стандартов безопасности в чрезвычайных ситуациях (БЧС) включает 12 групп. В каждой группе стандарты имеют порядковую нумерацию от 00 до 99. Основные положения стандартов БЧС отражены в ГОСТ Р 22.0.01—94.

Таблица 6.1

Комплексы природоохранных стандартов

| № | Комплекс стандартов | Кодовое наименование |
|---|--|----------------------|
| 0 | Организационно-методические — в области охраны природы | — |
| 1 | По охране и рациональному использованию вод | Гидросфера |
| 2 | По защите атмосферы | Атмосфера |
| 3 | По охране и рациональному использованию почв | Почвы |
| 4 | По улучшению использования земель | Земли |
| 5 | По охране флоры | Флора |
| 6 | По охране фауны | Фауна |
| 7 | По охране и преобразованию ландшафтов | Ландшафты |
| 8 | По охране и рациональному использованию недр | Недра |

Классификация системы стандартов в области охраны природы

| № | Группа стандартов |
|---|---|
| 0 | Основные положения |
| 1 | Термины, определения, классификация |
| 2 | Показатели качества природных сред, параметры загрязняющих выбросов (сбросов) и показатели интенсивности использования природных ресурсов |
| 3 | Правила охраны природы и рационального использования природных ресурсов |
| 4 | Методы определения параметров состояния природных объектов и интенсивности хозяйственного воздействия |
| 5 | Требования к средствам контроля и измерений состояния окружающей природной среды |
| 6 | Требования к устройствам, аппаратам и сооружениям по защите окружающей среды от загрязнений |
| 7 | Прочие стандарты |

Структура обозначения стандарта БЧС:

| | | | | |
|--------|---------------|--------------|------------------|-----------------|
| ГОСТ Р | 22. | X. | XX— | XX |
| Индекс | Номер системы | Номер группы | Порядковый номер | Год регистрации |

Классификация стандартов БЧС по группам, приведена в табл. 6.3.

Отраслевые стандарты (нормы), например, в строительстве нефтегазовых объектов распространяются на инженерные изыскания, проектирование и строительство наземных и подземных магистральных и промысловых трубопроводов, дорог и других объектов обустройства газовых и нефтяных месторождений. Основным документом являются Ведомственные строительные нормы (ВСН-89) «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Охрана окружающей среды». В отрасли разработаны также методические рекомендации по экологической паспортизации объектов, строительных организаций и предприятий; типовые природоохранные разделы (эталоны природоохранных разделов) проектов организации строительства (ПОС) и проектов производства работ (ППР) — аналогов *стандартов предприятий*.

Преемственность в работе по стандартизации охраны окружающей среды сохранена в Российской Федерации после ликвидации СССР. Работы по стандартизации продолжаются, растет чи-

Классификация стандартов БЧС

| № | Группа стандартов | Кодовое наименование |
|--------|--|---|
| 0 | Основополагающих | Основные положения |
| 1 | На мониторинг и прогнозирование | Мониторинг и прогнозирование |
| 2 | На обеспечение безопасности: объектов народного хозяйства | Безопасность: объектов народного хозяйства |
| 3 | населения | населения |
| 4 | продовольствия, пищевого сырья и кормов | продовольствия |
| 5 | сельскохозяйственных животных и растений | животных и расте- ний |
| 6 | водоисточников и систем водо- снабжения | воды |
| 7 | На средства и способы управления, связи и оповещения | Управление, связь, оповещение |
| 8 | На ликвидацию чрезвычайных ситу- аций | Ликвидация чрезвы- чайных ситуаций |
| 9 | В области технического оснащения аварийно-спасательных формирова- ний, средств специальной защиты и экипировки спасателей | Аварийно-спасатель- ные средства |
| 10, 11 | Резерв | |

сло межгосударственных стандартов СНГ. В настоящее время действуют более 110 государственных стандартов в этой области [2]. В соответствии с Законом РФ «О стандартизации» от 10.06.1993 № 5154-1 ежегодно составляется программа по разработке новых и пересмотру действующих стандартов. Поэтому число федеральных стандартов, соответствующих стандартам МСС (ISO)¹ и МЭК (IEC)², планомерно увеличивается и сегодня составляет около 80%. (Основные государственные и отраслевые стандарты, связанные с природоохранной деятельностью в промышленной сфере см. [3].)

¹ Международная организация по стандартизации.

² Международная электротехническая комиссия.

*Стандарты серии 14000
(ISO/TC¹ 207)*

Международной организацией по стандартизации приняты первые стандарты серии 14000 по управлению качеством окружающей среды, которые применяют в России [10].

Эти стандарты:

ISO 14001 «Системы управления качеством окружающей среды. Общие требования и рекомендации по использованию», 1996 г.;

ISO 14004 «Системы управления качеством окружающей среды. Общие принципы управления качеством окружающей среды, системы качества и поддерживающая техника», 1996 г.;

ISO 140010 «Руководство по аудиту окружающей среды. Общие принципы», 1996 г.;

ISO 140011-1 «Руководство по аудиту окружающей среды. Процедуры аудита. Часть 1. Аудит систем управления качеством окружающей среды», 1996 г.;

ISO 14012 «Руководство по аудиту окружающей среды. Квалификационные требования к аудиторам», 1996 г.;

ISO 14020—14025 «Экологическое маркирование: основные принципы и требования, предъявляемые к сертификации продукции, термины и определения, практическая программа, сертификационная процедура для продуктов», 1998 г.;

ISO 14031 «Оценка экологических показателей СУП», проект представлен на рассмотрение Техническому комитету в 2000 г.;

ISO 14040—14043 «Оценка жизненного цикла», проект представлен на рассмотрение в 2000 г.;

ISO 14050 «Термины и определения», 1998 г.

Эти стандарты отражают обостренное внимание мировой общественности к вопросам экологии, согласованы с развитыми и широко применяемыми стандартами ISO 9000.

Российские стандарты, например по экологической сертификации, соответствуют стандартам ISO 14000 по системам и управления природопользованием и носят название ГОСТ ISO 14001—98, 14004—98 и 14050—99. Эти международные стандарты разработаны Техническим комитетом 207 (ТК 207) и утверждены Международной организацией по стандартизации (ISO) в январе 1993 г. [11].

В настоящее время стандарты серии 14000 носят не обязательный, а рекомендательный характер. Но предприятия в случае применения этих стандартов приобретают возможность международной сертификации собственных систем экоуправления, тем самым повышая инвестиционную привлекательность и облегчая процедуру экострахования.

¹Технический комитет.

С 1 июля 2003 г. на территории России вводятся следующие документы в области стандартизации:

- национальные стандарты;
- правила, нормы и рекомендации по стандартизации;
- применяемые в установленном порядке классификации, общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;
- стандарты организаций.

Принципы технического регулирования требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации будут осуществляться на основе общих и специальных технических регламентов (см. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 №184-ФЗ).

6.2. Нормирование загрязняющих веществ в биосфере

Нормирование качества окружающей природной среды определяется как деятельность уполномоченных государственных органов по установлению экологических нормативов (показателей предельно допустимых воздействий человека на окружающую природную среду) в соответствии с требованиями природоохранного законодательства. Так, согласно ст.1 Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.1999 № 96-ФЗ, *качество атмосферного воздуха* — совокупность его физических свойств, отражающих степень соответствия гигиеническим и экологическим нормативам. За *экологический норматив* (согласно п. 2.7 Приложения к приказу Минприроды России «Инструкция по экологическому обоснованию хозяйственной или иной деятельности» от 29.12.1995 № 539) принимается установленная величина использования природных ресурсов или техногенного воздействия на экосистемы и отдельные ее компоненты, при которой функционально структурные характеристики экосистем не выходят за пределы естественных изменений.

Нормативы качества окружающей природной среды подразделяются на три группы.

1. *Санитарно-гигиенические* — предельно допустимые концентрации вредных веществ (ПДК ВВ) и уровни (ПДУ) физических, биологических и других воздействий, определяющие численные показатели качества окружающей среды относительно *здоровья человека*.

2. *Производственно-хозяйственные* — нормативы выбросов, сбросов ВВ (ПДВ, ПДС, ВСВ, ВДК, ПДТ), технические (технологические), строительные и другие правила, содержащие экологические требования к *источнику вредного воздействия*, ограничивающие его негативное воздействие пороговой величиной.

3. *Комплексные* — нормативы, сочетающие признаки первой и второй групп. Предельно допустимая (критическая) нагрузка (ПДН)

является показателем воздействия одного или нескольких ВВ на окружающую природную среду: превышение ее может привести к вредному воздействию на природные ресурсы и человека.

Для предотвращения (снижения) отрицательных последствий воздействия загрязняющих веществ на атмосферу, литосферу и гидросферу необходимо знать их предельные уровни, при которых обеспечивается нормальная жизнедеятельность. Информация, характеризующая состояние природной среды, оценивается по специально разработанным критериям или нормативам. Основная величина экологического нормирования качества природной среды — ПДК ВВ в биосфере — воздухе, воде и почве. В общем случае ПДК — это такое содержание ВВ в окружающей среде, которое при постоянном контакте или воздействии за определенный промежуток времени практически не влияет на здоровье человека и не вызывает неблагоприятных последствий у его потомства. ПДК ВВ устанавливают на основе токсикометрических оценок, с отдельным нормированием уровней загрязнения, например, воздуха, в рабочих зонах и в населенных пунктах. Классификация ПДК [4] приведена на рис. 6.2.

Фактическое загрязнение атмосферы воздуха городов и населенных пунктов оценивают по пятибалльной шкале: I — *допустимое*; II — *умеренное*; III — *слабое*; IV — *сильное*; V — *очень сильное*.

Загрязнения I степени безопасны для населения. В нормативах Минздрава России приводятся сведения о классе опасностей вещества совместно с ПДК. В прил. 4 и 5 даны значения ПДК_{м,р}, ПДК_{с,с} и ПДК_{р,з}, наиболее часто встречающихся в промышленности ВВ [14].

При погрузочно-разгрузочных работах наиболее опасны кремнедержащие пыли. ПДК таких пылей устанавливают в зависимости от процентного содержания в них кремнезема. Требования к методикам измерения концентраций вредных веществ в воздухе рабочей зоны приведены в ГОСТ 17.2.4.02—84.



Рис. 6.2. Классификация предельно допустимых концентраций

Содержание ВВ в воздухе рабочей зоны не должно превышать установленных ПДК (ГН 2.1.6.695—98). ПДК ВВ в воздухе рабочей зоны — это концентрации, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч или другой продолжительности рабочего дня, но не более 41 ч в неделю, на протяжении всего рабочего стажа не могут вызвать заболеваний или отклонений в здоровье человека, обнаруживаемых современными методами исследований, в процессе работы или неблагоприятных последствий у его потомства.

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

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1. \quad (6.1)$$

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

На рис. 6.3 представлена схема нормирования примесей ВВ в воздухе с учетом их переноса и рассеивания в атмосфере, а также токсикологических принципов [4]. Учитывая, что экологическая ниша человека неизменна, где бы он ни находился, условием экологической безопасности для него будет выполнение условия $C_{\text{ВВ}} \leq \text{ПДК}$, где $C_{\text{ВВ}}$ — концентрация вредного вещества, $\text{мг}/\text{м}^3$.

Если в атмосферном воздухе одновременно содержатся несколько вредных веществ, обладающих однонаправленным действием, то должно выполняться условие (6.1). Выбросы в атмосферу воздуха, содержащего вредные вещества, предусматривают и обосно-

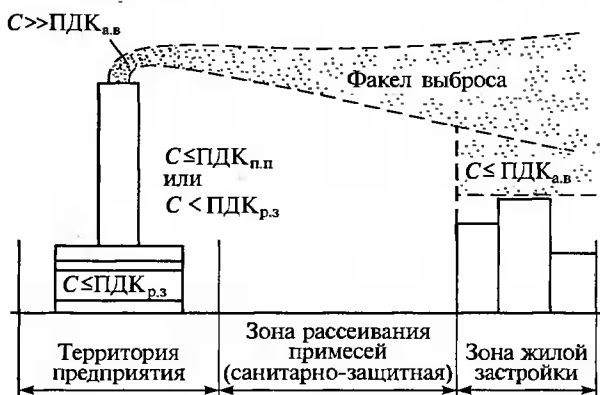


Рис. 6.3. Нормирование примесей вредных веществ

вызывают в расчетах так, чтобы концентрации их в приземном слое не превышали предельно допустимых. Содержание пыли в воздухе ($\text{мг}/\text{м}^3$), выбрасываемом в атмосферу системами вентиляции, объем которого более 15 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, не должно превышать $C_1 = 100K$, при объеме L выбрасываемого воздуха до (включительно) 15 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, $C_2 = (160 - 4L)K$.

Коэффициент K принимают в зависимости от ПДК пыли в воздухе:

| | | | | |
|-----------------------------------|----------|-----|-----|----------|
| ПДК, $\text{мг}/\text{м}^3$ | ≤ 2 | 2—4 | 4—6 | ≤ 6 |
| K | 0,3 | 0,6 | 0,8 | 1 |

Выбросы воздуха, удаляемого системами местных отсосов, с концентрациями пыли, не превышающими C_1 и C_2 , допускается (при обосновании) закладывать в проект, не предусматривая средств для очистки. Правила установления предельно допустимых выбросов (ПДВ) вредных веществ предприятиями приведены в ГОСТ 17.2.3.02—78.

ПДВ пыли или других ВВ в атмосферу устанавливают для каждого источника. При этом должно быть соблюдено условие, что выбросы ВВ от данного источника (а при наличии других источников — от их совокупности) не создадут приземную концентрацию C , превышающую предельно допустимую ПДК, т.е.

$$C/\text{ПДК} \leq 1. \quad (6.2)$$

Если это условие по объективным причинам не может быть выполнено, вводят поэтапное снижение выбросов ВВ, согласовывая на каждом этапе выброс ВВ с местным органом Государственной инспекции по контролю за работой газоочистных и пылеулавливающих установок и другими уполномоченными организациями и учреждениями.

Наряду с ПДК существуют временно допустимые концентрации (ВДК), иначе называемые ориентировочными безопасными уровнями воздействия — ОБУВ (ГН 2.1.6.696—98).

ПДК в основном устанавливают экспериментально. Для ускоренного определения ПДК новых веществ используют расчетные методы. Установленные расчетным путем нормативы должны рассматриваться в качестве ВДК (ОБУВ).

Для максимального снижения выбросов вредных веществ должны использоваться наиболее совершенная технология и методы очистки. *Рассеивание вредных выбросов в атмосфере при увеличении высоты выброса может быть применено только после реализации всех современных технических средств, снижающих абсолютное количество выбросов и сокращающих концентрацию вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу.* Для неорганизованных выбросов и групп мелких одиночных источников, например, вентиляционных, устанавливают суммарный предельный выброс.

При установлении ПДВ для источника загрязнения атмосферы учитывают фоновые концентрации ВВ в воздухе $C_{\text{ф}}$, определяемые расчетом и экспериментально. Под фоновой концентрацией для отдельного источника загрязнения атмосферы понимают ее загрязнение, связанное с другими источниками, исключая рассматриваемый. В этом случае в соотношении (6.2) вместо C принимают $C + C_{\text{ф}}$.

При неблагоприятных метеоусловиях в кратковременные периоды загрязнения атмосферы, опасного для здоровья населения, необходимо снизить выбросы ВВ, вплоть до полного прекращения работ, вызывающих загрязнение. Устанавливает ПДВ для каждого предприятия головная организация по рассмотрении планов мероприятий, направленных на снижение загрязнения атмосферы и проведении окончательных расчетов загрязнения атмосферы от всех объектов. Она же разрабатывает комплексный план мероприятий снижения загрязнения атмосферы (том ПДВ). Эффективность поэтапного уменьшения выбросов ВВ оценивают по степени фактического снижения загрязнения атмосферы, определяемого в соответствии с нормативными документами. В этом случае фактический выброс, превышающий ПДВ, называется *временно согласованным* (ВСВ). На каждом этапе устанавливают ВСВ на уровне предприятий — аналогов с современной технологией, рассчитывая категорию опасности предприятий (КОП) для биосферы:

$$\text{КОП} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i}{\text{ПДК}_i} \right)^{\alpha_i}, \quad (6.3)$$

где n — количество загрязняющих веществ, выбрасываемых предприятием; M_i — масса выброса i -го вещества, мг/м³; α_i — безразмерный коэффициент, позволяющий привести степень вредности i -го вещества к вредности диоксида серы. Для вещества первого класса опасности $\alpha_i = 1,7$; второго — 1,3; третьего — 1,0; четвертого — 0,9.

Значения КОП рассчитывают при $M_i/\text{ПДК}_i > 1$. Если $M_i/\text{ПДК}_i < 1$, КОП приравнивают к нулю. При отсутствии среднесуточных значений ПДК для расчета КОП могут использоваться значения максимальных разовых ПДК или ОБУВ, либо уменьшенные в 10 раз значения ПДК воздуха рабочей зоны.

По величине КОП предприятия подразделяются на четыре категории опасности:

| | | | | |
|---------------------------|----------|---------------|---------------|----------|
| Категория опасности | 1-я | 2-я | 3-я | 4-я |
| КОП | $> 10^6$ | $10^4 - 10^6$ | $10^3 - 10^4$ | $< 10^3$ |

Предприятия первой и второй категории представляют наибольшую опасность для биосферы. В этом случае тома ПДВ разрабатываются по полной программе. Предприятия третьей катего-

рии самые многочисленны. Для них тома ПДВ разрабатывают по сокращенной программе. Для предприятий четвертой категории опасности нормативы ПДВ устанавливают на уровне фактических выбросов, а тома ПДВ могут не составляться.

Для обеспечения экологической безопасности населения, проживающего вблизи экологически опасных предприятий, создаются санитарно-защитные зоны (СЗЗ), отделяющие жилые кварталы от предприятий (см. рис. 6.3.).

Каждое предприятие, образующее источники загрязнения среды, должно иметь СЗЗ, размеры которой с 2003 г. регламентируются СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. С этой целью все предприятия сгруппированы по отраслям в зависимости от выделяемых загрязнений. Имеется несколько таких групп, в каждой из которой выделяют пять классов предприятий по степени их экологической опасности. В зависимости от класса определяют *нормативный* размер СЗЗ, который устанавливают с учетом мощности, условий осуществления технологического процесса, характера и количества выделяемых в окружающую среду ВВ и других факторов в соответствии с санитарной классификацией предприятий. Размеры СЗЗ, м: 1000 — I класс, 500 — II класс; 300 — III класс; 150 — IV класс; 50 — V класс. Например, к I классу относят предприятия химического комплекса, имеющие аммиак (ж.), сернистый ангидрид (ж.), диоксид азота, синильную кислоту, метилакрилат, нитрил акриловой кислоты, сероуглерод, триметиламин, фосген, хлор (ж.), азотную кислоту, азотные удобрения и др. В целлюлозно-бумажном комплексе цехи варки целлюлозы также относят к I классу, а производящие бумагу и картон из привозных полуфабрикатов — к IV. Класс V составляют производства полиграфических красок, неорганических реактивов (при отсутствии хлорного ингредиента), а также производства пластмасс и синтетических смол.

Расчетный размер СЗЗ, согласно решению Главного санитарного врача Российской Федерации и его заместителя, может быть определен (и соответственно изменен в сравнении с нормативным) по формуле

$$S = \sum_{j=n}^R \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} N_1 + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} N_2 + \dots + \frac{C_k}{\text{ПДК}_k} N_k \right] + \frac{C_\phi}{\text{ПДК}}, \quad (6.4)$$

где R — число румбов для расчета показателя; j — номер румба; n — количество расчетных точек; i — одно из расчетных направлений от источника загрязнения (румб); C_1, C_2, \dots, C_k — расчетные приземные концентрации загрязняющих веществ характеризуемого производства; $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_k$ — ПДК данных веществ; $C_\phi/\text{ПДК}$ — показатель фоновых концентраций; N_1, N_2, \dots, N_k — переводные коэффициенты, зависящие от класса опасности вещества.

Таким образом, мероприятия по защите атмосферного воздуха должны рассматриваться на предприятиях как составная часть общего плана по охране окружающей среды и включать две стадии: определение необходимости мероприятий по сокращению выбросов и снижению уровня загрязнения воздуха, уточнение содержания этих мероприятий с целью обеспечения требований государственных стандартов.

Мероприятия по снижению уровня загрязнения воздуха нужно осуществлять, если в результате расчетов (для n источников) выполняются условия:

для атмосферного воздуха населенных пунктов

$$\text{ПДК} \leq \sum_{i=1}^n C_i + C_{\phi}; \quad (6.5)$$

для воздуха промышленных площадок

$$0,3\text{ПДК}_{\text{рз}} \leq \sum_{i=1}^n C_i + C_{\phi}. \quad (6.6)$$

После установления необходимости снижения уровня загрязнения воздуха должно быть разработано конкретное содержание мероприятий, реализацию которых начинают с определения требуемой степени очистки выбросов, %, по каждому источнику

$$\eta = 100 M/\text{ПДВ}, \quad (6.7)$$

где M — фактическое количество вредного вещества, выбрасываемого из источника.

В нашей стране разработан нормативный документ, который устанавливает методику расчета концентраций в атмосферном воздухе ВВ, содержащихся в выбросах предприятий [5]. Нормы приземных концентраций в 2-метровом слое над землей, а также вертикального распределения концентраций должны соблюдаться при проектировании предприятий, а также при нормировании выбросов в атмосферу от реконструируемых и действующих предприятий.

Максимальная приземная концентрация вредного вещества, $\text{мг}/\text{м}^3$, при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии x_m , м, от источника

$$C_m = AMFmm\eta / (H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta t}), \quad (6.8)$$

где A — коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; M — масса ВВ, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с; F — безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ВВ в атмосферном воздухе; m и n —

коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; η — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности ($j = 1$ для ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м/км); H — высота источника выброса (для наземных источников при расчетах принимают $H = 2$ м), м; Δt — разность между температурой выбрасываемой газовой смеси t_t и температурой окружающего атмосферного воздуха t_a , °C; V_1 — расход газовой смеси, м³/с, определяемый по формуле

$$V_1 = (\pi D^2/4)\omega_0, \quad (6.9)$$

где D — диаметр устья источника выброса м; ω_0 — средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с.

Минимальная высота одиночного источника выброса (трубы), м,

$$H = \left[\frac{AMFD\eta}{8V_1(\text{ПДК} - C_\phi)} \right]^{3/4}. \quad (6.10)$$

Предельно допустимый выброс нагретых газов, г/с, из одиночного источника с круглым устьем при $C_\phi < \text{ПДК}$

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДК} - C_\phi)H^2}{AFm\eta} \sqrt[3]{V_1\Delta t}, \quad (6.11)$$

в случае $\Delta t \approx 0$ (холодные газы)

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДВ} - C_\phi)H^{4/3}}{AFm\eta} \cdot \frac{8V_1}{D}, \quad (6.12)$$

согласно ГОСТ 17.2.3.02—78 и методике [5].

Рассмотрим кратко нормирование загрязняющих веществ в *водных объектах (гидросфере)*. Степень предельно допустимого загрязнения воды в водном объекте, зависящая от его физических особенностей и способности к нейтрализации примесей, рассматривают как ПДН или предельно допустимый сброс (ПДС), кг/сут. В общем случае допустимую нагрузку на водоем при его загрязнении определяют «Правила охраны поверхностных вод. Типовые положения, 1991 г.»:

$$C_{\text{доп}} = C_{\text{норм}} - C_{\text{факт}}. \quad (6.13)$$

$\text{ПДК}_в$, ВВ, мг/л, в водном объекте — такая концентрация, при превышении которой вода становится непригодной для одного или нескольких видов (категорий) водопользования: для нужд населения, предприятий пищевой промышленности и др. В стране нет единых *общегосударственных норм* качества воды. Поэтому условно чистые промышленные стоки, прошедшие *основную и дополнительную ступени очистки*, соответствуют требованиям по

ПДК, но их ингредиентный состав во много раз превышает естественные концентрации в свежей водной среде. Поэтому любой сброс очищенных сточных вод вызывает развитие микроскопических водорослей (цветение воды), разложение отмерших организмов с поглощением кислорода, лишает воду способности к самоочищению.

По данным Госкомстата за 1999 г., общее количество загрязненных сточных вод в России составило 20,7 млрд м³/год. Через очистные сооружения прошло лишь 80 % общего количества сбросов.

Рассмотрим кратко нормирование загрязняющих веществ в литосфере, иначе — в почве (на свалках, полигонах и т. п.). ПДК_п — предельно допустимая концентрация химического вещества в пахотном слое почвы, мг/кг, которая не должна вызывать прямого или косвенного отрицательного влияния на соприкасающуюся с почвой среду и здоровье человека, а также на самоочищающую способность почвы.

В случае отсутствия данных ПДК_п оценивают, сопоставляя содержания химических веществ в загрязненных (исследуемых) и контрольных образцах почвы.

Почвенный покров, в отличие от воды и атмосферы, способен длительно аккумулировать ВВ. Условие безопасности

$$\text{ПДВ}_\tau \rightarrow \text{ПДК}_\text{п}, \quad (6.14)$$

где τ — длительность (г., мес) работы предприятия, образующего твердые отходы, в течение которого в почве прилегающих территорий (или специальных полигонов) количество ВВ достигает ПДК.

Загрязнение почв тяжелыми металлами — наиболее актуальная проблема, требующая решения для сохранения литосферы. Установлены ориентировочно допустимые количества (ОДК) содержания приоритетных тяжелых металлов в почвах, которые используют вместо ПДК (табл. 6.4).

При определении допустимого поступления твердого отхода в почву особое внимание необходимо уделять соединениям, которые могут испаряться в атмосферу, впитываться грунтовыми или поверхностными водами или накапливаться в живых организмах и растениях.

По загрязняющим веществам в почве нормируются [12]:
накопления токсичных веществ на территориях промышленных и коммунальных предприятий;

содержания загрязняющих веществ в почвах сельскохозяйственных угодий;

загрязнения почвы в жилых районах.

Например, при нормировании накопления токсичных отходов на территории предприятия учитывают: размеры территории складирования, химическую активность и токсичность отходов, почвенные, климатические условия.

ОДК тяжелых металлов в почве*

| <i>Me</i> | ОДК, мг/кг | Содержание | <i>Me</i> | ОДК, мг/кг | Содержание |
|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------------------------|
| As | 2,0 | Валовое | Mn + V | 1000 + 100 | Валовое |
| Hd | 2,1 | | Sb | 4,5 | |
| Pb | 32,0 | | Cu | 3,0 | В форме подвижных соединений |
| Pb + Hd | 20,1 + 1,0 | | Ni | 4,0 | |
| Cr (IV) | 0,05 | | Zn | 2,3 | |
| Mn | 1500 | | Co | 5,0 | |
| V | 150 | | Cr | 6,0 | |

* Утверждены приказами органов здравоохранения № 1968—79; 25546—82; 3210—85 и 4433—87.

Временным накоплением отходов на промплощадке называется хранение отходов на территории предприятия в специально обустроенных местах до их использования в последующем технологическом цикле или направления на переработку на другое предприятие или на объект размещения отходов. Предельное количество единовременного накопления отходов, сроки и способы хранения утверждаются территориальными органами.

Предельное количество отходов на территории предприятия определяется из условия, что возможное выделение вредных веществ в воздух не превысит 30 % ПДК в воздухе рабочей зоны (РЗ). При расчетах учитывается суммарный эффект, т. е. если

$$C_1/0,3\text{ПДК}_{\text{РЗ}} + C_2/0,3\text{ПДК}_{\text{РЗ}} + \dots \geq 1, \quad (6.15)$$

то находящиеся на территории отходы подлежат удалению.

Предельное содержание токсичных соединений в отходах определяет класс их опасности. Класс токсичности отходов при известных ПДК химического вещества в почве, согласно временно-му классификатору [13], определяют следующим образом.

Находят индекс токсичности

$$K_i = \text{ПДК}_i / (S + C_v)_i, \quad (6.16)$$

где ПДК_i — предельно допустимая концентрация токсичного химического вещества, содержащегося в отходе (в почве); S — безразмерный коэффициент, отражающий растворимость вещества в воде; C_v — содержание вещества в общей массе отходов, т/т, i — порядковый номер компонента.

Рассчитав K_i для отдельных компонентов отхода, выбирают один — три ведущих компонента, для которых индексы минимальны и выполняются условия $K_1 < K_2 < K_3 \leq 2K_i$.

Затем определяют суммарный индекс токсичности

$$K_{\Sigma} = \left(n^2 \sum_{i=1}^{i=n} K_i \right)^{-1}, \quad (6.17)$$

где n — выбранное (1...3) число компонентов. По табл. 6.5 находят класс токсичности.

При отсутствии значений ПДК в почве формула для расчета индекса токсичности имеет вид

$$K_i = [\lg(\text{ЛД}_{50})] / (S + 0,1F + C_b)_i, \quad (6.18)$$

где ЛД_{50} — средняя летальная доза компонента — количество вещества, попадание которого в организм приводит к гибели 50% биоты (живых организмов); F — коэффициент летучести данного компонента.

Расчет продолжают по формуле (6.17). Определив суммарный индекс токсичности K_{Σ} , по табл. 6.6 находят класс опасности отхода.

Таблица 6.5

Классификация опасности химических веществ на основе их ПДК в почве

| $K_{\text{расч}}$ | Класс токсичности | Опасность |
|-------------------|-------------------|--------------|
| < 2 | Первый | Чрезвычайная |
| 2—16 | Второй | Высокая |
| 16,1—30 | Третий | Умеренная |
| > 30 | Четвертый | Малая |

Таблица 6.6

Классификация опасности химических веществ по ЛД_{50}

| K_{Σ} | Класс токсичности | Опасность |
|--------------|-------------------|--------------|
| < 1,3 | Первый | Чрезвычайная |
| 1,3—3,3 | Второй | Высокая |
| 3,4—10 | Третий | Умеренная |
| > 10 | Четвертый | Малая |

При отсутствии значений ПДК в почве и ЛД₅₀ для некоторых компонентов отходов, но при наличии величин классов опасности веществ в воздухе рабочей зоны в (6.18) подставляют условные величины ЛД₅₀, ориентировочно определяемые по классу опасности для воздуха рабочей зоны:

| | | | | |
|---|-----|-----|------|--------|
| Класс опасности | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й |
| Эквивалент ЛД ₅₀ , мг/кг | 15 | 150 | 5000 | > 5000 |

ПДК некоторых других загрязняющих веществ (химических соединений) приведены в [3, 6, 7, 9] и прил. 1—3 [8, 14].

6.3. Экологический паспорт предприятия

Экологический паспорт (ЭП) предприятия (ГОСТ 17.0.0.04—90) является документом, в котором должны быть отражены:

- применяемые предприятием технологии;
- количественные и качественные характеристики используемых материальных и энергетических ресурсов (сырье, топливо и др.);
- показатели выпускаемой продукции;
- количественные и качественные характеристики газовых выбросов, жидких сбросов (стоков) и твердых отходов;
- результаты сравнения технологий предприятия с лучшими отечественными и зарубежными аналогами.

Информация, содержащаяся в ЭП, предназначена для решения следующих природоохранных задач:

- оценка влияния технологий и выпускаемой продукции на биосферу, здоровье человека и определение размера платы за природопользование, за загрязнение среды;
- установление предприятию предельно допустимых норм выбросов (сбросов) загрязняющих веществ в биосферу;
- планирование предприятием природоохранных мероприятий и оценка их эффективности;
- экспертиза проектов реконструкции предприятия;
- контроль соблюдения предприятием законодательства по охране природной среды;
- повышение эффективности использования сырьевых, материальных и энергетических ресурсов и вторичная переработка отходов.

Экологический паспорт составляется:

- службами предприятия (иногда с помощью отраслевых институтов или других профильных организаций) и утверждается его руководством. Паспорт для проектируемых, реконструируемых и расширяющихся предприятий заполняется на стадии разработки соответствующего проекта;

на основе согласованных и утвержденных основных показателей производства, разрешения на природопользование, пас-

портов газо- и водоочистного оборудования, данных государственной статистической отчетности, инвентаризации источников загрязнения, проектов и других нормативно-технических документов.

Структура ЭП [3, 15]

1. Общие сведения о предприятии.
2. Краткая природно-климатическая характеристика района расположения предприятия.
3. Цеха и производственные объекты.
4. Использование земельных ресурсов.
5. Расход сырья и вспомогательных материальных ресурсов по видам продукции.
6. Расход энергоресурсов по видам продукции.
7. Характеристика выбросов в атмосферу.
8. Характеристика водопотребления, водоотведения и очистки сточных вод на предприятии.
9. Характеристика отходов, образующихся на предприятии.
10. Характеристика полигонов и накопителей для захоронения (складирования) отходов.
11. Рекультивация нарушенных земель и снятие нарушенного слоя почв.
12. Транспорт предприятия.
13. Плата за выбросы, сбросы, размещение отходов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Список литературы

1. *Протасов В. Ф., Молчанов А. В.* Словарь экологических терминов и понятий. — М.: Финансы и статистика, 1997. — 160 с.
2. *Мазур И. И., Шишов В. Н.* Основы охраны окружающей среды при строительстве нефтегазовых объектов. — М.: Недра, 1992. — 150 с.
3. *Калыгин В. Г.* Промышленная экология: Курс лекций. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. — 240 с.
4. *Стадницкий Г. В., Родионов А. И.* Экология. — СПб.: Химия, 1996. — 240 с.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 94 с.
6. *Чехов О. С., Назаров В. И., Калыгин В. Г.* Вопросы экологии в стекольном производстве. — М.: Легпромбытиздат, 1990. — 144 с.
7. *Калыгин В. Г., Попов Ю. П.* Порошковые технологии: экологическая безопасность и ресурсосбережение. — М.: Изд-во МГАХМ, 1996. — 212 с.
8. *Протасов В. Ф., Молчанов А. В.* Экология, здоровье и природопользование в России. — М.: Финансы и статистика, 1995. — 528 с.
9. *Челноков А. А., Ющенко Л. Ф.* Основы промышленной экологии. — Минск: Высш. шк., 2001. — 343 с.

10. Пашков Е. В., Фомин Г. С., Красный Д. В. Международные стандарты ISO 14000. Основы экологического управления. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. — 112 с.

11. Инженерная экология и экологический менеджмент / М. В. Буторина, П. В. Воробьев, А. П. Дмитриева и др. — М.: Логос, 2002. — 528 с.

12. Назаров В. И., Николайкина Н. Е. Инженерная защита литосферы. Переработка твердых отходов. — М.: Изд-во МГУИЭ, 1997. — 148 с.

13. Временный классификатор токсичных промышленных отходов и методические рекомендации по определению класса токсичности промышленных отходов // Экологический вестник Москвы. — 1995. — № 1—3. — С. 49—71.

14. Конаков С. П. Экология промышленности будущего. — М.: Изд-во РЭФИА, 1998. — 158 с.

15. Методические рекомендации по заполнению и ведению экологического паспорта промышленного предприятия (ГОСТ 17.0.0.04—90). — М.: Госкомприроды СССР, 1990. — 28 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте понятие «экостандартизация» и «экологическое нормирование».

2. Какими нормативными правовыми документами регламентируется природоохранная деятельность на промышленных предприятиях?

3. Как обозначаются государственные стандарты? Приведите примеры.

4. Назовите формы и уровни других экологических нормативов и стадии их формирования. Какова структура экологического предприятия?

5. Каково назначение международных стандартов и их место в российской системе экологического менеджмента?

6. Перечислите нормативы качества окружающей природной среды и проанализируйте шкалу фактического загрязнения атмосферы воздуха городов и населенных пунктов, используя понятие «санитарно-защитная зона» (СЗЗ). Назовите размеры таких зон.

7. Как можно оценить «условие безопасности» для атмосферы, гидросферы и литосферы?

ГЛАВА 7

ИСТОЧНИКИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ БИОСФЕРЫ

Современные объемы производства и его интенсификация, несмотря на усовершенствование технологии и техники очистки выбросов (отходов), повлекли увеличение общей массы ВВ, вносимых в атмосферу. Возросла энерговооруженность производства и, соответственно, количество сжигаемого топлива и образующихся дымовых газов: считают, что выработка электроэнергии и объем промышленного производства удваиваются каждые 7—10 лет.

В атмосферу выбрасывается ежегодно примерно 200 млн т CO, 150 млн т SO₂, 50 млн т оксидов азота (в основном NO₂), более 50 млн т углеводородов и до 20 млрд т CO₂ [1]. За последние десятилетия потребление минеральных и органических сырьевых ресурсов резко возросло: в 1913 г. на одного жителя Земли ежегодно расходовалось 5 т минерального сырья, в 1940 г. — 7,4, в 1960 г. — 14,3, а в 2000 г. потребление может достичь 40—50 т [2]. Соответственно возрастают и объемы отходов промышленного и коммунально-бытового происхождения (табл. 7.1).

По другим данным годовое количество загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу в целом по земному шару, оценивают в 120 млн т, объем сбросов в поверхностные воды — в 350 км³.

Таблица 7.1

Структура и объем отходов производства в мире в 1970—2000 гг.
(по Н. Торочешникову)

| Категория отходов | Отходы, млн т, производства (эксплуатации) | | | | Всего, млн т |
|--|--|------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------|
| | «классической» энергии | секторов | | | |
| | | промышленного | сельскохозяйственного | коммунально-бытового | |
| Основные газообразные вещества атмосферы | $\frac{17\ 326}{43\ 980}$ | $\frac{47}{226}$ | $\frac{1460}{3780}$ | $\frac{873}{2773}$ | $\frac{19\ 706}{50\ 459}$ |
| Выброс твердых частиц в атмосферу | $\frac{133}{284}$ | $\frac{91}{382}$ | $\frac{14}{42}$ | $\frac{3}{13}$ | $\frac{241}{721}$ |
| Твердые отходы | — | $\frac{4000}{12\ 000}$ | — | $\frac{1000}{3000}$ | $\frac{5000}{15\ 000}$ |
| Углеводороды | $\frac{42}{140}$ | $\frac{14}{57}$ | $\frac{9}{27}$ | $\frac{4}{20}$ | $\frac{69}{244}$ |
| Органические отходы | — | — | $\frac{4500}{13\ 000}$ | $\frac{30}{50}$ | $\frac{4530}{13\ 050}^*$ |
| Фекальные отходы | — | — | $\frac{9400}{24\ 000}$ | $\frac{180}{320}$ | $\frac{9680}{24\ 320}$ |
| Итого | $\frac{17\ 501}{44\ 404}$ | $\frac{4152}{12\ 665}$ | $\frac{15\ 383}{40\ 849}$ | $\frac{2090}{6176}$ | $\frac{39\ 126}{104\ 094}$ |

количество накапливающихся и складироваемых твердых отходов — в 90 млрд т (Ф. Ф. Брюхань, 2002).

Анализ данных о состоянии окружающей природной среды Российской Федерации показывает, что суммарное количество выбросов в атмосферу от промышленных источников в 1991 г. составило около 32 млн т вредных веществ. Из них около 9,2 млн т падает на диоксид серы, около 3 млн т — на оксиды азота, около 7,6 млн т — на оксид углерода, около 3,5 млн т — на углеводороды, около 1,7 млн т — на летучие органические соединения, около 6,4 млн т — на твердые вещества. В выбросах содержатся специфические ВВ с достаточно высокой токсичностью: сероуглерод, фтористые соединения, бенз(а)пирен, сероводород и др. Их количество не превышает 2 % от общей массы выбросов.

Результаты анализа (1997) выбросов наиболее распространенных в России вредных веществ от стационарных промышленных источников загрязнения атмосферного воздуха свелись к следующим показателям, млн т: диоксид серы — 5,71; оксиды углерода — 3,78; твердые вещества — 2,58; оксиды азота — 1,56; углеводороды (без летучих) — 1,10; летучие органические соединения — 0,90. Степень улавливания и обезвреживания выбросов в среднем 80,2 % [14]. В прил. 4 показана динамика природоохранных мероприятий в целом по стране [15].

Общее количество взвешенных частиц, поступающих в атмосферу в результате многообразной деятельности человека (по данным экспертов Европейской экономической комиссии), становится соизмеримым с количеством загрязнений естественного происхождения. Наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в стране за период 1988—1996 гг. свидетельствуют о снижении средних концентраций взвешенных веществ, растворимых сульфатов, аммиака, сажи, сероводорода вследствие спада производства и закрытия ряда предприятий [2].

Загрязнение биосферы — результат выбросов загрязняющих веществ или энергии некоторых видов (например, электромагнитной) из разных источников. Загрязнители (контаминанты) могут иметь *естественное (природное)* и *искусственное (антропогенное)* происхождение. По физическому состоянию, например, загрязнители атмосферы делят на твердые (пыли, дымы), жидкие (туманы), газообразные (газы, пары) и комбинированные. От общей массы выбрасываемых в атмосферу веществ газы (пары) составляют около 90 %. По оценке ВОЗ (см. гл. 1), из более чем 6 млн известных химических соединений практически используют до 500 тыс. соединений. Из них около 40 тыс. обладают *вредными* для человека свойствами, а 12 тыс. *токсичны*. Причем любой химический загрязнитель атмосферы имеет порог *действия*.

К естественным источникам загрязнений относятся пыльные бури, вулканические извержения, газовые выделения из гейзеров

и геотермальных источников, прижизненные выделения в атмосферу растений, животных, микроорганизмов и т.д. Источники искусственного загрязнения — промышленные предприятия, коммунальное хозяйство, утечки из хранилищ, трубопроводов и т.д.

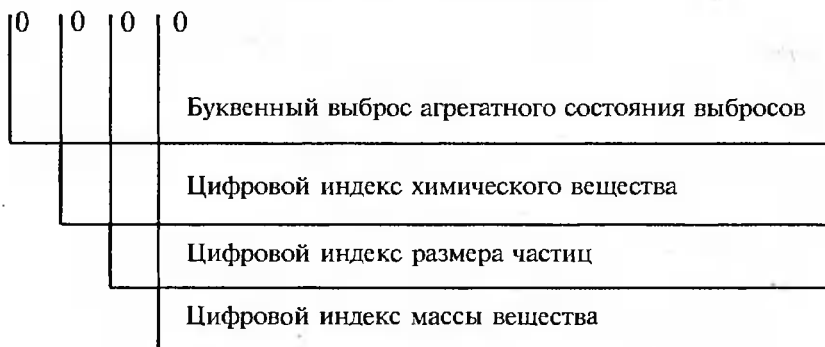
Атмосферные загрязнители подразделяют на первичные, поступающие непосредственно в атмосферу, и вторичные, являющиеся результатом их превращений. Например, поступающий в атмосферу диоксид серы окисляется кислородом воздуха до триоксида серы, который затем, взаимодействуя с водяными парами, образует капельки серной кислоты. При оценке загрязнения атмосферы учитывают период пребывания в ней загрязняющих веществ. В атмосферу одновременно могут поступать вещества, оказывающие на живые организмы сходное воздействие.

Все ВВ в соответствии с ГОСТ 12.1.0.07—76 по степени воздействия на организм человека подразделяют на четыре класса опасности: 1-й — чрезвычайно опасные, ПДК < 0,1 мг/м³; 2-й — высокоопасные, ПДК = 0,1... 1,0 мг/м³; 3-й — умеренно опасные, ПДК = 1,1... 10 мг/м³; 4-й — малоопасные, ПДК > 10 мг/м³ [3].

Выбросы в атмосферу от источников загрязнений согласно ГОСТ 17.2.1.01—76 характеризуются по четырем признакам:

- а) агрегатному состоянию (газообразные, жидкие, твердые);
- б) химическому составу;
- в) размеру частиц;
- г) массе вещества.

Структура построения условного обозначения:



Примеры условных обозначений.

1. Твердый выброс стекловаренных печей для варки свинцового хрусталя (размер частиц менее 5 мкм, масса вещества менее 1 кг/ч): Т.22.2.1.

2. Выброс стекловаренных печей, состоящих из оксида азота (масса вещества 3 кг/ч) и пыли (размер частиц 5 мкм, масса вещества 11 кг/ч): А.03.02; Т.25.3.3.

В соответствии с ISO 4226 для оценки количества твердых, жидких и газообразных загрязнений в атмосфере в качестве критерия выброса применяют их массовую концентрацию в воздухе, мг/м³.

Иногда используют соотношения объемных единиц, имеющие преимущества безразмерных параметров (% , ppm или 10⁻⁶ млн⁻¹, ppb или 10⁻⁹ млрд⁻¹), хотя они и не соответствуют рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и ISO 4226.

Примеры пересчета:

для газов 1 ppm = 1 см³/м³;

твердых веществ 1 ppm = 1 мг/кг.

Для идеального газа при 298К (25 °С) и 101,325 кПа (или 760 мм рт. ст.)

$$1 \text{ ppm} = 1 \frac{\text{см}^3}{\text{м}^3} = \frac{\text{Молекулярная масса, мг}}{\text{Молекулярный объем, м}^3} =$$

$$= \frac{1}{22,4 \text{ л}} M \cdot 10^3 \text{ мг} / 10^6 \frac{298 \text{ К}}{273 \text{ К}} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{л}.$$

Для реальных газов (вместо нормального объема идеального газа использован молекулярный объем реального газа [13]):

$$1 \text{ ppm}_{\text{SO}_2} = 64,06/21,89 = 2,93 \text{ мг/м}^3;$$

$$1 \text{ ppm}_{\text{NO}_2} = 46,01/22,41 = 2,05 \text{ мг/м}^3;$$

$$1 \text{ ppm}_{\text{NO}} = 30,01/21,41 = 1,34 \text{ мг/м}^3;$$

$$1 \text{ ppm}_{\text{CO}} = 28,01/22,40 = 1,25 \text{ мг/м}^3;$$

$$1 \text{ ppm}_{\text{CO}_2} = 70,91/22,02 = 3,22 \text{ мг/м}^3.$$

Основным элементом загрязнения атмосферы являются *аэрозольные образования*. *Аэрозоли* — дисперсные системы, в которых дисперсионная среда — газ, а дисперсные фазы — твердые или жидкие частицы. Аэрозоли делят на три группы: к *первой* относятся пыли — коллективы, состоящие из твердых частиц, диспергированных в газообразной среде; ко *второй* — дымы — все аэрозоли, образующиеся при конденсации газа; к *третьей* — туманы — скопления жидких частиц в газообразной среде (см. подразд. 4.2).

Сейчас в земной атмосфере взвешено около 20 млн т частиц, из которых примерно 15 млн т приходится на долю выбросов промышленных предприятий.

Из многочисленных контаминантов атмосферы (по определению комитета экспертов ВОЗ) основными являются взвешенные частицы — аэрозоли разных составов, затем следуют сернистые соединения и оксиданты, т.е. вещества, образующиеся в атмосферном воздухе в результате фотохимических превращений.

Пыли и другие взвешенные частицы загрязняют атмосферу не только в результате прямых выбросов, но в большей мере в результате превращений выбрасываемых в атмосферу газообразных веществ (сернистых соединений, оксидов азота, углеводородов) с образованием мелкодисперсных аэрозолей.

Источники загрязнения атмосферы выбросами *могут быть классифицированы.*

1. *По назначению:* а) технологические, содержащие хвостовые газы после установок улавливания (рекуперации, абсорбции и т. д.); б) вентиляционные выбросы — местные отсосы, вытяжки.

2. *По месту расположения:* а) незатененные или высокие (высокие трубы, точечные источники, удаляющие загрязнения на высоту, превышающую высоту здания в $\geq 2,5$ раз); б) затененные или низкие, — на высоте, в 2,5 раза меньшей высоты здания; в) наземные — у земной поверхности (открытое технологическое оборудование, проливы, колодцы производственной канализации и т. д.).

3. *По геометрической форме:* а) точечные (трубы, шахты, вентиляторы); б) линейные (аэрационные фонари, открытые окна, факелы).

4. *По режиму работы:* непрерывного и периодического действия, залповые и мгновенные.

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

5. *По дальности распространения:* внутриплощадочные, т. е. создающие высокие концентрации только на территории промышленной площадки, а в жилых районах не дающие ощутимых загрязнений (для таких выбросов предусматривается СЗЗ); внеплощадочные, когда выбрасываемые загрязнения способны создать высокие концентрации (порядка ПДК для воздуха населенных пунктов) на территории жилой застройки.

Газовые промышленные выбросы могут быть *организованными* и *неорганизованными.*

Организованный промышленный выброс — поступающий в атмосферу через специальные сооружения — газоходы, воздухопроводы, трубы, а *неорганизованный* — выброс в атмосферу в результате нарушения герметичности оборудования, неудовлетворительной работы вентиляционной системы, местных отсосов.

Сточные воды, содержащие растворенные и взвешенные вещества, отводящиеся (отходящие) в *гидро- или литосферу*, рассматривают как сбросы. Сбросы разделяют на *неорганизованные*, если они стекают в водный объект непосредственно с территории промышленного предприятия, не оборудованного специальной, например ливневой, канализацией или иными устройствами для сбос-

ра, а также на *организованные*, если они отводятся через специально сооруженные источники — водовыпуски, классифицируемые по типу водоема или водотока, месту расположения, конструкции распределительной части, оголовка или сбросного устройства [4].

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

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

По степени загрязнения и происхождению сточные воды можно разделить:

на загрязненные, представляющие смесь отработанных жидкостей после технологических процессов, а также после мытья оборудования и полов (75—80 %);

условно-чистые — от охлаждения оборудования, компрессорных и холодильных установок, вентиляционных устройств и т. д. (6—18 %);

хозяйственно-санитарные (5—6 %);

ливневые (2—3 %).

Твердые отходы представляют гетерогенную смесь сложного морфологического состава: черные и цветные металлы, макулатуросодержащие и текстильные компоненты, отходы стекла, пластмассы, кожи, резины, дерева, камней, а также остатки непрореагировавшего твердого сырья, смолы, кубовые остатки от перегонки, осадки и шламы, отработанные катализаторы, фильтровальные материалы, не подлежащие регенерации адсорбенты, общезаводской мусор и др. На удаление таких отходов производства затрачивается в среднем 8—10 % стоимости производимой продукции. Для складирования твердых отходов московских предприятий ежегодно в Московской области выделяется 20 га земли. Транспортирование и складирование отходов ежегодно поглощает миллиарды рублей.

Условно предприятия можно разделить на *три группы*, учитывая их потенциальные возможности загрязнения биосферы. К *первой* относятся предприятия с преобладанием химических технологических процессов; ко *второй* — предприятия с преобладани-

ем механических (машиностроительных) технологических процессов; к *третьей* — предприятия, на которых осуществляется как добыча, так и химическая переработка сырья.

Например, *предприятия химической промышленности (1-я группа)* отличаются разнообразием токсичных газовых выбросов и жидких стоков. Главные из них — органические растворители, амины, альдегиды, хлор и его производные, оксиды азота, циановодород, фториды, сернистые соединения (диоксид серы, сероводород, сероуглерод), металлоорганические соединения, соединения фосфора, мышьяка, ртуть. Перечень некоторых опасных для окружающей среды отходов предприятий 1-й группы представлен в табл. 7.2 [2, 5].

К числу отходов химической промышленности и производства минеральных удобрений относятся гипсосодержащие отходы (фосфогипс и др.), фосфорные шлаки, пиритные огарки, галитовые отходы и глинистые шламы, содовые плавы, отходы нефтехимии и др. Отвалы и шламохранилища, занятые отходами химических производств, занимают тысячи гектаров земли.

Крупнотоннажными гипсосодержащими отходами являются в первую очередь фосфо-, боро- и фторо-, титано-, сульфогипс.

Химический состав фосфогипса [6] в пересчете на сухое вещество, %:

| CaO | SO ₃ | P ₂ CO ₅ (общ.) | P ₂ O ₅ (вод.) | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | MgO | F | R ₂ O ₃ |
|-------|-----------------|--|---|--------------------------------|--------------------------------|-----------|---------|-------------------------------|
| 26—55 | 40—50 | 0,8—1,6 | 0,15—0,90 | 0,1—3,2 | 0,1—0,8 | 0,03—0,08 | 0,2—0,5 | 0,15 |

Фосфогипс (основной компонент CaSO₄·2H₂O) — побочный продукт, получаемый при производстве ортофосфорной кислоты и минеральных удобрений — двойного суперфосфата, аммофоса и нитроаммофоски. Фосфогипс получают в виде шлама с влажностью до 55 %, твердая фаза шлама содержит более 90 % частиц размером < 80 мкм.

При производстве капролактама образуется побочный продукт и «щелочные стоки» — растворы натриевых солей моно- и дикарбоновых кислот. При их разложении получают плавы соды, содержащий обычно более 85 % Na₂CO₃. Так, отход Щекинского ПО «Азот» имеет следующий состав, масс. %: 95,43 — Na₂CO₃; 2,51 — Na₂SO₄; 0,57 — NaOH; 1,69 — NaCl; 0,017 — Fe₂O₃; 0,03 — Al₂O₃.

К отходам резинотехнических изделий относятся остатки резиновых смесей, резиновые и резинотканевые, невулканизированные и вулканизированные, текстильные и резинометаллические отходы. Например, резиновые невулканизированные отходы содержат до 50 % каучука.

Отходы производства асбестотехнических изделий образуются при изготовлении тормозных колодок, прокладок, кровельного материала и др. Основные ингредиенты отходов — асбест, каучук,

Характерные выбросы в атмосферу основных производств химической промышленности

| Производство | Вредные выбросы в атмосферу |
|-----------------------|---|
| Кислот: | |
| азотной | NO, NO ₂ , NH ₃ |
| серной | NO, NO ₂ , SO ₂ , SO ₃ , H ₂ SO ₄ , Fe ₂ O ₃ (пыль) |
| соляной | HCl, Cl ₂ |
| щавелевой | NO, NO ₂ , C ₂ H ₂ O ₄ (пыль) |
| сульфаминовой | NH ₃ , NH(SO ₃ NH ₄) ₂ , H ₂ SO ₄ |
| фосфорной (фосфора) | P ₂ O ₅ , H ₃ PO ₄ , HF, фосфогипс (пыль) |
| уксусной | CH ₃ CHO, CH ₃ COOH |
| Удобрений: | |
| сложных | NO, NO ₂ , NH ₃ , HF, H ₂ SO ₄ , P ₂ O ₅ , HNO ₃ , пыль |
| карбамида | NH ₃ , CO, (NH ₂) ₂ CO (пыль) |
| аммиачной селитры | CO, NH ₃ , HNO ₃ , NH ₄ NO ₃ (пыль) |
| аммиачной воды | NH ₃ |
| суперфосфата | H ₂ SO ₄ , HF, пыль |
| хлорида кальция | HCl, H ₂ SO ₄ , CaCl ₂ (пыль) |
| хлористой извести | Cl ₂ , CaCl ₂ (пыль) |
| Тетрахлорэтилена | HCl, Cl ₂ |
| Ацетона | CH ₃ CHO, (CH ₃) ₂ CO |
| Аммиака | NH ₃ , CO |
| Метанола | CH ₃ OH, CO |
| Капролактама | NO, NO ₂ , SO ₂ , H ₂ S, CO |
| Диоксида титана | TiO ₂ , FeO, Fe ₂ O ₃ |
| Ацетилена | C ₂ H ₂ , сажа |
| Катализаторов | NO, NO ₂ , пыль |
| Искусственных волокон | H ₂ S, CS ₂ |
| Стекланных волокон | B ₂ O ₃ , As ₂ O ₅ (As ₂ O ₃), SiF ₄ , пыль |

смолы, латексы, а также бракованные готовые изделия, например, паронит.

Ежегодно в стране накапливается около 500 млн м³ отходов растительного происхождения (лесосырьевые ресурсы, опилки, стружка и др.), из них 160 млн м³ остаются невывезенными на лесопилках, 120 млн м³ теряется при последующей обработке. Лишь шестая часть всех отходов перерабатывается в товарную продукцию [6].

В промышленных процессах переработки различного сырья и полуфабрикатов путем механического, термического и химического воздействия образуются отходящие (отбросные) газы, в которых содержатся взвешенные частицы. Они обладают всем комплексом свойств твердых отходов, а газы (в том числе и воздух), содержащие взвешенные частицы, относятся к аэродисперсным системам. Промышленные газы обычно — сложные аэродисперсные системы, в которых дисперсионная среда является смесью разных газов, а взвешенные частицы полидисперсны и имеют разные агрегатные состояния.

Пыль в газах, отходящих от сырьевых и цементных сушилок, мельниц, грануляторов, смесителей, печей обжига колчедана, в аспирационном воздухе транспортных устройств и т. п. является следствием несовершенства оборудования и технологических процессов. В дымовых, генераторных, доменных, коксовых и других подобных газах содержится пыль, образующаяся в процессе горения топлива. Как продукт неполного сгорания органических веществ (топлива) при недостатке воздуха образуется и уносится сажа. Если в газах содержатся какие-либо вещества в парообразном состоянии, то при охлаждении до определенной температуры пары конденсируются и переходят в жидкое или твердое состояние. Примерами взвесей, образовавшихся в результате конденсации, могут служить: туман серной кислоты в отходящих газах выпарных аппаратов, туман смол в генераторных и коксовых газах, пыль цветных металлов (цинка, олова, свинца, сурьмы и др.) с низкой температурой испарения в газах. Пыли, образующиеся в результате конденсации паров, называют возгонами.

Несмотря на внешнее разнообразие исходного сырья, используемого в порошковых технологиях, ингредиенты пыли не только подчиняются одним и тем же теоретическим законам инженерной реологии, но и обладают сходными технологическими свойствами, условиями их предварительной подготовки и последующей вторичной переработки.

При выборе метода переработки твердых отходов существенную роль играют их состав и количество. Годовое количество промышленных твердых отходов в Российской Федерации составляет огромную величину (без учета 150 млн м³ или 30 млн т бытовых твердых отходов). Только в Москве в настоящее время за год обра-

**Удельные газовыделения в зависимости от марки
связующего вещества формы**

| Наименование выделения | Формовочная смесь, мг/кг смеси | | |
|---------------------------|--------------------------------|--------|--------|
| | ОФ-1 | БС-40 | УКС |
| Бензол | 390,0 | — | — |
| Фенол | — | — | — |
| Фурфурол | 5,5 | 2,0 | — |
| Метанол | — | 11,0 | 207,0 |
| Аммиак | — | 702,0 | 823,0 |
| Цианид водорода | 8,7 | 1,2 | — |
| Формальдегид | 920,0 | 34,0 | 34,2 |
| Оксид углерода | 688,0 | 496,0 | 1921,0 |
| Диоксид углерода | 204,0 | 3260,0 | 8563,0 |
| Метан | — | 111,0 | 82,0 |

зуются до 3,4 млн т промышленных отходов, около 2,5—3,0 млн т твердых бытовых отходов, около 4,5 млн т строительных отходов, включая загрязненные и замусоренные грунты [16].

Предприятия механического профиля (2-я группа), включающие цехи заготовительные и кузнечно-прессовые, термической и механической обработки металлов, покрытий, литейное производство, выделяют значительное количество газов, жидких стоков и твердых отходов. Например, в закрытых чугунолитейных вагранках производительностью 5—10 т/ч на 1 т выплавленного чугуна выделяется 11—13 кг пыли, 190—200 кг оксида углерода; 0,4 кг диоксида серы; 0,7 кг углеводородов и др. Концентрация пыли в отходящих газах составляет 5—20 г/м³ при эквивалентном размере 35 мкм [7].

При литье под действием теплоты расплавленного (жидкого) металла и при охлаждении форм из формовочных смесей выделяются ингредиенты, представленные в табл. 7.3 [7].

Токсичные вещества в окрасочных цехах выделяются в процессе обезжиривания поверхностей органическими растворителями перед окраской, при подготовке лакокрасочных материалов, при их нанесении на поверхность изделий и сушке покрытия. Характеристики вентиляционных выбросов из окрасочных цехов приведены в табл. 7.4.

Концентрации выбросов вредных веществ

| Лакокрасочный материал | Объем отсасываемого воздуха, м ³ /ч | Концентрация, мг/м ³ | |
|------------------------|--|---------------------------------|---------|
| | | ксилола | толуола |
| Эмаль МЛ-1-03 | 5000 | 400 | — |
| Эмаль МЛ-25 | 1700 | 170 | — |
| Грунт ФЛ-03к | 27 000 | — | 390 |
| Нитроэмаль № 924 | 33 000 | — | 70 |

Нефтегазовые и горнодобывающие объекты, металлургического производства и теплоэнергетику условно относят к предприятиям 3-й группы.

При нефтегазовом строительстве основным источником техногенных воздействий является опорно-двигательная часть машин, механизмов и транспорта. Они разрушают почворастительный покров любого типа за один-два прохода или проезда. На этих же этапах происходит максимальное физико-химическое загрязнение почв, грунтов, поверхностных вод горюче-смазочными материалами, твердыми отходами, бытовыми стоками и др. Плановые потери добытой нефти составляют в среднем 50 %. Далее приведен перечень веществ (в скобках дан класс их опасности), выбрасываемых: а) *в атмосферный воздух*: диоксид азота (2), бенз(а)пирен (1), сернистый ангидрид (3), оксид углерода (4), сажа (3), ртуть металлическая (1), свинец (1), озон (1), аммиак (4), хлорид водорода (2), серная кислота (2), сероводород (2), ацетон (4), оксид мышьяка (2), формальдегид (2), фенол (1) и др.; б) *в сточные воды*: азот аммиачный (аммония сульфат по азоту) (3), азот общий (аммиак по азоту) (3), бензин (3), бенз(а)пирен (1), керосин (4), ацетон (3), уайт-спирит (3), сульфат (4), фосфор элементарный (1), хлориды (4), хлор активный (3), этилен (3), нитраты (3), фосфаты (2), масла и др. [8].

Горная промышленность использует практически невозобновляемые минеральные ресурсы далеко не полностью: 12—15 % руд черных и цветных металлов остается в недрах или складывается в отвалы.

Так называемые плановые потери каменного угля составляют 40 %. При разработке полиметаллических руд из них извлекают лишь один-два металла, а остальные выбрасывают с вмещающей породой.

При добыче каменных солей и слюды в отвалах остается до 80 % сырья. Массовые взрывы на карьерах являются крупными источниками пыли и ядовитых газов. Например, пылегазовое об-

лако рассеивает 200—250 т пыли в радиусе 2—4 км от эпицентра взрыва.

Выветривание горных пород, складированных в отвалы, приводит к значительному повышению концентрации SO_2 , CO и CO_2 в радиусе нескольких километров.

В теплоэнергетике мощным источником твердых отходов и газообразных выбросов являются теплоэлектростанции, паросиловые установки, т. е. любые промышленные и коммунально-бытовые предприятия, связанные с процессом сжигания топлива.

В состав отходящих дымовых газов входят CO_2 , SO_2 , SO_3 и др. Хвосты углеобогащения, золы и шлаки формируют состав твердых отходов. Отходы углеобогачительных фабрик содержат, %: 55—60 SiO_2 ; 22—26 Al_2O_3 ; 5—12 Fe_2O_3 ; 0,5—1,0 CaO ; 4—4,5 K_2O и Na_2O и до 5 С. Они поступают в отвалы и степень их использования не превышает 1—2 % [2].

Опасно применение бурых и других углей, содержащих радиоактивные элементы (U, Th и др.), в качестве топлива, так как часть их уносится с отходящими газами в атмосферу, часть — через золоотвалы поступает в литосферу.

К промежуточной *комбинированной группе предприятий* относят муниципальное производство и объекты коммунально-городского хозяйства. Современные города выбрасывают в атмосферу и гидросферу около 1000 химических соединений.

Атмосферные выбросы текстильной промышленности содержат оксид углерода, сульфиды, нитрозамины, сажу, серную и борную кислоты, смолы, а обувные фабрики выделяют аммиак, этилацетат, сероводород и кожевенную пыль. При производстве строительных материалов и конструкций, например, выделяется от 140 до 200 кг пыли на 1 т произведенных строительного гипса и извести соответственно, а отходящие газы содержат оксиды углерода, серы, азота, углеводороды. Всего предприятия по производству стройматериалов в нашей стране выбрасывают ежегодно 38 млн т пыли, 60 % которых составляет цементная [2].

Загрязнения в сточных водах находятся в виде взвесей, коллоидов и растворов. До 40 % загрязнений составляют минеральные вещества: частицы грунта, пыли, минеральные соли (фосфаты, азот аммонийный, хлориды, сульфаты и др.). В состав органических загрязнений входят жиры, белки, углеводы, клетчатка, спирты, органические кислоты и т. д. Особый вид загрязнения сточных вод — бактериальный.

Количество загрязнений в хозяйственно-бытовых сточных водах определяется в основном физиологическими показателями и составляет примерно, г/(чел. · сут) [9]:

взвешенные вещества — 65;

азот аммонийный — 8;

фосфаты — 3,3 (из них 1,6 — за счет моющих средств);

синтетические ПАВ (СПАВ) — 2,5;
хлориды — 9.

Наиболее опасны и трудноудаляемы из стоков СПАВ (иначе, детергенты) — сильные токсиканты, устойчивые к процессам биологического разложения. Поэтому в водоемы сбрасывается до 50—60 % их первоначального количества [2].

К опасным загрязнениям антропогенного характера, способствующим серьезному ухудшению качества окружающей среды и жизни человека, следует отнести *радиоактивность*. Естественная радиоактивность — это закономерное явление, обусловленное наличием в атмосфере радона ^{222}Rn и продуктов его распада, а также воздействием космических лучей. К продуктам распада ^{222}Rn относятся ^{220}Rn (торон Тп, $\tau_{1/2} = 54$ с) и ^{219}Rn (актинон Ап, $\tau_{1/2} = 3,9$ с). Образуясь в группы, они затем через поры почвы проникают в приземный слой атмосферы, создавая так называемую естественную (природную) радиоактивность. Что касается антропогенных факторов, то они связаны, главным образом, с искусственной (техногенной) радиоактивностью (ядерные взрывы, производство ядерного топлива, аварии на атомных электростанциях).

Представляют практический интерес уровни радиоактивного риска, обусловленного естественным сроком и некоторыми искусственными источниками облучения.

Средний индивидуальный риск, год⁻¹, облучения населения Земли и СССР* [10]

| Источник облучения | Население | |
|---------------------------------------|---|---------------------|
| | Земли | СССР |
| Естественный фон | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,6 \cdot 10^{-5}$ |
| Технологический естественный фон: | | |
| радон и торон в помещениях | $2,1 \cdot 10^{-5}$ | $1,7 \cdot 10^{-5}$ |
| удобрения в сельском хозяйстве | — | $1,2 \cdot 10^{-7}$ |
| выбросы угольных электростанций | — | $3,3 \cdot 10^{-8}$ |
| пользование автотранспортом | $1,6 \cdot 10^{-8}$ | — |
| радиолюминесцентные товары | $1,6 \cdot 10^{-8}$ | — |
| Искусственные источники облучения: | | |
| медицинское облучение | $6,6 \cdot 10^{-6} - 1,6 \cdot 10^{-7}$ | $2,3 \cdot 10^{-5}$ |
| радиоактивные выпадения | | |
| от испытаний ядерного оружия | $1,6 \cdot 10^{-7}$ | $1,6 \cdot 10^{-7}$ |
| ядерная энергетика | $1,0 \cdot 10^{-8}$ | $2,3 \cdot 10^{-8}$ |
| Всего | $4,6 \cdot 10^{-5} - 5,6 \cdot 10^{-5}$ | $5,8 \cdot 10^{-5}$ |

* В последние годы существования.

Радиоизотопы, многие из которых, по существу, вечны, так или иначе попадают в атмосферу. В связи с этим важной является проблема обезвреживания отходов ядерной энергетики.

К техногенным загрязнениям, представляющим опасность для биосферы и человека, относятся и *электромагнитные излучения* (ЭМИ) и *поля* (ЭМП). Весьма сложны как их анализ, так и ограничение интенсивности воздействия. Органы чувств человека не воспринимают ЭМП до частот видимого диапазона, в связи с чем оценить степень опасности облучения практически невозможно [11]. Бурное развитие научно-технического прогресса привело к тому, что созданные человеком ЭМП в сотни раз выше среднего естественного поля. В условиях современных производств и городских условий на организм человека влияют ЭМП, источниками которых являются радиопередающие устройства, производственная электроэнергетика, ЛЭП, электрофицированный транспорт, офисная и бытовая техника. Интенсивность фона зависит от близости к электроэнергетическим источникам, расписания работы радиостанций, состояния ионосферы и других причин. Виды воздействия ЭМП:

изолированное (от одного источника);

сочетаемое (от двух и более источников одного частотного диапазона);

смешанное (от двух и более источников различных частотных диапазонов);

комбинированное (в случае дополнительного воздействия какого-либо другого неблагоприятного фактора).

Шум, инфразвук, ультразвук и вибрация оказывают самые разные воздействия на живой организм; в подавляющем большинстве они являются нежелательными. На основании классических методов оценки звука интенсивность или пережитая воспринятая громкость является не только наиболее важной характеристикой любого вида шума, но и в значительной мере определяет степень его вредного воздействия (А. Schick, 1998).

На предприятиях источниками шума являются вентиляторные установки, компрессорные станции, газотурбинные установки и другие устройства. Наиболее значительные уровни шума наблюдаются на частотах 0,5—1,0 кГц, т.е. в зоне наибольшей чувствительности органа слуха. В возрасте до 27 лет на шум неадекватно реагируют 46,3 % людей, в возрасте 28—37 лет — 57 %, в возрасте 38—57 лет — 62,4 %, а в возрасте 58 лет и старше — 72 %. Расчетные уровни звука некоторых промышленных предприятий (по И. Л. Карагодиной), дБ:

мотороиспытательные станции и клепально-штамповочные цехи — 110;

металлургические, машиностроительные — 100;

деревообрабатывающие — 90;

пищевой и химической отраслей — 85;

швейные и ткацкие — 80.

Установлено, что потеря слуха обычно наступает при воздействии шума в диапазоне частот 3—6 кГц, а нарушение разборчи-

ности речи — при частоте 1 — 2 кГц [12]. Из-за негативных акустических воздействий общая заболеваемость населения в городах возрастает на 30 %.

Источниками вибрации являются: промышленные установки, технологические трубопроводы, строительные и другие объекты, в которых доминируют динамические процессы, вызванные ударами, резкими ускорениями и т. п. Разрушительное влияние вибрации с сопутствующим ей фактором — шумом — одна из самых трудноразрешимых проблем промышленной экологии.

Список литературы

1. *Конаков С. П.* Экология промышленности будущего. — М.: РЭФИА, 1998. — 158 с.
2. *Лозановская И. Н., Орлов Д. С., Садовникова Л. К.* Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. — М.: Высш. шк., 1998. — 287 с.
3. *Зюзин А. В., Семенов В. И.* Защита производственного персонала и населения от сильнодействующих ядовитых веществ на химически опасных объектах. — М.: Медиатор, 1994. — 240 с.
4. *Стадницкий Г. В., Родионов А. И.* Экология. — СПб.: Химия, 1996. — 240 с.
5. *Назаров В. И., Мелконян Р. Г., Калыгин В. Г.* Техника уплотнения стекольных шихт. — М.: Легпромбытиздат, 1985. — 128 с.
6. *Кикава О. Ш., Шекина Н. С.* Методические рекомендации по изготовлению строительных материалов из промотходов. — М.: Изд-во ГП «Промотходы», 1994. — 56 с.
7. Охрана окружающей среды / Под ред. С. В. Белова. — М.: Высш. шк., 1991. — 319 с.
8. *Мазур И. И., Шишов В. М.* Основы охраны окружающей среды при строительстве нефтегазовых объектов. — М.: Недра, 1992. — 150 с.
9. Очистка хозяйственно-бытовых сточных вод и обработка осадков / А. Ф. Афанасьева, М. Н. Сирота, Л. С. Савельева и др. — М.: Изограф, 1997. — 96 с.
10. *Чухин С. Г.* Социально-экономические критерии приемлемости радиационного риска новых радиационных технологий. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 72 с.
11. *Рудаков М. Л.* Электромагнитные поля и безопасность населения. — СПб.: Русское географическое общество, 1998. — 32 с.
12. Охрана труда и экологическая безопасность в химической промышленности / А. С. Бобков, А. А. Блинов, А. А. Роздин и др. — М.: Химия, 1997. — 400 с.
13. *Шапилова М. В., Тимофеева И. Т.* Охрана атмосферного воздуха в стекольной промышленности. — М.: Легпромбытиздат, 1992. — 176 с.
14. *Родионов А. И., Клушин В. Н., Систер В. Г.* Технологические процессы экологической безопасности. — Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. — 800 с.
15. Россия в окружении мира: Аналитический ежегодник. 2001. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. — 332 с.

16. Твердые бытовые отходы: Справочник / В. Г. Систер, А. Н. Мирный, Л. С. Скворцов и др. — М.: Изд-во АКХ им. К. Д. Панфилова, 2001. — 320 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Какое происхождение имеют источники загрязнения (ВВ) биосферы?
2. Какие агрегатные состояния отходов вам известны?
3. Дайте классификацию ВВ по степени воздействия на организм человека (ГОСТ 12.1.0.07—76).
4. Назовите характерные выбросы в атмосферу основных производств в соответствии с их профилем (группой).
5. Назовите классификацию источников загрязнения атмосферы газовыми и газопылевыми выбросами.
6. Как классифицируются промышленные сточные воды по степени загрязнения и происхождению?
7. Какие техногенные загрязнения (кроме газовых, жидких, твердых и комбинированных) вы знаете? Перечислите их.

ГЛАВА 8

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

8.1. Очистка и переработка технологических газов, дымовых отходов и вентиляционных выбросов

Предлагаемые к рассмотрению в гл. 8 методы и устройства сгруппированы по типу очищаемой среды (газовая, жидкая, твердая, комбинированная) или вторично используемого отхода в зависимости от его характеристик.

Газообразные промышленные отходы включают не вступившие в реакции газы (компоненты) исходного сырья; газообразные продукты; отработанный воздух окислительных процессов; сжатый (компрессорный) воздух для транспортировки порошковых материалов, для сушки, нагрева, охлаждения и регенерации катализаторов, для продувки осадков на фильтровальных тканях и других элементах; индивидуальные газы (аммиак, водород, диоксид серы и др.); смеси нескольких компонентов (азотоводородная смесь, аммиачно-воздушная смесь, смесь диоксида серы и фосгена); газопылевые потоки разных технологий; отходящие дымовые газы термических реакторов, топков и другие, а также отходы газов, образующиеся при вентиляции рабочих мест и помещений.

Кроме этого, все порошковые технологии сопровождаются интенсивным выделением газопылевых отходов. Пылеобразование происходит в процессах измельчения, классификации, смешения, сушки и транспортирования порошковых и гранулированных сыпучих материалов [1, 2].

Для очистки газообразных и газопылевых выбросов с целью их обезвреживания или извлечения из них дорогих и дефицитных компонентов применяют:

- «сухие» механические пылеуловители;
- «сухие» пористые фильтры;
- «сухие» и «мокрые» электрофильтры;
- «мокрые» пыле- и газоулавливающие аппараты;
- комбинированные технологические схемы.

8.1.1. «Сухие» механические пылеуловители

Их условно делят на три группы:

пылеосадительные камеры, принцип работы которых основан на действии силы тяжести (гравитационной силы);

инерционные пылеуловители, принцип работы которых основан на действии силы инерции;

циклоны, батарейные циклоны, вращающиеся пылеуловители, принцип работы которых основан на действии центробежной силы.

Пылеосадительная камера представляет собой пустотелый или с горизонтальными полками во внутренней полости прямоуголь-

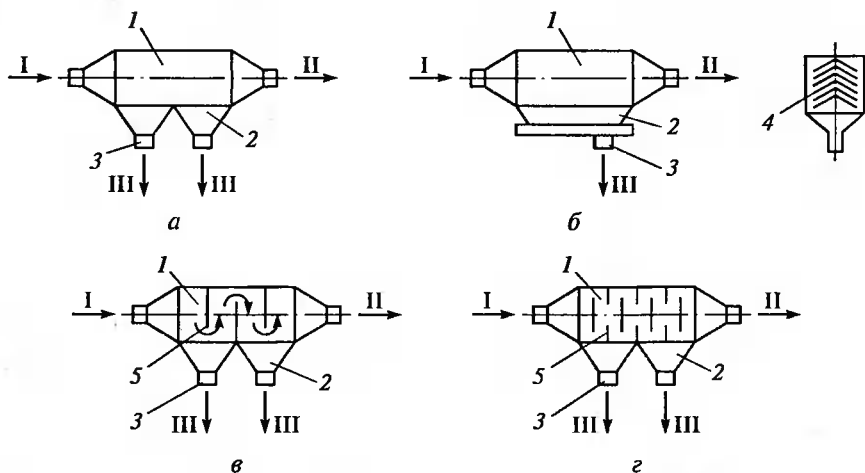


Рис. 8.1. Пылеосадительные камеры:

а — полая; *б* — с горизонтальными полками; *в*, *г* — с вертикальными перегородками; I — запыленный газ; II — очищенный газ; III — пыль; 1 — корпус; 2 — бункер; 3 — штуцер для удаления; 4 — полки; 5 — перегородки

ный короб, в нижней части которого имеется отверстие или бункер для сбора пыли (рис. 8.1).

Скорость газа в камерах составляет 0,2—1,5 м/с, гидравлическое сопротивление 50—150 Па. Пылеосадительные камеры пригодны для улавливания крупных частиц (размером не менее 50 мкм). Степень очистки газа в камерах не превышает 40—50%. Продолжительность прохождения газами осадительной камеры при равномерном распределении газового потока по ее сечению, с:

$$\tau = \frac{V_k}{V_r} = \frac{LBH}{V_r}, \quad (8.1)$$

где V_k — объем камеры, м³; V_r — объемный расход газов, м³/с; L — длина камеры, м; B — ширина камеры, м; H — высота камеры, м.

Перегородки в *инерционных пылеуловителях* (рис. 8.2) устанавливают для изменения направления движения газов. Газ в инерционный аппарат поступает со скоростью 5—15 м/с. Пылевые частицы, стремясь сохранить направление движения после изменения направления движения потока газов, осаждаются в бункере. Эти аппараты отличаются от обычных пылеосадительных камер большим сопротивлением и высокой степенью очистки газа [3].

Большое внимание при проектировании пневмотранспортных и других устройств пылеочистки необходимо уделять узлам отделения материала от транспортирующего воздуха — разгрузочным и пылеулавливающим устройствам (циклонам, фильтрам и т. п.).

Предпочтение отдается центробежным циклонам, выполняющим одновременно и роль пылеулавливающего аппарата. Эффективность улавливания пыли в циклонах повышается с уменьшением диаметра корпуса, но при этом снижается их пропускная способность. Для обеспечения соответствующей производительности пневмотранспортной установки небольшие циклоны груп-

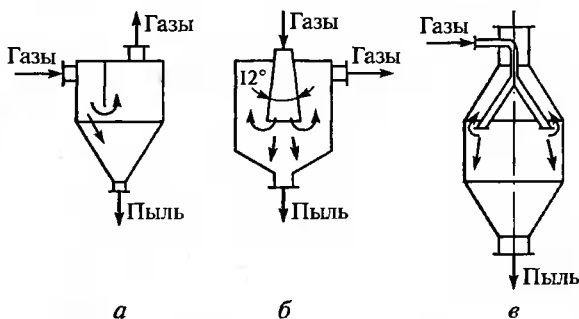


Рис. 8.2. Инерционные пылеуловители с разными способами подачи и распределения газового потока в камере с перегородкой (а), с расширяющимся конусом (б), с заглубленным бункером (в)

пируют в батарею, коэффициент пылеулавливания которой составляет 0,76—0,85 и несколько повышается с увеличением входной скорости (с 11 до 23 м/с). Использование вместо циклонов *вихревых пылеуловителей* обеспечивает улавливание частиц пыли размером 5—7 мкм.

Воздух после разгрузочных устройств или циклонов, насыщенный субмикронными частицами, должен направляться на доочистку в пылеуловители, характеризуемые:

• степенью пылеулавливания — отношением количества пыли, задержанной пылеуловителем, к количеству пыли в очищаемом запыленном воздухе;

• сопротивлением пылеуловителя, определяющим экономичность процесса пылеулавливания;

• габаритными размерами и массой, надежностью и простотой обслуживания.

Циклоны (рис. 8.3) рекомендуется использовать для *предварительной очистки* газов и устанавливать перед высокоэффективными аппаратами (например, фильтрами или электрофильтрами) очистки.

Основные элементы циклонов — корпус, выхлопная труба 6 и бункер 7. Газ поступает в верхнюю часть корпуса через входной патрубок 5, приваренный к корпусу тангенциально. Улавливание пыли происходит под действием центробежной силы, возникающей при движении газа между корпусом и выхлопной трубой. Уловленная пыль сыпается в бункер, а очищенный газ выбрасывается через выхлопную трубу (см. рис. 8.3).

В зависимости от производительности циклоны можно устанавливать по одному (одиночные циклоны) или объединять в группы из двух, четырех, шести или восьми (групповые циклоны).

Конструктивной особенностью *батареиных циклонов* является то, что закручивание газового потока и улавливание пыли в них обеспечивается размещенными в корпусе аппарата циклонными элементами [4].

*Характеристика наиболее распространенного на производстве
циклона ЦН-15*

Допустимая запыленность газа, г/м:

| | |
|--|-----------|
| слабослипающимися пылями | ≤ 1000 |
| среднеслипающимися пылями | 250 |
| Температура очищаемого газа, °С | ≤ 400 |
| Давление (разрежение), кПа | ≤ 5 (500) |
| Коэффициент гидравлического сопротивления: | |
| одного циклона | 147 |
| группы циклонов | 175—182 |

Эффективность очистки (от пыли $c = 20$ мкм частицами при скорости газопылевого потока 3,5 м/с и диаметре циклона 100 мм), %

78

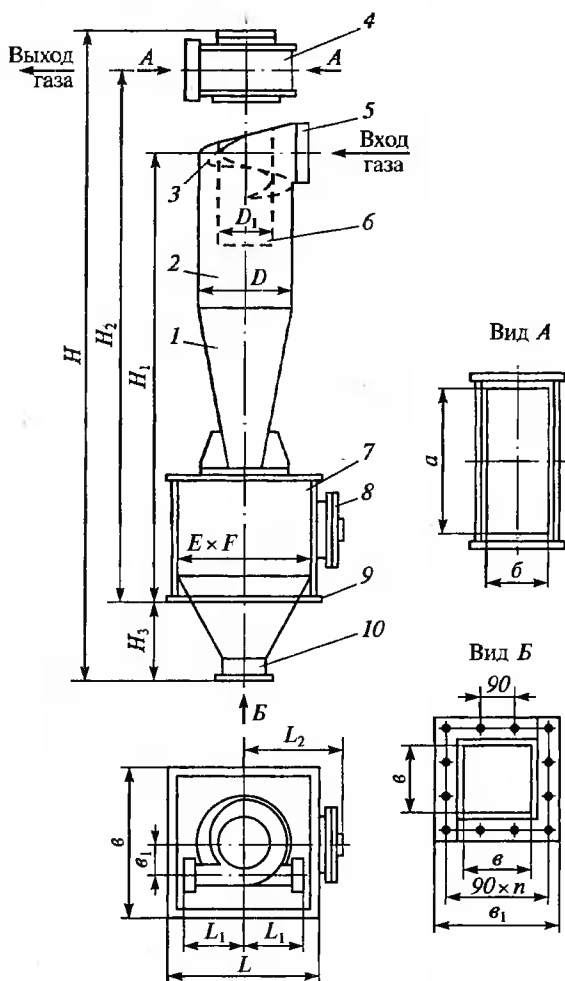


Рис. 8.3. Циклон типа ЦН-15П:

1 — коническая часть циклона; 2 — цилиндрическая часть циклона; 3 — винтообразная крышка; 4 — камера очищенного газа; 5 — патрубок входа запыленного газа; 6 — выхлопная труба; 7 — бункер; 8 — люк; 9 — опорный пояс; 10 — пылевыпускное отверстие (основные размеры см. [4])

Для расчетов режимов и выбора марки (конструкции) циклона необходимы исходные данные: V_r — количество очищаемого газа при рабочих условиях, m^3/c ; ρ_r — плотность газа при рабочих условиях, kg/m^3 ; μ — динамическая вязкость газа при рабочей температуре, $Pa \cdot s$; дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами d_m и $lg\sigma$; запыленность газа $C_{вх}$, g/m^3 ; $\rho_{ч}$ — плотность частиц, kg/m^3 ; η — требуемая эффективность очистки газа.

Конструкцию и режимные параметры циклона рассчитывают методом последовательных приближений [3—5] или используя более современный математический аппарат [9].

Технические характеристики современных аппаратов, выпускаемых в России (ОАО «СФ НИИОГАЗ» и ЗАО «Кондор-Эко»), представлены в прил. 5—7.

8.1.2. «Сухие» пористые фильтры

Для очистки запыленных газов все большее распространение получает на последних ступенях сухая очистка *рукавными фильтрами*. Степень очистки газов в них при соблюдении правил технической эксплуатации достигает 99,9 %.

Классификация рукавных фильтров возможна:

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

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

способу регенерации ткани (встряхиваемые, с обратной, с импульсной продувкой и др.);

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

числу секций в установке (одно- и многокамерные);

виду используемой ткани (например, стеклотканевые).

В качестве фильтровальных материалов применяют ткани из природных волокон (шерстяные, редко хлопчатобумажные), из синтетических (нитроновые, лавсановые, полипропиленовые и др.), а также стеклоткани. Наиболее распространены лавсан, терилен, дакрон, нитрон, орлон, оксалон, сульфон. Последние два материала представляют полиамидную группу волокон, обладающих термостойкостью при 250—280 °С. Для фильтровальных тканей наиболее характерно саржевое переплетение. Применяют также нетканые материалы — фетры, изготовленные свойлочиванием шерсти и синтетических волокон.

В прил. 8 приведена стоимость некоторых фильтровальных материалов, а в прил. 9 — их термостойкость и стоимость [10].

Рассмотрим подробнее группу материалов из нетканых иглопробивных фильтровальных полотен, наиболее перспективных в производстве порошковых материалов. Таллинской фирмой «Мистра» предлагаются полотна марок «Фильтра-220», «Фильтра-330», «Фильтра-550» для использования их в аспирационных или вакуумных рукавах и карманных (мешочных) фильтрах очистки газов, пылеулавливания технологических продуктов, а также в системах вентиляции.

Технические показатели нетканых излопробивных полотен:

| Полотно | «Фильтра-550» | «Фильтра-330» |
|---|---------------|---------------|
| Поверхностная плотность, г/м ² | 550 ± 28 | 330 ± 17 |
| Ширина, см | 150 ± 3 | 145 ± 3 |
| Толщина, мм | 2 ± 0,3 | 1,3 ± 0,2 |
| Воздухопроницаемость, дм ³ /(м ² · с), при перепаде давления 50 Па | 150 ± 50 | 250 ± 50 |
| Разрывная нагрузка, Н | ≥ 1000 | 400 |
| Удлинение при разрыве, %: | | |
| по длине | 80 | 80 |
| по ширине | 90 | 90 |
| Нормированная влажность, % | 1 | 1 |

Промышленные испытания материала «Фильтра-550» в производстве сепарированного мела показали степень очистки 99,9 % при улавливании пыли, 75 % которой составляет фракция с диаметром частиц 1—5 мкм.

Фильтровальный материал служит не менее года при верхнем пределе рабочих температур 140—150 °С. Создано и более термостойкое полотно, используемое при температурах до 270 °С. В зависимости от вида ткани допустимая удельная газовая нагрузка составляет 0,6—1,2 м³/(м² · мин) для хлопчатобумажной или шерстяной; 0,5—1 — для синтетической; 0,3—0,9 м³/(м² · мин) — для стеклоткани.

Нагнетательный рукавный фильтр работает следующим образом. Воздух под давлением поступает в верхнюю распределительную коробку, а оттуда — в матерчатые вертикальные рукава. Пройдя через рукава и оставив на их внутренней поверхности пыль, очищенный воздух выходит в атмосферу (помещение). Подвижная рама с проволочной сеткой при подъеме и опускании сжимает рукава в поперечном сечении, благодаря чему пыль сбрасывается в пылесборник и удаляется винтовым конвейером. Недостаток таких фильтров — неудовлетворительная очистка фильтрующей ткани, в результате чего значительно возрастает сопротивление фильтра и снижается его КПД.

Наибольшее распространение получил *всасывающий рукавный фильтр*, рукава которого заключены в герметичный шкаф. Подлежащий очистке воздух подается через нижнюю приемную коробку в рукава, заглушенные сверху, проникает сквозь ткань рукавов в шкаф, удаляется из него через канал. Рукава фильтра очищаются от пыли с помощью специального встряхивающего механизма. Недостатком всасывающих фильтров является значительный подсос воздуха (10—15 % объема поступающего на очистку) через неплотности.

Разработка и промышленное изготовление дешевых фильтровальных материалов, обладающих высокой эффективностью при достаточной механической прочности и стойкости в кислых и щелочных средах, например, при химическом полировании хрус-

тая, открывают пути для более широкого их применения. Фильтрующий материал *Beckinox* (Великобритания) изготавливают как в виде штапеля, так и в виде длинных нитей разного диаметра из нержавеющей стали. Этот материал при скорости фильтрации $180 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ имеет сопротивление 1200 Па и ту же эффективность, что и текстильные ткани, высокую абразивную устойчивость, температуростойкость (до $\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$), регенерируется любым известным способом и хорошо фильтрует газы, содержащие SO_2 .

Во Франции при очистке отходящих газов с $400\text{—}500 \text{ }^\circ\text{C}$ применяют рукавные фильтры из металлического фетра, основа которого — металлическая сетка, нарощенная слоем тонкой металлической нити. По скорости фильтрации, аэродинамическому сопротивлению, количеству потребляемой энергии фильтр идентичен рукавному фильтру из полиэфирного волокна.

Для случая, когда высокая фильтрующая способность должна сочетаться с высокой теплостойкостью и стойкостью к агрессивной химической среде, фирма *Du Pont* (США) предлагает три вида материалов (войлок и ткани) для фильтрации сухих частиц: номекс (арамидное волокно), тефлон (фторуглерод) и тефэр (войлок, выполненный из смеси тефлона (85 %) со стекловолокном (15 %)). Эти материалы выдерживают рабочую температуру $100\text{—}250 \text{ }^\circ\text{C}$.

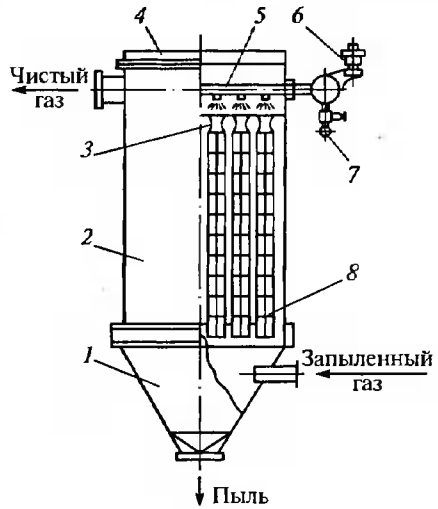
Небольшое количество тонких стеклянных волокон в тефлоне уменьшает его пористость и повышает улавливающую способность. Тефлоновые волокна, стойкие к истиранию, защищают стекловолокно от механических повреждений. Высокие эксплуатационные характеристики тефэра объясняются противоположными трибоэлектрическими свойствами обоих волокон смеси, которые создают электростатические заряды в ходе работы. Это способствует высокой эффективности улавливания войлоком субмикронных частиц. Однако, по данным фирмы, если фтористоводородная кислота, например, при химическом полировании хрусталя полностью не нейтрализуется, то в дымовых газах рекомендуется использовать 100%-й тефлон.

Отечественной промышленностью выпускаются фильтры рукавные: с импульсной продувкой (ФРИ), каркасные импульсные (ФРКИ), заводы-изготовители ОАО «СФ НИИОГАЗ», ЗАО «Кондор-Эко» (см. прил. 10, 11); циклонные РЦИЭ, РЦИРЭ и РЦИЭК, завод-изготовитель ОАО «Дзержинскхиммаш» (см. прил. 12) и другие, например, ФРЦИ-30, ФРИА-900 по спецзаказу.

В справочнике [6] подробно рассмотрены фильтры общепромышленного назначения. Преимущественное развитие получили ФРКИ (рис. 8.4). Скорость фильтрования в них на $20\text{—}30 \%$ выше, чем в фильтрах с механической регенерацией и обратной продувкой. При эффективной регенерации короткими ($0,1\text{—}0,2 \text{ с}$) импульсами меньше изнашиваются рукава, гидравлическое сопротивление поддерживается на уровне $1,0\text{—}1,5 \text{ кПа}$. В условном обозначении типоразмера фильтра число после букв — активная поверхность фильтрации.

Рис. 8.4. Фильтр ФРКИ (ФРИ):

1 — бункер; 2 — корпус; 3 — диффузор-сопло; 4 — крышка; 5 — труба раздающая; 6 — секция клапанов; 7 — коллектор сжатого воздуха; 8 — секция рукавов



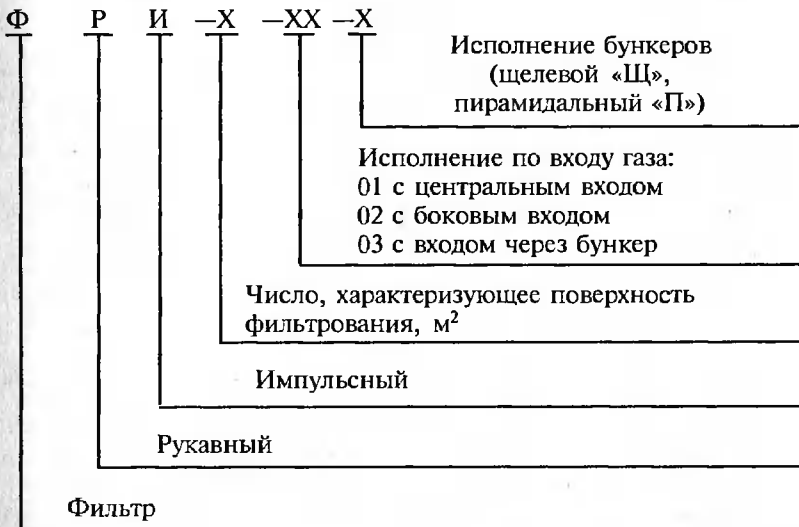
Фильтры рукавные состоят из корпуса с раздельной рукавной плитой, фильтровальных элементов, клапанных секций с раздающими трубами для обеспечения регенерации рукавов импульсами сжатого воздуха. В процессе фильтрации запыленный газ проходит через ткань закрытых снизу рукавов внутрь, выходит через верхний коллектор и удаляется из аппарата.

Каждый рукав в фильтре натянут на жесткий каркас и закреплен на верхней решетке (плите).

Фильтры могут быть с входом газа: центральным; боковым; через бункер; со щелевым и с пирамидальными бункерами.

Окончательную сборку, наладку, испытание, доводку фильтров выполняют на месте эксплуатации в составе конкретного производственного объекта.

Ниже представлена в качестве примера схема обозначения фильтра рукавного типа ФРИ:



Расчет рукавных тканевых фильтров сводится к определению общей поверхности фильтрации F и числа фильтров или секций. Нормальная нагрузка на 1 м^2 фильтрующей поверхности для рукавных фильтров $150\text{—}200 \text{ м}^3/\text{ч}$. Сопротивление фильтров

$$P_{\phi} = BQ_{\text{в}}^n, \quad (8.2)$$

где $B = 0,13 \div 0,15$ — коэффициент (большее значение — для более дисперсной пыли); $Q_{\text{в}}$ — расход воздуха на 1 м^2 ткани рукавов, $\text{м}^3/\text{ч}$; $n = 1,2 \div 1,3$ (меньшее значение — для более дисперсной пыли).

При работе в нормальном режиме сопротивление нагнетательных фильтров до 200 Па , всасывающих — до 600 Па . Общая поверхность фильтрации, м^2 , [3]

$$F = F_{\text{раб}} + F_{\text{рег}} = \frac{V + V_{\text{пр}}}{q_{\phi}} + F_{\text{рег}}, \quad (8.3)$$

где $F_{\text{раб}}$ — поверхность фильтрации в одновременно работающих секциях, м^2 ; $F_{\text{рег}}$ — поверхность фильтрации в регенерируемой секции, м^2 ; V — объемный расход очищаемых газов (воздуха) с учетом подсоса воздуха в фильтр, $\text{м}^3/\text{мин}$; $V_{\text{пр}}$ — объемный расход продувочного воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$; q_{ϕ} — удельная газовая нагрузка, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$.

Число необходимых фильтров или секций

$$n = F/F_1, \quad (8.4)$$

где F_1 — поверхность фильтрации всех рукавов в фильтре или секции, м^2 .

Гидравлическое сопротивление тканевого фильтра, Па ,

$$\Delta P = \frac{817q_{\phi}\mu_r(1-\epsilon_n)}{d_m^2\epsilon_n^3} \left(\frac{581 \cdot 10^{-6}(1-\epsilon_n)d_m^{0,23}}{\epsilon_r^{3,24}} + \frac{C_{\text{вх}}q_{\phi}t}{\rho_n} \right), \quad (8.5)$$

где μ_r — динамический коэффициент вязкости газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ϵ_n — пористость слоя пыли; d_m — средний размер частиц пыли, м ; ϵ_r — пористость ткани; $C_{\text{вх}}$ — начальная запыленность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_n — плотность пыли, $\text{кг}/\text{м}^3$, t — время, мин .

Периоды работы фильтра между регенерацией, встряхиванием или продувкой в зависимости от входной запыленности газов:

| | | | |
|---|-------|-----|-----|
| Входная запыленность, $\text{г}/\text{м}^3$ | 5 | 10 | 20 |
| Периоды между регенерацией, мин | 10—12 | 8—9 | 4—7 |

Иная методика расчета рукавного фильтра предложена в НИИОГАЗ [11].

Зернистый фильтр (рис. 8.5) имеет корпус 1, фильтрующие элементы 4, бункер 5, системы импульсной регенерации 3. Фильтрующий элемент содержит четыре пары вертикально размещенных фильтрующих ячеек 2. Ячейка содержит наклонные непроницае-

Рис. 8.5. Зернистый фильтр:

- 1 — корпус; 2 — фильтрующие ячейки; 3 — система импульсной регенерации; 4 — фильтрующие элементы; 5 — бункер

мые перегородки, верхние и нижние сетки. Между сетками насыпают 150-мм слой 3—5-мм частиц дробленого материала — магнетита, доломита, гравия и т. д. Перегородки и сетки образуют каналы треугольного сечения, по которым очищенные газы через отверстия в боковине проходят в короб, в каналах устанавливают перфорированные трубки для циклической подачи сжатого воздуха из коллектора. Фильтрующие ячейки разделены перегородка-

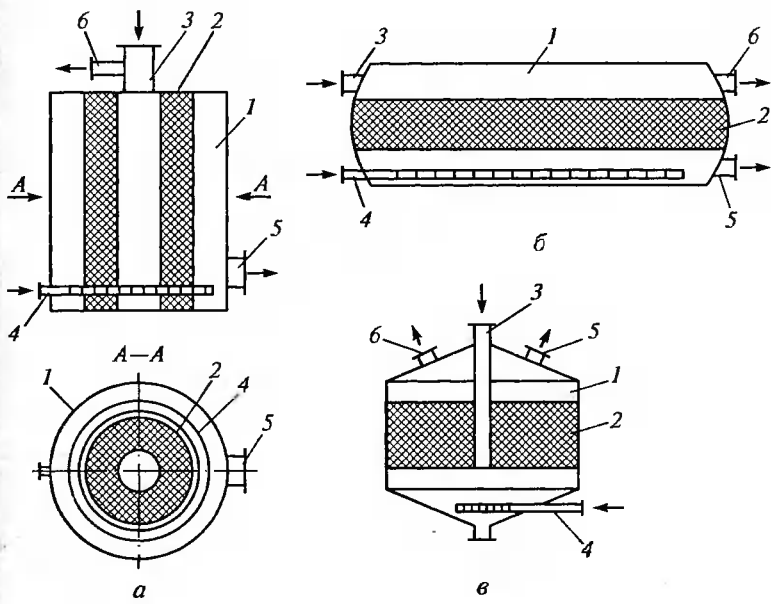
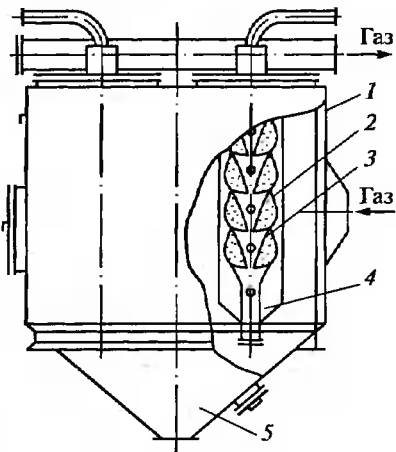


Рис. 8.6. Схемы вертикального (а), горизонтального (б) и кольцевого (в) адсорбторов:

- 1 — корпус; 2 — слой активированного угля; 3 — центральная труба для подачи паровоздушной смеси при адсорбции; 4 — барботер для подачи острого пара при десорбции; 5 и 6 — соответственно трубы для выхода инертных газов по отношению к поглотителю газов при адсорбции и при десорбции пара

ми на три равные части. При импульсной продувке нижние ячейки работают в режиме фильтрации, верхние — регенерации.

Наряду с очисткой газовых потоков от пыли важной является *очистка и обезвреживание дымовых газов от продуктов сгорания топлива*, для которых часто применяют *метод адсорбции*. В сухом способе очистки дымовых газов фильтрация очищаемых выбросов происходит через неподвижный (адсорберы периодического действия) или движущийся слой адсорбента. Наиболее распространены адсорберы периодического действия, в которых период контактирования очищаемого газа с твердым поглотителем чередуется с периодом его регенерации. Адсорберы (рис. 8.6) выполняются в виде вертикальных, горизонтальных либо кольцевых емкостей, заполненных пористым адсорбентом. Выбор конструкции определяется скоростью газовой смеси, размером частиц адсорбента, требуемой степенью очистки и рядом других факторов. Вертикальные адсорберы применяют при небольших объемах очищаемого газа, а горизонтальные и кольцевые — при десятках и сотнях кубометров газа в час.

При проектировании или выборе конструкции адсорбера учитывают: объемный расход очищаемого газа, $\text{м}^3/\text{с}$, концентрацию удаляемой примеси, $\text{мг}/\text{м}^3$, и давление отходящих газов, Па, по которым определяют необходимую массу адсорбента, конструктивные размеры, гидравлическое сопротивление аппарата и время защитного действия адсорбера.

8.1.3. Электрофильтры («сухие» и «мокрые»)

Метод электроосаждения (улавливания пыли в электрическом поле) заключается в следующем. Частицы пыли (или капельки влаги) сначала получают заряд от ионов газа, которые образуются в электрическом поле высокого напряжения, а затем движутся к заземленному осадительному электроду. Попав на заземленный уловитель, частицы прилипают и разряжаются. Когда осадительный электрод обрастает слоем частиц, они стряхиваются под воздействием вибрации и собираются в бункере. Схема электрического осаждения пыли представлена на рис. 8.7 [2].

Схема электрического осаждения пыли представлена на рис. 8.7 [2].

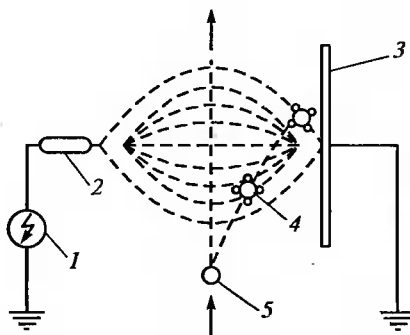


Рис. 8.7. Схема электрического осаждения пыли:

1 — источник электропитания; 2, 3 — коронирующий и осадительный электроды; 4 — ион газа; 5 — частица пыли

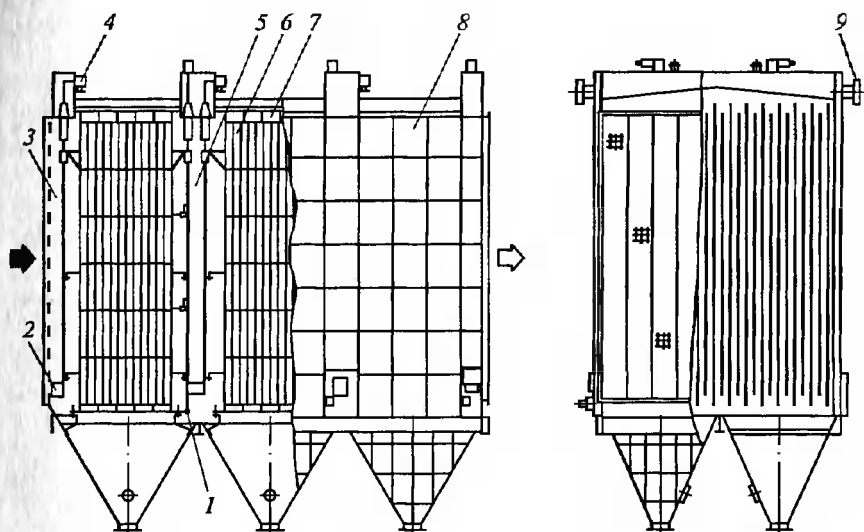


Рис. 8.8. Электрофильтр типа ЭГВ:

1 — механизм встряхивания осадительных электродов; 2 — люк обслуживания; 3 — газораспределительная решетка; 4 — защитная коробка для подвода тока; 5 — механизм встряхивания коронирующих электродов; 6, 7 — осадительный электрод; 8 — корпус; 9 — токопровод (стрелками показано движение воздуха)

Эффективность очистки запыленного газа в электрофильтрах определяют по формуле

$$\eta = \exp(-w_3 F_{уд}), \quad (8.6)$$

где w_3 — скорость движения частицы в электрическом поле, м/с; $F_{уд}$ — удельная поверхность осадительных электродов, равная отношению поверхности осадительных элементов к расходу очищаемых газов, $\text{м}^2/(\text{м}^3/\text{с})$.

Эффективность очистки газов зависит от показателя степени $w_3 F_{уд}$ в (8.6):

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

Электрофильтры (рис. 8.8) применяются там, где необходимо очищать очень большие объемы газа и отсутствует опасность взрыва: для улавливания летучей золы на современных электростанциях, пыли в цементной промышленности, дыма, в системах кондиционирования воздуха, в металлургии и других отраслях [7].

Существует несколько типовых конструкций сухих (ЭГА, УГМ, УТ, УГТ, ОП, УВ, ЭВТ и др.) и мокрых (С, ПГ, ДМ, БВК, ШМК и др.) электрофильтров [4, 6, 12], см. прил. 13.

8.1.4. Аппараты «мокрого» пыле- и газоулавливания

При очистке газов от частиц пыли и переработке газообразных отходов успешно применяют мокрое пылеулавливание, сухую и последующую мокрую очистку (последняя может сочетаться с адсорбционной доочисткой).

Развитая поверхность контакта фаз способствует увеличению эффективности пылеулавливания. В промышленности используют мокрые пылеуловители (промыватели) капельного, пленочного и барботажного типов. Конструктивно аппараты могут быть полыми, тарельчатыми, механического и ударно-инерционного действия (ротоклоны), а также скоростного типа (трубки Вентури и другие инжекторы).

Необходимо стремиться к созданию мокрых промывателей с минимальным гидравлическим сопротивлением, работоспособных при низких расходах воды. Эффективность очистки пыли зависит от размеров улавливаемых частиц и от других свойств пыли. Необходимость концентрирования системы жидкость — твердое тело с возвратом очищенной воды на пылеулавливание, накопление в орошаемой жидкости растворимых компонентов пыли, усложняет систему мокрого пылеулавливания.

Процесс улавливания пыли мокрым методом можно представить как перенос твердой фазы из газовой среды в жидкую и уда-

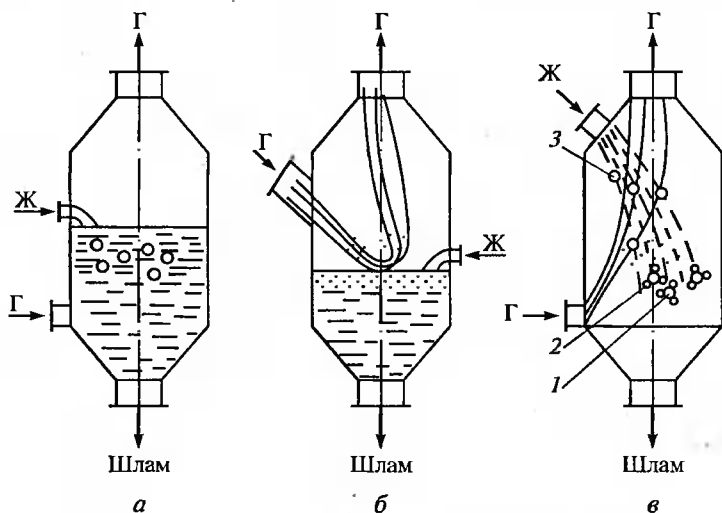


Рис. 8.9. Способы мокрого пылеулавливания:

a — в объеме (слое) жидкости; *b* — пленками жидкости; *v* — распыленной жидкостью в объеме газа; 1 — капли жидкости; 2 — твердые частицы; 3 — пузырьки газа; Г — газ; Ж — жидкость

ление последней из аппарата вместе с твердой фазой [2, 3]. В зависимости от формы контактирования фаз способы мокрой пылеочистки можно разделить на улавливание: в объеме (слое) жидкости (рис. 8.9, а), пленками жидкости (рис. 8.9, б) и распыленной жидкостью в объеме газа (рис. 8.9, в).

Скрубберы (газопромыватели). При *объемно-жидкостном* способе поток запыленного газа пропускают через определенный объем жидкости. Для этой цели используют пенные пылеуловители с провальными тарелками или тарельчатые скрубберы (рис. 8.10), эффективность которых может достигать 90—95 %.

Улавливание пыли *пленками жидкости* характеризуется контактом газа и жидкости на границе двух сред без перемешивания. Захват (собственно улавливание) твердых частиц тонкими пленками жидкости происходит на поверхностях конструктивных элементов. К этой группе устройств относятся скрубберы с насадкой, мокрые циклоны, ротоклоны и т.п. На рис. 8.11 показана схема ПВМ — пылеуловителя вентиляционного мокрого.

Улавливание пыли *распыленной жидкостью* заключается в том, что орошающая жидкость вводится в запыленный объем (поток)

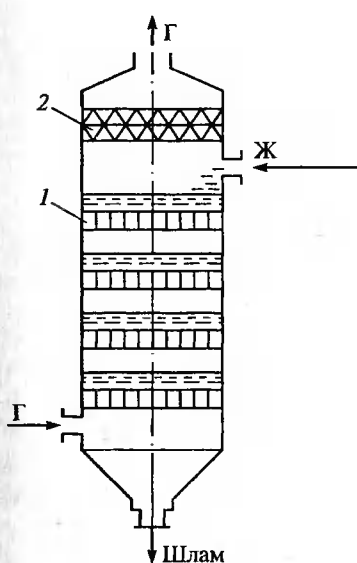


Рис. 8.10. Тарельчатый скруббер:

1 — тарелка; 2 — каплеуловитель

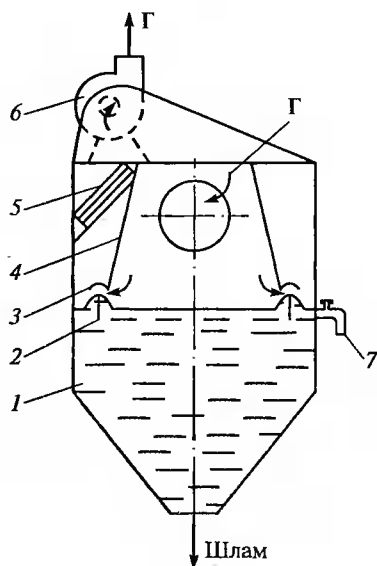


Рис. 8.11. Схема ПВМ:

1 — корпус; 2, 4 — перегородки; 3 — водоотбойник; 5 — каплеуловитель; 6 — вентиляционный агрегат; 7 — устройство для регулирования уровня воды

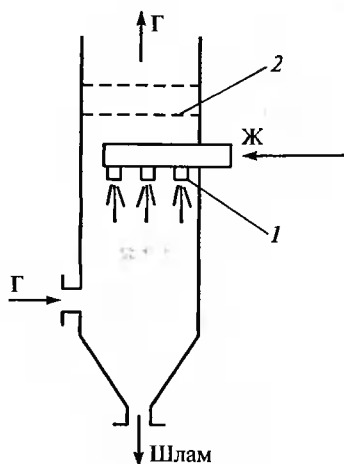


Рис. 8.12. Полый форсуночный скруббер:

1 — форсунка; 2 — пылеуловитель

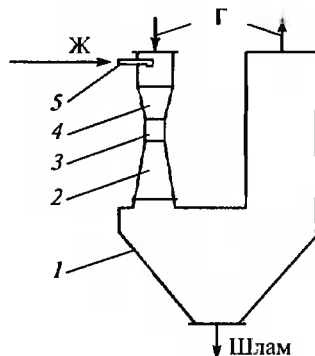


Рис. 8.13. Скруббер Вентури:

1 — каплеуловитель; 2 — диффузор; 3 — горловина; 4 — конфузор; 5 — устройство для подачи воды

газа в распыленном или дисперсном виде. Орошающая жидкость распыляется из форсунок под давлением или за счет энергии самого потока газа. Первый способ распыления используется в полых скрубберах (рис. 8.12), второй — в турбулентных промывателях и скрубберах Вентури (рис. 8.13).

Скрубберы Вентури (сочетание трубы с каплеуловителем центробежного типа) обеспечивают очистку газов от частиц пыли практически любого дисперсного состава. В зависимости от физико-химических свойств улавливаемой пыли, состава и температуры газа выбирают режим работы скруббера Вентури. Скорость газа в горловине 30—200 м/с, удельное орошение 0,1—6 л/м³. Эффективность очистки от пыли зависит от гидравлического сопротивления. Скрубберы Вентури эффективно работают при допустимой запыленности очищаемых газов 30 г/м³, предельных температуре очищаемого газа 400 °С, удельном орошении 0,5—2,5 л/м³ и гидравлическом сопротивлении 6—12 кПа.

Характеристика ГВПВ (газопромывателей Вентури прямооточных высоконапорных)

| | | | | |
|--|---------|-----------|------------|-----------|
| ГВПВ | 0,006 | 0,030 | 0,080 | 0,140 |
| $V_{г}$, 10 ³ м ³ /ч, на выходе | 1,7—3,5 | 9,32—18,9 | 23,46—47,6 | 41,4—84,0 |
| D горловины, мм, | 85 | 200 | 320 | 420 |

| | | | | |
|--|----------|--------|---------|---------|
| Расход орошающей жидкости, м ³ /ч,..... | 1,18—3,2 | 6,5—13 | 16,8—45 | 28,8—46 |
| $P_{ж}$, кПа, перед форсункой | 180—370 | 60—250 | 80—570 | 130—320 |

Конструкция часто дополняется *каплеуловителем циклонного типа* (КЦТ), который обеспечивает улавливание капель при содержании жидкости до 1 л/м³, $t \leq 400^\circ\text{C}$, концентрации капельной влаги после сепарации 70 мг/м³. Гидравлическое сопротивление 350 Па и производительность КЦТ $(1,7 \div 8,25)10^3 \cdot \text{м}^3/\text{ч}$.

Скрубберы Вентури типа СВ-Кк (комплект скруббер-сепаратор, один или два) имеют следующие характеристики:

| | |
|--|------------|
| Объем очищаемых газов, 10 ³ м ³ /ч | 50—500 |
| Расход орошающей жидкости, м ³ /ч | 65—400 |
| Температура очищаемых газов, °С | ≤ 120 |
| Концентрация взвешенных частиц, г/м ³ | ≤ 10 |
| Удельное орошение, л/м ³ | 0,5—3,5 |
| Гидравлическое сопротивление, кПа | 4—12 |

Созданы скрубберы центробежные вертикальные, батарейные СЦВБ-20, обеспечивающие среднюю производительность по газу $(9 \dots 20) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $t \leq 60^\circ\text{C}$, запыленности $\leq 10 \text{ г}/\text{м}^3$ и гидравлическом сопротивлении скрубберов 1,7 кПа.

Мокрая очистка газов с частицами 2—3 мкм возможна в скрубберах центробежного типа СЦВП, в которых жидкость дробится непосредственно запыленным газом. Шлам, оседающий в нижней части скруббера, выводится эйрлифтом в контейнер, а осветленная жидкость вновь возвращается в скруббер. Производительность таких аппаратов $(5—20) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$, допустимая запыленность 2 г/м³, температура газов 80 °С, гидравлическое сопротивление 2,4 кПа, расход воды на очистку 0,05 л/м³.

Разработаны скрубберы ударно-инерционного типа с пылеуловителями вентиляционными мокрыми. Производительность таких скрубберов $(3 \dots 40) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Запыленность газов 10 г/м³, гидравлическое сопротивление аппарата 0,8—2 кПа, расход воды 10—40 г на 1 м³ очищаемого воздуха.

Для химической очистки газов от соединений фтора с содержанием до 1 г/м³ растворами гидроксида или карбоната натрия можно рекомендовать скрубберы с шаровой подвижной насадкой и полые. Эффективность очистки газов от пыли зависит от дисперсности, плотности, склонности к слипанию, сыпучести, абразивности, смачиваемости, гигроскопичности, растворимости и др. Однако основной параметр при выборе пылеуловителя — размер частиц. Необходимо знать дисперсный состав пыли, задаваемый в виде таблиц или интегральных кривых. Гранулометрический состав большинства видов пыли подчиняется логарифми-

ческому закону распределения частиц по размерам. Степень очистки газов определяют по формуле

$$\eta = \Phi(x) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-0,15x^2} dx, \quad (8.7)$$

где $x = \lg(d_m/d_{50}) / \sqrt{\lg^2 \sigma_r + \lg^2 \sigma_\eta}$; d_m — медианный диаметр частиц пыли, мкм; d_{50} — диаметр частиц пыли, улавливаемых в аппарате на 50 %; σ_r — среднеквадратичное отклонение распределения частиц по размерам; $\lg \sigma_r$ — среднеквадратичное отклонение распределения фракционной эффективности пылеуловителя; $\lg \sigma_\eta$ — стандартное отклонение в функции распределения фракционных коэффициентов очистки.

Интеграл $\Phi(x)$ табулирован. В. Н. Ужовым и А. Ю. Вальдбергом составлены таблицы для определения значений $\Phi(x)$, соответствующих разным значениям x [8].

С достаточной точностью дисперсию (геометрическое стандартное отклонение) можно рассчитать по формуле

$$\sigma = d_{84}/d_m = d_m/d_{16}, \quad (8.8)$$

где d_{16} , d_{84} — диаметры частиц с содержанием фракций меньше 16 и 84 %.

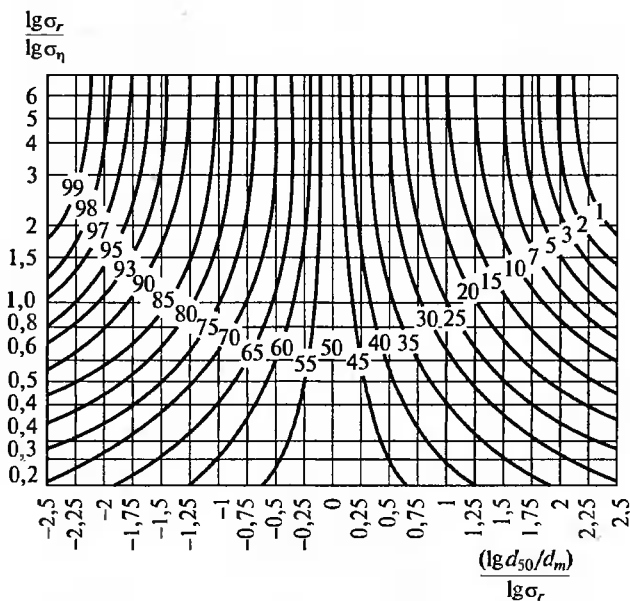


Рис. 8.14. Номограмма для определения эффективности пылеулавливания

Для нахождения значений $\lg \sigma_r$ необходимо иметь опытные данные по очистке в пылеуловителях определенной конструкции двух видов разной пыли.

По номограмме (рис. 8.14) определяют эффективность улавливания пыли в аппаратах мокрой очистки.

Номограмма построена для значений d_m и d_{50} пыли стандартной плотности $\rho_r = 1 \text{ г/см}^3$. Пересчитывают значения d_m и d_{50} от реальной плотности ρ_r к стандартной по формуле

$$d_{50} \text{ (или } d_m) = d_{50}^* \text{ (или } d_m^*) \sqrt{\rho_r^*/\rho_r}. \quad (8.9)$$

Установленная А. Ю. Вальдбергом и В. Н. Ужовым зависимость степени очистки от пыли от энергозатрат

$$\eta = 1 - \exp(bK_r^k), \quad (8.10)$$

где K_r — удельная энергия соприкосновения, Дж/м³, газов; b и k — константы, определяемые из дисперсного состава пыли [13, 14], позволяет рассчитать эффективность улавливания пыли. Вероятностно-энергетический метод расчета мокрых пылеуловителей основан на обобщенной зависимости

$$d_{50} = 188,32 K_r^{-0,645}, \quad (8.11)$$

полученной для стандартной плотности пыли $\rho_r = 1 \text{ г/см}^3$ и вязкости газов $\mu_r = 18 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$.

Эта зависимость может быть использована для выбора способов очистки и принципиальной конструкции скрубберов.

Пр и м е р. Дисперсный состав пыли (d_m и $\lg \sigma_r$), плотность пыли ρ_r^* , вязкость газов μ_r^* и требуемая эффективность пылеулавливания η . Принимаем $\eta = \Phi(x)$ по таблицам и рассчитываем значение d_{50}^*

$$\lg d_{50}^* = \lg d_m - x \sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_r}. \quad (8.12)$$

Приводим d_{50} к стандартным условиям:

$$d_{50} = d_{50}^* \sqrt{\rho_r^*/\rho_r}. \quad (8.13)$$

Затем обращаемся к значениям K_r и $\lg \sigma$, по которым выбирается тип скруббера (табл. 8.1).

Если же необходимо оценить эффективность действующего скруббера, то, зная дисперсный состав пыли, ее плотность и вязкость газов, имея гидравлические характеристики работы скруббера (ΔP_p , m и P_j), находим значение K_r и рассчитываем значение d_{50}^* . Проводим корректировку до значения d_{50} . Далее с помощью приведенных зависимостей определяем x и $\Phi(x)$ по таблицам, что соответствует значению эффективности пылеулавливания в данном скруббере.

Рекомендации к выбору типа скруббера*

| Скруббер | Величины для расчета K , | $\lg \sigma_n$ |
|------------------------------|-----------------------------|----------------|
| Польный | $mP_{\text{ж}}$ | 0,29 |
| Насадочный | ΔP_p | 0,21 |
| Тарельчатый | ΔP_p | 0,15 |
| Ударно-инерционного действия | ΔP_p | 0,29 |
| Вентури | $\Delta P_p + P_{\text{ж}}$ | 0,29 |

* m — удельное орошение, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $P_{\text{ж}}$ — давление распыляемой жидкости, Па; ΔP_p — гидравлическое сопротивление в рабочей зоне скруббера, Па.

Для очистки или обезвреживания *газообразных отходов* или технологических газов с целью извлечения из них сопутствующих (полезных) газообразных компонентов широко используют *метод абсорбции*. Абсорбция основана на непосредственном взаимодействии газов с жидкостями. Выделяют *физическую абсорбцию*, основанную на растворении газа в жидкости, и *хемосорбцию*, в основе которой лежит химическая реакция между газом и жидким поглотителем.

Абсорбционной очистке подвергают газообразные отходы, содержащие один или несколько извлекаемых компонентов. В зависимости от используемого абсорбента (табл. 8.2) и его селективности можно выделить либо один компонент, либо последовательно несколько. В результате абсорбции получают очищенный газ и насыщенный раствор, который должен быть легко регенерируемым с целью извлечения полезных газов и возвращения его на стадию абсорбции [2].

Требования, которым должна удовлетворять абсорбционная аппаратура, вытекают из физического представления явлений массопереноса в системах газ — жидкость. Процесс массопереноса протекает на поверхности раздела фаз, и в конструкциях аппаратов необходимо ее максимально развивать.

Для *поверхностных абсорберов* характерна конструктивно образованная поверхность, по которой в пленочном режиме стекает абсорбент (жидкость). Наиболее распространенной конструкцией таких противоточных абсорберов являются хорошо известные насадочные. Применяют кольца Рашига, Палля, седла Берля и другие насадки. Насадочные аппараты сложны, так как необходимо создать опорную решетку, оросители, обеспечить эффективное улавливание капель абсорбента.

В *распыливающих абсорберах* межфазная поверхность образуется мелкими каплями путем дробления, распыления жидкости. В объеме аппарата с помощью форсунок создаются капли, контактирующие с газовым потоком.

В *механических абсорберах* жидкость распыляется в результате подвода извне механической энергии, например, вращения валков или специальных распылителей. Эти конструкции достаточно сложны.

В поверхностных и распыливающих абсорберах сплошной фазой является газ, а распределенной — жидкость. В *барботажных абсорберах* в сплошном потоке жидкости распределяется газ, что

Таблица 8.2

Абсорбенты, применяемые для очистки отходящих газов [3]

| Поглощаемые компоненты | Абсорбенты |
|------------------------|---|
| N_2O_3 , NO_5 | Вода, водные растворы и суспензии: $NaOH$, Na_2CO_3 , $NaHCO_3$, KOH , K_2CO_3 , $KHCO_3$, $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$, $MgCO_3$, $Ba(OH)_2$, $BaCO_3$, NH_4HCO_3 |
| NO | Растворы $FeCl_2$, $FeSO_4$, $Na_2S_2O_3$, $NaHCO_3$, Na_2SO_3 , $NaHSO_3$ |
| SO_2 | Вода, водные растворы: Na_2SO_3 (18—25%-е), NH_4OH (5—15%-е), $Ca(OH)_2$, Na_2CO_3 (15—20%-е), $NaOH$ (15—25%-е), KOH , $(NH_4)_2SO_3$ (20—25%-е); $ZnSO_3$, K_2CO_3 ; суспензии CaO , MgO , $CaCO_3$, ZnO , золы; ксилидин — вода (1:1), диметиланилин $C_6H_3(CH_3)_2NH_2$ |
| H_2S | Водные растворы $Na_2CO_3 + Na_3AsO_4(Na_2HASO_3)$, As_2O_3 (8—10 г/л) + NH_3 (1,2—1,5 г/л) + $(NH_4)_3AsO_3$ (3,5—6 г/л); моноэтаноламин (10—15%-й); растворы K_3PO_4 (40—50%-й), K_3PO_4 (40—50%-е), NH_4OH , K_2CO_3 , $CaCN_2$, натриевая соль антрахинондисульфокислоты |
| CO | Жидкий азот; медно-аммиачные растворы $[Cu(NH_3)]_n \times COCN$ |
| CO_2 | Водные растворы: Na_2CO_3 , K_2CO_3 , $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$, NH_4OH , этаноламины RNH_2 , R_2NH_4 |
| Cl_2 | Растворы $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , $MgCO_3$, $CaCO_3$, $Na_2S_2O_3$; тетрахлоридметан CCl_4 |
| HCl | Водные растворы: $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 |
| HF , SiF_4 | Na_2CO_3 , $NaOH$, $Ca(OH)_2$ |

достигается на так называемых тарелках. Режим, в котором работают такие абсорберы, называют барботажным.

При создании промышленных систем очистки газов абсорбционными методами необходимо выделять схемы с одно- и многократным использованием абсорбента. В последней схеме абсорбция сочетается с десорбционными процессами. Однократное использование абсорбента характерно для процессов с низкой стоимостью поглотителя или когда после поглощения образуется готовый (целевой) продукт. Так как в очищаемом газе содержится незначительное количество улавливаемого компонента, то осуществляется циркуляция абсорбента, но без его регенерации.

Расчет процессов абсорбции основывается на материальном балансе, из которого определяют расходные параметры по абсорбенту и размеры аппаратов. Известны объем очищаемого газа G и начальные концентрации поглощаемого компонента в газовом потоке y_1 и в подаваемом на очистку абсорбенте x_1 . Необходимо знать конечную концентрацию x_2 абсорбента, т. е. степень насыщения потока абсорбента L поглощаемым компонентом. Тогда количество поглощаемого компонента G_k определяют по формуле

$$G_k = G(y_1 - y_2), \quad (8.14)$$

где y_2 — концентрация компонента в отходящем газовом потоке.

Общее уравнение материального баланса имеет вид

$$G(y_1 - y_2) = L(x_2 - x_1). \quad (8.15)$$

Конечное содержание поглощаемого компонента y_2 в газовом потоке должно быть согласовано с равновесной концентрацией его в жидкости, которую определяют по формуле

$$x_2^* = y_2/m, \quad (8.16)$$

где x_2^* — равновесная концентрация компонента в жидкости, отвечающая его содержанию в газовой фазе y_2 ; m — константа фазового равновесия (константа Генри).

Эффективность реальных аппаратов определяется по кинетическим закономерностям процессов массопередачи и может быть оценена по скорости растворения газа в жидкости за время τ через поверхность контакта фаз F :

$$G_k = dG/d\tau = KF\Delta. \quad (8.17)$$

Каждая из независимых переменных (K , м/с, — коэффициент массопередачи и Δ , кг/м³, — движущая сила процесса) зависит от многих параметров (технологических режимов, конструкций аппаратов) и может измеряться в разных единицах. Широко применяют выражение для коэффициента массопередачи K_s как от-

ношение его к площади поверхности контакта фаз или к площади насадки, тарелки.

Коэффициент массопередачи относят также к объему аппарата, получая объемный коэффициент массопередачи K_v , с^{-1} или ч^{-1} :

$$K_v = Ka, \quad (8.18)$$

где a — удельная поверхность контакта фаз.

Интенсивности переноса массы в газовой фазе (частный коэффициент массоотдачи β_r) и в жидкой (частный коэффициент массоотдачи $\beta_{\text{ж}}$) разные, поэтому β_r и $\beta_{\text{ж}}$ определяют по разным зависимостям, и их соотношения для разных процессов также разнятся. Тогда общий коэффициент массопередачи

$$K_s = 1/(1/\beta_r + 1/m\beta_{\text{ж}}). \quad (8.19)$$

Соотношение между $1/\beta_r$ и $1/m\beta_{\text{ж}}$ позволяет определить доли сопротивления в газовой и жидкой фазах в зависимости от m , зависящей от абсорбента, степени его насыщения, температуры и др.

Значения β_r и $\beta_{\text{ж}}$ находят по экспериментальным зависимостям, рекомендуемым для определенных конструкций массообменных аппаратов.

В случае прямолинейной равновесной зависимости и постоянства β_r и $\beta_{\text{ж}}$ по высоте абсорбера количество переданной массы

$$G(y_1 - y_2) = K_s F \Delta \quad (8.20)$$

или

$$\frac{y_1 - y_2}{\Delta} = \frac{K_s F}{G} = N. \quad (8.21)$$

Последнее выражение называют числом единиц переноса. По аналогии с записью коэффициентов массопередачи можно записать

$$N = N_r + mGN_{\text{ж}}/L, \quad (8.22)$$

где N_r и $N_{\text{ж}}$ — число единиц переноса в газовой и жидкой фазах соответственно.

Число единиц переноса через объемные коэффициенты массопередачи

$$N = K_v V_{\text{ап}}/G = K_v SH/G, \quad (8.23)$$

где $V_{\text{ап}}$ — объем аппарата; S — площадь поперечного сечения; H — высота аппарата.

Тогда высота аппарата

$$H = NG/(K_v S), \quad (8.24)$$

причем $G/(K_v S)$ отвечает высоте аппарата, для которого число единиц переноса равно единице и называется высотой единицы переноса.

Число единиц переноса N можно определить графически. Площадь, ограниченная кривой на таком графике, соответствует общему числу единиц переноса, а угол ее наклона позволяет определить константы b и k , входящие в формулу (8.10) [8].

Существенным недостатком сорбционных методов очистки (абсорбционных и адсорбционных) выбросных газов является необходимость многократной регенерации поглощающих растворов или частичной замены твердого сорбента, что значительно усложняет технологическую схему, увеличивает капитальные вложения и затраты на эксплуатацию.

8.1.5. Комбинированные методы и аппаратура очистки газов

Комбинированные методы и аппаратура очистки газов весьма экономичны и наиболее эффективны.

Рассмотрим конструкции аппаратов и технологическую схему очистки на примере очистки запыленного воздуха и газов стекольного производства.

Для обеспыливания процессов сушки, измельчения, просеивания, смешивания и транспортирования сырьевых материалов

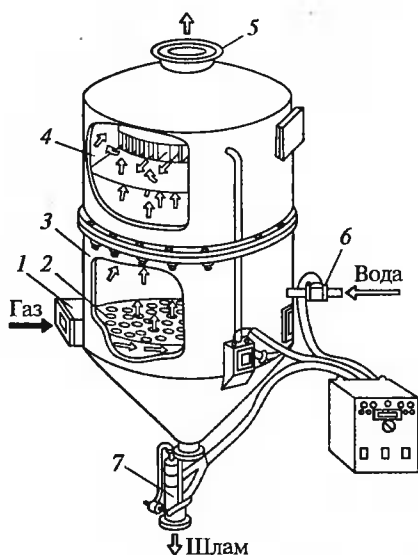


Рис. 8.15. Гидродинамический пылеуловитель ГДП-М:

1 — входной патрубок; 2 — газораспределительная решетка; 3 — корпус; 4 — каплеотделитель; 5 — выходной патрубок; 6 — регулятор подачи воды; 7 — разгрузочное устройство

разработан гидродинамический пылеуловитель ГДП-М (рис. 8.15) производительностью по очищаемому воздуху от 3 до 40 тыс. м³/ч. Принцип работы аппарата основан на барботаже запыленного воздуха (газа) через слой пены, образующейся на газораспределительной решетке. Решетка при этом погружена в пылесмачивающую жидкость.

Запыленный газ поступает в подрешеточное пространство и, вытеснив на решетку часть воды, образует на ней слой высоко-турбулентной пены. Пройдя через отверстия, газ очищается от пыли в момент контакта с пылесмачивающей жидкостью.

Очищенный газовый поток поступает в центробежный каплеотделитель, а затем выбрасывается в атмосферу. Пылеуловитель имеет следующую характеристику:

| | |
|--|---------|
| Производительность, тыс. м ³ /ч | 3—4 |
| Удельная нагрузка по газу, м ³ /(м ² ·ч) | 6500 |
| Гидравлическое сопротивление, кПа | 1,4—1,9 |
| Температура очищаемых газов, °С | ≤ 300 |
| Расход воды на очистку 1000 м ³ газа, л | 15—50 |
| Установочный объем, м ³ | 2,5 |
| Масса, кг | 1200 |

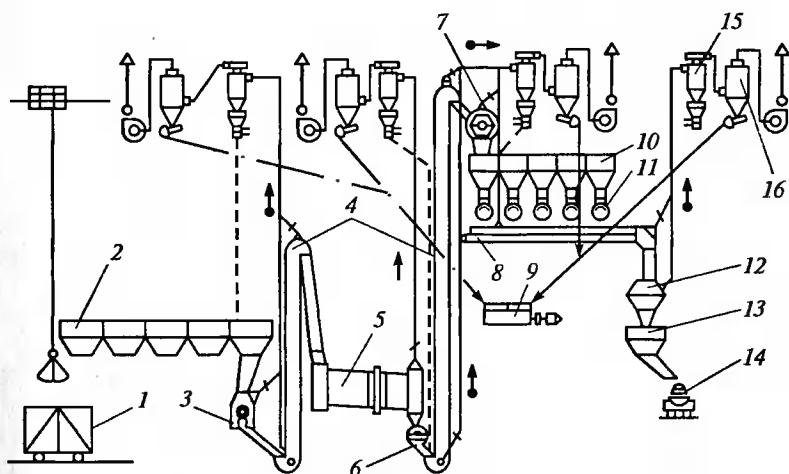


Рис. 8.16. Схема очистки технологических выбросов:

1 — железнодорожный вагон; 2 — приемный бункер; 3 — щековая дробилка; 4 — элеватор; 5 — сушильный барабан; 6 — дробилка; 7 — сито-бурат; 8 — ленточный конвейер; 9 — отстойник; 10 — бункер сырья; 11 — весы; 12 — смеситель шихты; 13 — бункер шихты; 14 — кубель; 15 — циклон ЦН-15; 16 — пылеуловитель ГДП-М

Эффективность комбинированной схемы очистки

| Материал | Технологический процесс | Количество очищаемого воздуха, м ³ /ч | Запыленность, г/м ³ | | | Степень очистки, % | |
|----------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|
| | | | на входе | после циклонов ¹ | на выходе | циклоном ¹ | пылеуловителем ² |
| Песок | Сушка | 7000 | 30,0 | 6,5 | 0,036 | 78,3 | 99,38 |
| | Просеивание | 2900 | 21,4 | 5,1 | 0,016 | 76,1 | 99,68 |
| | Дробление и сушка | 11 200 | 18,3 | 5,8 | 0,042 | 68,3 | 99,20 |
| Доломит | Просеивание | 3600 | 21,9 | 4,8 | 0,018 | 78,0 | 99,60 |
| Мел | Сушка | 29 530 | 14,9 | 3,9 | 0,066 | 73,8 | 98,30 |
| Карбонат натрия | Пневмотранспортирование | 1900 | 5,6 | 2,5 | 0,023 | 55,4 | 99,08 |
| Содосульфатная смесь | Сушка | 4000 | 21,8 | 6,1 | 0,023 | 71,9 | 99,62 |
| | Просеивание | 2800 | 22,8 | 4,3 | 0,014 | 81,0 | 99,67 |
| Сырьевые компоненты | Транспортирование и смешивание | 2500 | 30,0 | 3,6 | 0,012 | 88,0 | 99,66 |

Аппарат ГДП-М максимальной эффективностью обладает на второй ступени очистки (после циклонов) газов от мелкодисперсной пыли. Вариант принципиальной схемы комплексной очистки технологических выбросов составных цехов (дозировочно-смесительных отделений) показан на рис. 8.16. Уловленная циклоном пыль возвращается в расходный бункер соответствующего сырьевого материала.

Шлам, образующийся при работе мокрого пылеуловителя, отстаивают и высушивают, после чего используют как добавку к шихте после соответствующей корректировки ее состава. Осветленная вода из отстойника возвращается для повторного использования в пылеуловитель.

Показатели, характеризующие эффективность схемы очистки (содержание пыли в очищаемых газах снижается до нормируемых пределов), приведены в табл. 8.3.

Рекомендуемые режимные параметры и варианты комбинаций аппаратов для других схем очистки газов от пылей приведены в табл. 8.4.

Режимные параметры и варианты комбинаций пылеулавливающих аппаратов

| Материал | Обеспыливаемое оборудование | Объем отходящих газов, $10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ | Характеристика по группам классификации | | | | | | | Рекомендуемое число ступеней очистки | Пылеуловитель, II ступень |
|---------------|-----------------------------|--|---|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------|
| | | | пылегазовый поток | | | пыль | | | | | |
| | | | запыленность, $\text{г}/\text{м}^3$ | температура, $^{\circ}\text{C}$ | точка росы, $^{\circ}\text{C}$ | основная фракция | смачиваемость, % | слипаемость | удельное электросопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{м}$ | | |
| Пресс-порошок | Распылительные сушилки | 6—26 | 7,2—16,1 | 120—160 | 67—75 | < 20 мкм, 72—96 % | Хорошая, 94—98 % | Отсутствует, слабая, 0—1,9 Па | $1 \cdot 10^6$ — $3,5 \cdot 10^8$ (2-я группа) | 2 | Аппарат мокрой очистки |
| | Вращающиеся печи | 16—30 | 7,5—15,9 | 180—230 | 40—48 | > 20 мкм, 49—52 % | Хорошая и средняя, 50—86 % | Отсутствует, слабая, 0—1,2 Па | $6 \cdot 10^9$ — $5 \cdot 10^{10}$ (3-я группа) | 2 | Аппарат сухой очистки |
| Шамот | Шахтная печь (разгрузка) | 4,6 | 1,1 | 1,55 | — | — | — | Отсутствует | $7 \cdot 10^9$ (3-я группа) | 1 | |
| Шлак | Газоструйная мельница | 7 | 185,0—236,0 | 320 | — | < 20 мкм, 54 % | Хорошая, 97 % | Слабая, 0,95 Па | $1 \cdot 10^{10}$ (3-я группа) | 2 | Аппарат мокрой очистки |
| Глина | Сушильный барабан | 35—45 | 13,6—15,0 | 155—225 | 40—53 | > 20 мкм, 52—72 % | Хорошая, 92 % | Сильная, 2,5—3,4 Па | $5 \cdot 10^{13}$ (3-я группа) | 2 | |

8.2. Очистка и повторное использование технической воды и промышленных стоков

В процессах эксплуатации промышленного оборудования образуются сточные воды, которые требуют специальной очистки перед сбросом в канализационные системы. Наиболее распространенными загрязняющими веществами в поверхностных водах являются нефтепродукты, фенолы, легкоокисляемые органические вещества, соединения меди, цинка, аммонийный и нитратный азот, лигнин, ксантогенаты, анилин, метилмеркаптан, формальдегид и др. [15]. Например, сточные воды заводов черной и цветной металлургии загрязнены большим количеством взвешенных минеральных веществ, содержат цветные металлы и железо, сульфаты, хлориды, смолы и масла, серную кислоту, железный купорос. Нефтеперерабатывающие заводы и нефтепромыслы сбрасывают нефть и нефтепродукты, хлориды, взвешенные вещества, возможно присутствие железа и сероводорода. Большую опасность представляют сточные воды коксохимических предприятий: смолы, масла, фенолы, аммиак, цианиды, роданиды, большое количество солей неорганических кислот и взвешенных веществ. К сильно загрязненным сточным водам, трудно поддающимся очистке, относятся жидкие стоки целлюлозно-бумажных комбинатов: растворенные органические вещества, волокно, каолин и др. Машиностроительные и автомобильные заводы сбрасывают цианиды, хром, масла и окалину. Основные загрязнители текстильных предприятий — красители, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ).

8.2.1. Условия приема промышленных сточных вод в канализацию населенных мест

Сточные воды любого промышленного предприятия содержат специфические загрязнения, которые должны удаляться (нейтрализоваться) до смешения со стоками другого производства или населенного пункта [16]. Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о возможной реализации бессточных систем путем повторного использования очищенных сточных вод [1, 3, 15—22]. Повторное использование очищенных сточных вод в системах промышленного водоснабжения в полной мере зависит от конкретных местных условий, применяемых технологий и определяется главным образом его возможностью и целесообразностью.

В связи с этим на основе «Правил охраны поверхностных вод» (1991) для расчета допустимых концентраций загрязняющих веществ в производственных сточных водах с учетом требований к качеству очищенных вод в конкретных местных условиях разработаны «Правила приема производственных сточных вод в систе-

мы канализации населенных мест» (1991), направленные на предотвращение нарушений в работе очистных сооружений и безопасности их эксплуатации за счет правильной организации приема промышленных сточных вод в канализационную сеть населенных пунктов.

Существуют три основных вида очистных сооружений для сточных вод — *локальные, заводские, районные* или *городские*.

Локальные или *цеховые* очистные сооружения предназначены, прежде всего, для обезвреживания сточных вод или извлечения ценных компонентов непосредственно после технологических установок или цехов. На локальных установках механической очистки, коагуляции, электроосаждения, фильтрования, ультрафильтрации и др. очищают сточные воды, которые нельзя направлять без предварительной очистки в систему повторного и оборотного водоснабжения на общие заводские либо районные очистные сооружения.

Многие крупные предприятия располагают *общезаводскими* очистными сооружениями, которые имеют установки для механической, физико-химической и биологической очистки.

Районные или *городские* очистные сооружения предназначены для очистки хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод района или города. При совместной очистке сточных вод в последних регламентируются содержания растворимых, взвешенных и всплывающих веществ, продуктов, способных разрушать или засорять коммуникации, взрывоопасных и горючих веществ, а также температура.

Выбор метода очистки зависит от концентрации загрязнений в сточных водах и количества твердых отходов, образующихся в основном производстве и на стадии очистки, а также от эколого-экономических показателей процесса.

По этим причинам сточные воды промышленных предприятий должны подвергаться *обязательной локальной очистке* в целях: максимального снижения потерь сырья со сточными водами; сокращения потребления чистой воды; уменьшения сброса сточных вод по объему и количеству загрязняющих веществ в водоемы; снижения объема внезаводских очистных сооружений и капитальных вложений в их строительство.

8.2.2. Методы и оборудование для очистки технической воды и промышленных стоков

При очистке сточных вод промышленных технологий применяют фильтрование, осаждение, флотацию, коагуляцию, нейтрализацию и другие методы (рис. 8.17). Перспективны методы с использованием процессов мембранной технологии, электрокоагуляции, озонирования, биологической очистки [22].

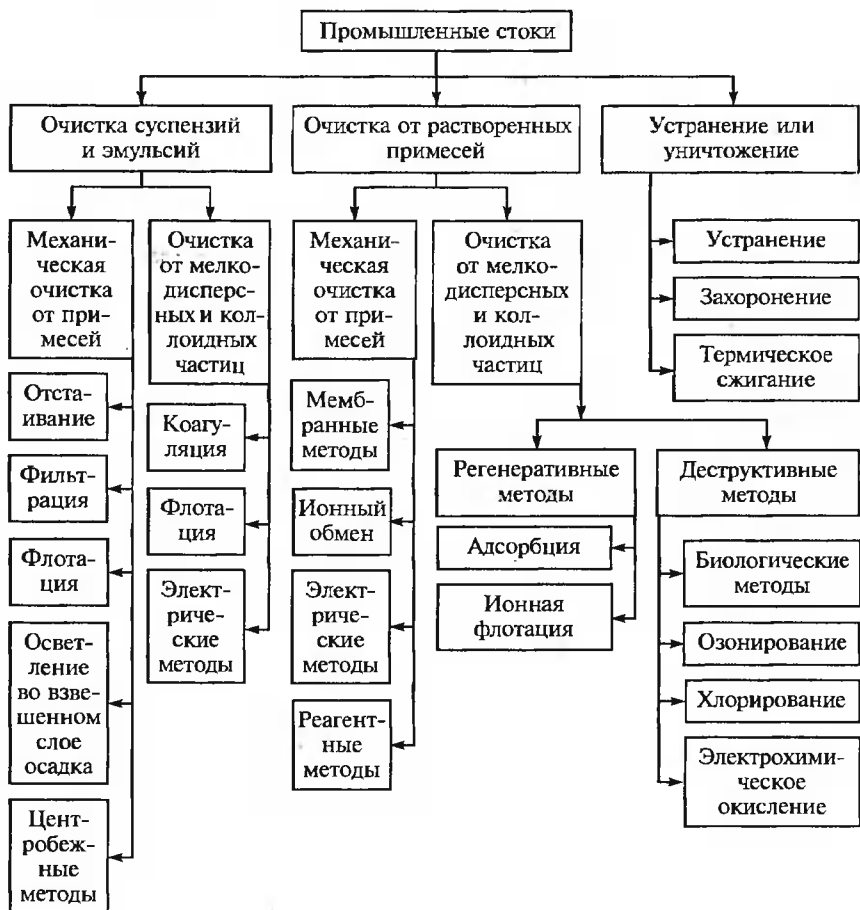


Рис. 8.17. Классификация методов очистки промышленных стоков

По содержанию примесей стоки разделяют на воды:
 с нерастворимыми примесями частиц размером больше 10^{-5} – 10^{-4} мм;
 представляющие коллоидные растворы;
 содержащие растворимые органические и неорганические вещества;
 содержащие вещества, диссоциирующие на ионы.

Способы очистки промышленных стоков можно классифицировать по составу фаз, дисперсному и химическому составам. Рассмотрим основные из них.

Механические методы очистки промышленных стоков от грубодисперсных примесей включают отстаивание в гравитационном

или центробежном поле, фильтрацию, флотацию, осветление во взвешенном слое осадка.

Для очистки от мелкодисперсных (от 0,1 — 10 мкм) и коллоидных (0,001 — 0,1 мкм) частиц, оседающих с малой скоростью, а также ПАВ используют коагуляцию и флокуляцию, обеспечивающие слипание частиц до крупных конгломератов, удаляемых затем механическим методом.

Для очистки от растворенных неорганических веществ применяют методы выпаривания, обратного осмоса, химического осаждения, электродиализа, нейтрализации.

Для очистки от растворенных органических веществ применяют биологическую очистку, адсорбцию, ионный обмен, отдувку газами, химическое осаждение, озонирование и хлорирование, обратный осмос, электрохимические методы и др.

Сильно концентрированные стоки в ряде случаев целесообразно уничтожать сжиганием, санитарным захоронением.

Механические методы очистки сточных вод

Из механических методов очистки промышленных стоков с целью осветления воды наиболее простым является ее отстаивание.

При расчете отстойной аппаратуры определяющей является скорость осаждения твердых или жидких частиц ω_0 , зависящая от размеров частиц d , их формы, плотности $\rho_{св}$ и вязкости $\mu_{св}$ сточной воды, скорости движения воды u , условий обтекания и сопротивления среды. Скорость осаждения ω_0 для ламинарных, переходных и турбулентных режимов определяют по формуле

$$\omega_0 = \frac{Re}{d\rho_b/\mu_b} = \frac{Ar}{(18 + 0,61\sqrt{Ar})d\rho_b/\mu_b}, \quad (8.25)$$

где Re — число Рейнольдса; $Ar = d^3\rho_b g(\rho_T - \rho_b)/\mu_b^2$ — число Архимеда; ρ_b, μ_b — соответственно плотность и вязкость чистой воды, ρ_T — плотность твердой фазы.

Вязкость и плотность таких систем могут меняться и с учетом объемной концентрации C_0 рассчитываются по формулам

$$\mu_{св} = \mu_b(1 + 2,5C_0); \quad (8.26)$$

$$\rho_{св} = \rho_b\varepsilon + \rho_T(1 - \varepsilon); \quad (8.27)$$

$$\varepsilon = V_{ж}/(V_{ж} + V_T), \quad (8.28)$$

где ε — объемная доля жидкой фазы; $V_{ж}$ и V_T — объем соответственно жидкой и твердой фаз.

Для реальных условий скорость стесненного осаждения монодисперсных сферических частиц рассчитывают по формуле Стокса:

$$\omega_0^{ст} = d^2g(\rho_T - \rho_b)R/18\mu_b, \quad (8.29)$$

где $R = \mu_b\varepsilon/\mu_{ст}$.

В горизонтальных песколовках (прямоугольных резервуарах с прямолинейным движением воды) осаждение песка близко к осаждению частиц в ламинарном режиме, и скорость его осаждения определяют по формуле Стокса.

Длину песколовки определяют по формуле

$$L = kH_p u / \omega_0. \quad (8.30)$$

Коэффициент, учитывающий турбулентность потока:

$$k = \omega_0 / \sqrt{\omega_0^2 - 0,5u}, \quad (8.31)$$

где H_p — расчетная глубина песколовки, м; u — средняя скорость движения воды, м/с.

Площадь зеркала воды, m^2 , глубину, м, и удельную нагрузку по воде, $m^3/(m^2 \cdot c)$, определяют из зависимостей

$$F = Q/q_0 = BL; H_p = Q/(Bu); q_0 = -0,43\omega_0/\lg(1 - \Theta), \quad (8.32)$$

где Q — расход воды, $m^3/сут$; B — ширина песколовки, м; Θ — эффективность очистки.

Выход сточной воды происходит через водослив, размеры которого определяют по формулам:

$$P = (h_{\max} - k_q^{2/3} h_{\min}) / k_q^{2/3} - 1; \quad (8.33)$$

$$b_c = q_{\max} / (m \sqrt{2q_0}) (P + h_{\max})^{3/2}, \quad (8.34)$$

где P — перепад уровней воды между дном песколовки и порогом водослива; h_{\max} , h_{\min} — уровень воды, м, при максимальном q_{\max} и минимальном q_{\min} расходах и $u = 0,3$ м/с; $k_q = q_{\max}/q_{\min}$; b_c — ширина водослива, м; $m = 0,35 \dots 0,38$ — коэффициент расхода водослива.

Скорость движения воды u при диаметре частиц $0,2-0,3$ мм принимается равной $0,3$ м/с, а время пребывания воды в песколовке 30 с.

Из песколовки с круговым движением воды наиболее эффективны аэрируемые песколовки.

Горизонтальные аэрируемые песколовки работают при $u = 0,08 \dots 0,12$ м/с, $B/H = 1 \dots 1,5$, общей глубине $0,7-3,5$ м, гидравлической крупности песка — скорости осаждения частицы в спокойной воде $\omega_0 = 18$ мм/с, интенсивности аэрации $3-5$ $m^3/(m^2 \cdot ч)$.

В песколовках с круговым движением воды объем аэрированной зоны изменяется от $25,8$ до 170 m^3 при интенсивности аэрации $3,5$ $m^3/(m^2 \cdot ч)$.

Для увеличения скорости осаждения частиц примесей в промышленные стоки вводят коагулянты и флокулянты, которые образуют неустойчивые полидисперсные системы [16, 18, 21, 22].

Продолжительность отстаивания определяют по формуле

$$T = \tau (H/h)^n, \quad (8.35)$$

где τ — продолжительность осаждения; H — глубина проточной части отстойника; h — высота эталонного цилиндра; n — коэффициент, учитывающий свойства взвешенных частиц ($n = 0,25; 0,4; 0,6$ для коагулянтов, мелкодисперсных минеральных и структурных тяжелых веществ соответственно).

Объем отстойной зоны $V_0 = QT$, а поверхность осаждения $F_0 = Q/\omega_0$.

Гидравлическую крупность определяют по зависимости

$$\omega_0 = \frac{1000kH}{\alpha\tau(kH/h)^n} - \omega, \quad (8.36)$$

где $k = 0,5; 0,35; 0,45$ — коэффициент, характеризующий конструкцию отстойника соответственно для горизонтального, вертикального и радиального типа; $\alpha = 0,66 \div 1,5$ — коэффициент, учитывающий влияние вязкости воды на скорость осаждения при изменении температуры от 40 до 50 °С; ω — вертикальная составляющая скорости движения воды в отстойнике; при изменении u от 5 до 20 мм/с величина ω изменяется от 0 до 0,5 мм/с.

Расчет отстойников с учетом эффективности осветления проводится в соответствии со стандартными методиками [3].

Коллоидные вещества, гидратированные взвеси, мелкодисперсные вещества вследствие их малой плотности (соизмеримой с водой) осаждаются медленно. Даже ввод коагулянтов не обеспечивает заданной степени очистки промышленных стоков.

С целью более глубокой очистки воды от таких примесей и ее осветления используют *флотацию*.

Флотацию растворенным в воде воздухом обычно ведут совместно с коагуляцией и флокуляцией взвеси для удаления коллоидных малоконцентрированных ($> 1\%$) примесей.

Пузырьки воздуха размером 10—100 мкм, выделяющиеся из воды, пересыщенной растворенным в ней воздухом, захватывают взвесь частиц. Воздух диспергируется турбиной — импеллером флотационной машины. Иногда воздух вводят под избыточным давлением 0,03—0,2 МПа через сопла или фильтры. Флотация осуществляется крупными (> 1000 мкм) быстро всплывающими пузырьками (при расходе воздуха 0,3—5 м³/м³ воды).

При *электрофлотации* очистку промышленных стоков осуществляют кислородом и водородом, которые выделяются на электродах, размещаемых в осветленной воде. Выделяющийся в ламинарном режиме газ с размером пузырьков 50 мкм обеспечивает высокий эффект очистки.

Биологическая и химическая флотация (автофлотация) происходят в результате взаимодействия пузырьков газа размером 5—50 мкм с поверхностью взвешенных в воде частиц, которые освобождаются от воды.

Наибольшую эффективность разделения достигают при соотношении между твердой и газовой фазами, равном 0,01—0,1, и определяют по формуле

$$G_{\text{воз}}/G_{\text{ч}} = 1,3Y^*(f_{\text{н}}P - 1)Q_1/(C_{\text{ч}}Q), \quad (8.37)$$

где $G_{\text{воз}}$, $G_{\text{ч}}$ — соответственно масса воздуха и частиц суспензии, г; Y^* — растворимость воздуха в воде при атмосферном давлении и рабочей температуре, см³/дм³; $f_{\text{н}} = 0,5 \div 0,8$ — степень насыщения; P — давление насыщения воды воздухом, Па; Q_1 — количество воды, насыщенное воздухом, м³/ч; $C_{\text{ч}}$ — концентрация твердой фазы (частиц) в суспензии, г/см³; Q — расход сточной воды, м³/ч.

На практике в сочетании с химической коагуляцией широко применяют *напорную флотацию*, позволяющую обеспечивать осветление воды за 15—40 мин со скоростью, в 4—5 раз превышающей скорость осаждения и при расходе энергии 0,1—0,2 кВт ч/м³.

Установка с рециркуляцией (рис. 8.18) работает следующим образом. Вода, смешанная с коагулянт в смесителе 1, поступает в камеру хлопьеобразования 2 с лопастной мешалкой, где образуются крупные хлопья коагулянта, сорбирующие коллоидные взвеси. Из камеры 2 коагулированная вода со скоростью 0,2—0,5 м/с перетекает по трубе 3 в центральную камеру 4. В трубу 3 врезан трубопровод, по которому со скоростью 1—2 м/с вводится вода, пересыщенная воздухом. Часть воды, очищенная во флотаторе насосом 7, подается под давлением в смеситель 9, куда компрессором 8 вводится сжатый воздух, и затем в сатуратор 10. В сатураторе за 1—3 мин происходит насыщение воды воздухом и отделение нерастворившегося воздуха. Насыщенная вода после

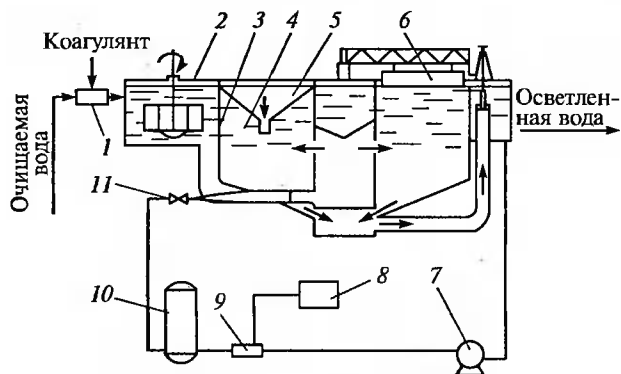


Рис. 8.18. Схема установки для напорной флотационной очистки воды с рециркуляцией:

1 — смеситель; 2 — камеры хлопьеобразования; 3 — труба; 4 — центральная камера; 5 — приемный бункер; 6 — скребок; 7 — насос; 8 — компрессор; 9 — смеситель; 10 — сатуратор; 11 — дросселирующее устройство

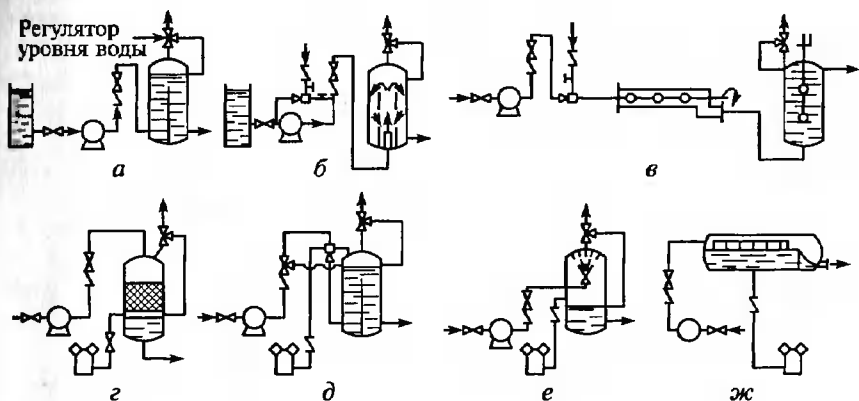


Рис. 8.19. Схемы сатураторов:

a — барботажного; *б* — эрлифтного; *в* — механического перемешивания; *г* — с кольцами Рашига; *д* — с эжекторной рециркуляцией воздуха; *е* — распылительного; *ж* — струйного

снижения давления в дросселирующем устройстве *И* становится пересыщенной и поступает во флотатор. Тонкий слой пены (10—15 см) со взвесью собирается скребком *б* в приемный бункер *5*.

Применяемые в отечественной и зарубежной практике сатураторы представлены на рис. 8.19. Недостатком барботажного и эрлифтного сатураторов является введение воздуха в насос, что снижает его производительность и КПД при увеличенном кавитационном износе. Более эффективны сатураторы механического перемешивания с кольцами Рашига, с эжекторной циркуляцией воздуха, распылительного и струйного, в которых воздух вводится после насоса. Для повышения эффективности используется насадочный с кольцами Рашига, а также распылительный и струйный сатураторы.

При расчете напорной флотации с сатурацией необходимо учитывать, что выделение пузырьков газа из воды происходит совместно с твердыми частицами.

Эффективность флотационного выделения частиц определяют по формуле

$$\eta_{\phi} = v_{\text{п}} T_1 [1 - \exp(-\alpha_{\text{т}} v_{\text{п}} T / C_{\text{г}})] / H_1, \quad (8.38)$$

где $v_{\text{п}}$ — скорость движения пузырьков; T_1 — время пребывания жидкости во флотаторе; $T = T_1 + T_2$; T_2 — время обработки до флотатора; $\alpha_{\text{т}}$ — число столкновений пузырьков газа с частицами на единице длины пути; $C_{\text{г}}$ — объемная концентрация газовой фазы; H_1 — высота слоя жидкости во флотаторе.

Выделение примесей из сточных вод эффективно осуществляется под действием центробежных и центростремительных сил в *открытых и напорных гидроциклонах*.

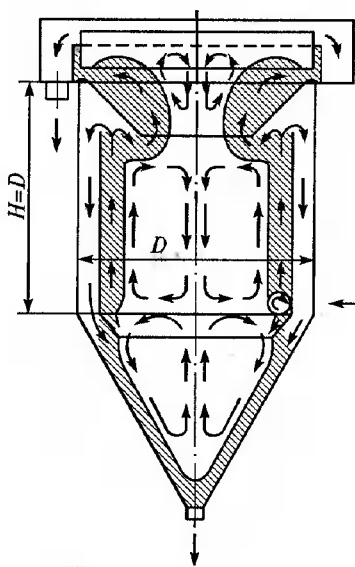


Рис. 8.20. Открытый гидроциклон с внутренним цилиндром и конической диафрагмой

Открытые гидроциклоны применяют для выделения из суспензий частиц диаметром $> 0,1$ мкм при очистке грубодиспергированных примесей.

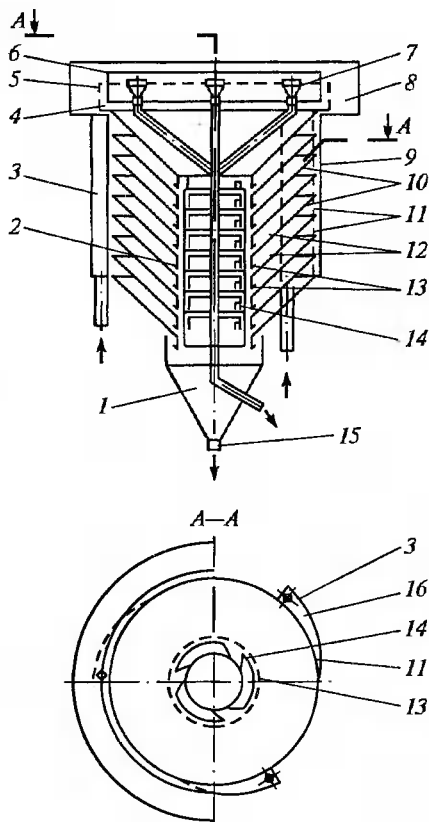
Модифицированный гидроциклон с конической диафрагмой и внутренним цилиндром (рис. 8.20) устраняет накопление взвешенных частиц под диафрагмой и их периодический вынос с осветленной водой.

Исходную суспензию подают тангенциально в нижнюю часть зоны, ограниченную внутренним цилиндром. Восходящий поток у верхней кромки цилиндра разделяется на основной поток, движущийся по спирали к центральному отверстию в диафрагме, и дополнительный, поступающий в зазор между стенками гидроциклона и цилиндра. В дополнительном потоке транспортируются выделившиеся в восходящем потоке взвешенные частицы.

В многоярусном гидроциклоне (рис. 8.21), состоящем из конической *1* и цилиндрической *9* частей, рабочий объем разделен коническими диафрагмами *10* на отдельные ярусы (зоны), работающие независимо одна от другой. В основе работы такого аппарата лежит принцип тонкослойного отстаивания. Исходная смесь поступает в аванкамеры *3* с распределительными лопатками *16* и равномерно распределяется между ярусами *12*. Вода из аванкамер *3* выводится через три щели *11*, расположенные по окружности циклона через 120° и равномерно по его высоте. Поступающая сточная вода движется по нисходящей спирали к центру. Частицы тяжелее воды оседают на нижних диафрагмах ярусов, сползают к центру и, попав под шламозадерживающие козырьки *13*, через кольцевую щель *2* опускаются в коническую часть. Масло с примесями, выделившееся в ярусах, всплывает к верхним коническим диафрагмам *10*, задерживается перегородкой *6* и попадает в водосборник, откуда маслосборными воронками *7* через трубы *4* удаляется из гидроциклона. Осветленная вода выводится через три тангенциальных выпуска *14*. В центральной части циклона жидкость поднимается вверх, через водослив *5* переливается в лоток *8* и удаляется из циклона. Осадок из конической части *1* удаляется через разгрузочное отверстие *15* под действием гидростатического напора.

Рис. 8.21. Многоярусный низконапорный гидроциклон (конструкция ВНИИВодГео):

1 и 9 — коническая и цилиндрическая части; 2 — кольцевая щель; 3 — аванкамеры; 4 — труба; 5 — водослив; 6 — перегородки; 7 — маслосборные воронки; 8 — лоток; 10 — конические диафрагмы; 11 — щели; 12 — ярусы; 13 — шламосадерживающие козырьки; 14 — выпуски; 15 — разгрузочное отверстие; 16 — распределительная лопатка



В общем случае при расчете гидроциклонов, применяя данные кинетики отстаивания, рассчитывают гидродинамические параметры циклона и определяют его геометрические характеристики. Для всех конструкций удельную гидравлическую нагрузку определяют по формуле [23]

$$q_0 = 3,6k\omega_0, \quad (8.39)$$

где k — коэффициент (0,61 и 1,98 для гидроциклонов без внутренних устройств и с диафрагмой соответственно); ω_0 — гидравлическая крупность задерживаемых частиц, мм/с.

Задавшись ω_0 по нагрузке q_0 и назначаемому диаметру цилиндрической части аппарата D , определяют его производительность

$$Q_1 = 0,785q_0D. \quad (8.40)$$

Геометрические размеры циклонов выбирают по рекомендациям [4]. Зная общее количество сточных вод $Q_{об}$, определяют число гидроциклонов

$$N = Q_{об}/Q_1. \quad (8.41)$$

Для многоярусных циклонов гидравлическую нагрузку определяют по уравнению

$$q = 3,6 \left\{ 1 - \left[(d_{ц0} + 2b)/D \right]^2 \right\} \omega_0 N_{я} \eta, \quad (8.42)$$

где $d_{ц0}$ — диаметр центрального отверстия в диафрагме, м; b — ширина шламовыводящих щелей, м; $N_{я}$ — число ярусов; $\eta = 0,75$ — коэффициент при нагрузке $q = 2 \div 2,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

При очистке сточных вод на установках с производительностью до $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ от частиц крупностью более $0,2\text{--}0,3 \text{ мм}$ используют циклоны с внутренним цилиндром и конической диафрагмой. Фактор разделения определяется отношением скоростей движения частицы под действием центробежных сил к скорости осаждения в гравитационном поле:

$$F_p = v_r/(gr), \quad (8.43)$$

где v_r — скорость движения частицы под действием центробежных сил, м/с ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; r — радиус частицы, м .

Их характеристики благодаря высокой эффективности и компактности позволяют использовать гидроциклоны вместо отстойников, центробежных сепараторов, центрифуг, фильтров или в сочетании с ними.

Эффективность работы гидроциклонов определяют:

седиментационные свойства примесей в сточной воде (гидравлическая крупность отделяемых частиц);

размеры циклона (диаметр и геометрические соотношения между элементами аппарата);

производительность аппарата, зависящая от его размеров и перепада давлений в нем (расходные характеристики);

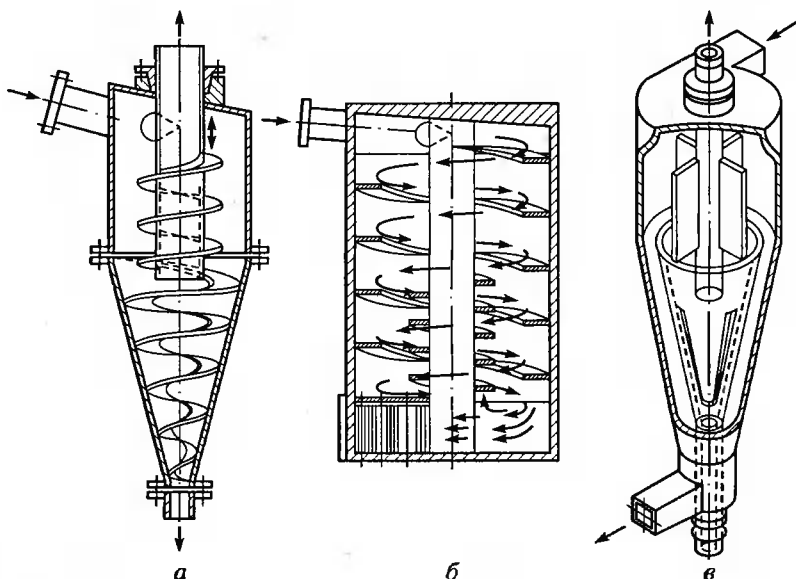


Рис. 8.22. Конструкции гидроциклона с винтовыми вставками (а), цилиндрического прямоточного гидроциклона со спиральными направляющими потока (б) и турбоциклона с вращающимся конусом (в)

затраты энергии на создание центробежного поля, зависящие от его гидравлического сопротивления.

Для расчета гидроциклонов А. М. Кутеповым и Е. А. Непомнящим была предложена стохастическая модель разделительных процессов. Введя ряд предпосылок и используя числовые методы решения с применением ЭВМ, они получили безразмерные параметры α , γ , θ и r_0 , характеризующие интенсивность центробежного поля, перемешивания частиц, геометрические размеры аппарата и свойства разделяемых частиц при разном времени их пребывания в аппарате.

Используя кривые зависимостей абсолютной величины уноса и количественного содержания отдельных фракций в осветленном и сгущенном потоках гидроциклонов для разных конструкций (рис. 8.22), можно рассчитать основные параметры аппарата и характеристики разделения.

Исходными данными являются параметры суспензии, показатели разделения которой определяют из следующих соотношений: $H_{ц} = (2 \dots 3)D$; $d_b = (0,24 \dots 0,28)D$; $d_c = 0,3D$; $d_{ж} = 0,5d_c$; $m = 1$; $\alpha = 5^\circ$; β берется минимальным.

Порядок расчета гидроциклона с винтовым входным устройством.

1. Задают диаметр D и по указанным соотношениям определяют остальные геометрические размеры. Общую производительность гидроциклона Q_0 , производительность по осветленной жидкости и сгущенной суспензии $Q_{ж}/Q_c$ определяют по формулам

$$Q_0 = Y^* d_b \sqrt{d_c^2 + d_{ж}^2} \sqrt{2gP_0/\rho_c}; \quad (8.44)$$

$$Y^* = 24 \cdot 10^4 (H_{ц}/D)^{0,1} (d_{ж}/d_c)^{-0,17}; \quad (8.45)$$

$$Q_{ж}/Q_c = 0,95 Q_0^{-0,19} (d_{ж}/d_c)^{2,34}, \quad (8.46)$$

где Y^* — условный коэффициент расхода; d_b — эквивалентный диаметр винтового канала; d_c — диаметр патрубка суспензии; $d_{ж}$ — диаметр патрубка жидкости; P_0 — давление на входе в гидроциклон; D — диаметр гидроциклона; $H_{ц}$ — высота цилиндрической части; ρ_c — плотность жидкой фазы (суспензии).

2. Определяют среднюю скорость суспензии на входе в аппарат и среднее значение вертикальной скорости:

$$w_0 = Q_0/F_{вх}; \quad (8.47)$$

$$v_{ср} = H_{ц} Q_0/v_r, \quad (8.48)$$

где v_r — радиальная составляющая скорости.

3. Рассчитывают безразмерные параметры $\bar{\lambda}$, \bar{T} и $\bar{\theta}$ и определяют унос твердых частиц S_0 с осветленной жидкостью, %:

$$S_0 = 7,48 (\bar{T} \bar{\theta} / \bar{\lambda})^{0,28}. \quad (8.49)$$

4. Определяют унос твердых частиц со сгущенной суспензией, %:

$$S_c = 100 - S_o. \quad (8.50)$$

5. Определяют концентрацию частиц в продуктах разделения (в осветленной жидкости и сгущенной суспензии), кг/м³:

$$C_o^p = Q_o C_o S_o / 100 \cdot Q_c; \quad (8.51)$$

$$C_c^p = Q_o C_o S_c / 100 \cdot Q_c. \quad (8.52)$$

Если расчетное значение $C_o^p > C_c^p$, то задаются новым значением D и проводят новый расчет, пока не выполнится условие $C_o^p \leq C_c^p$.

6. Определяют количество гидроциклонов.

Обычно гидроциклоны устанавливают в комбинированной схеме очистки жидкостей, когда другие методы дороги или нецелесообразны, например для улавливания пыли свинцового сурика в системе вакуумного транспортирования и пылеулавливания.

Химические и физико-химические методы очистки сточных вод

Сточные воды, содержащие минеральные кислоты или щелочи, подвергают *нейтрализации* для предупреждения коррозии материалов очистных сооружений, выделения солей металлов и предупреждения нарушения биохимических процессов в сточных водах.

Нейтрализацию осуществляют смешением кислых и щелочных сточных вод, добавлением реагентов, фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы и абсорбцией водами: кислых газов — щелочными, аммиака — кислыми.

Для очистки кислых и щелочных сточных вод используют нейтрализацию оксидов кальция гидроксидами натрия, калия и кальция, а также карбонатами кальция, магния и натрия.

Массовый расход реагентов для нейтрализации сточных вод, кг/ч:

$$G = k_3 Q_p C_a 100 / B, \quad (8.53)$$

где k_3 — коэффициент запаса; Q_p — расход реагента, м³/ч; C — концентрация кислоты или щелочи, кг/м³; a — удельный расход реагента, кг/кг; B — количество активной части в товарном продукте, %.

Теоретический расход реагентов 0,4—2,5 кг/кг. Время взаимодействия сточных вод и реагента превышает 5 мин, для кислых стоков с ионами металлов — 30 мин.

Очистка сточных вод окислителями. Наряду с традиционными окислителями, такими как хлор и хлорсодержащие вещества (гипохлорит натрия, диоксид хлора и др.), пиролизит, кислород воздуха, в последние годы применяют озон.

Для глубокой очистки воды с успехом применяют озонирование, которое в ряде процессов может заменить коагуляцию с бы-

стрым фильтрованием, адсорбцию на некоторых стадиях очистки сточных вод, а в сочетании с другими методами — биохимическую очистку.

Наиболее перспективно применение озона для очистки: воды — от СПАВ, нефтепродуктов, сливных вод — на стадиях выработки стеклоизделий.

Озонолиз — процесс фиксации озона на двойной или тройной углеродной связи с последующим ее разрывом и образованием озонидов, которые неустойчивы и быстро разлагаются.

Каталитическое воздействие озонирования состоит в росте окисляющей способности кислорода, присутствующего в озонированном воздухе.

Совокупность всех форм окисляющего и дезинфицирующего действия озона обеспечивает его применение на всех стадиях очистки сточных вод и подготовки воды к использованию в процессе производства. При совместном действии озонолиза и окисления радикалами удаляются коллоидные вещества, токсичные микрозагрязнители, растворенные органические вещества.

Наиболее эффективно используются инжекторные (ИМТ-600) и роторные аппараты, напорные трубопроводы, змеевики.

Инжекторные и роторные аппараты дают равномерное смешение фаз, высокие скорость реакции и степень очистки, более полное использование озона.

Введением озона непосредственно в напорный трубопровод обеспечиваются простота и компактность смесителя, уменьшение потерь озона и высокий эффект очистки при отсутствии контактных камер. Сточную воду подают насосом через змеевик, в который с помощью инжектора также вводят озоновоздушную смесь. После змеевика вода с большой скоростью проходит трубу воздухоотделения и переливается через верхнюю кромку, освобождаясь от пузырьков воздуха. Эффективность использования озона в змеевике возрастает до 80—90 %, а скорость окисления вдвое больше по сравнению с барботажными аппаратами. Эффективность барботажных реакторов с насадочными колонками повышают в результате использования элементов из керамических и металлокерамических труб с размером пор 100 мкм.

Для интенсификации окисления применяют *кавитирующий эффект*, который достигается в кавитационном аэраторе или в центробежной распылительной машине, а также при использовании ультразвуковой энергии. Наибольшее окисление достигается в центробежной распылительной машине (рис. 8.23), где интенсивность механических колебаний в зоне смешения достигает 57 Вт/см². Особенность конструкции машины — диски-распылители 1, установленные в камере смешения 4. При частоте вращения дисков-распылителей 42 м/с возникает кавитация. Обработанная вода, подаваемая через патрубки 2, всасывается через полый вал 7, дис-

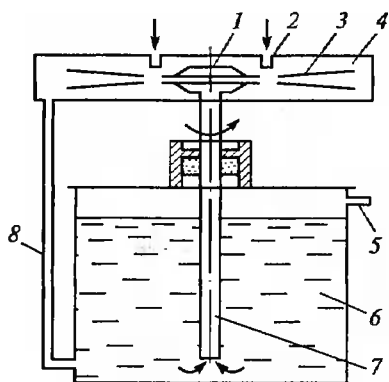


Рис. 8.23. Центробежная распылительная машина:

1 — диск-распылитель; 2, 5 — патрубки; 3 — направляющие; 4 — камеры смешения; 6 — озонированная вода; 7 — полый вал; 8 — трубопровод

пергируется дисками, образуя на выходе из зазора между дисками тонкую пленку. Обработанная вода выводится через патрубок 5. Пленка проходит между стационарными направляющими 3, распыляется на капли и пузырьки, которые смешиваются с озонированным воздухом, вводимым через боковые патрубки. Озонированная вода 6 по трубопроводу 8 возвращается в цикл.

Озонирование используют в основном для доочистки стоков после флотации, дезинфекции, флокуляции, фильтрации на фильтрах песчаных и с активированным углем.

Мембранная очистка сточных вод. К основным мембранным методам разделения жидких систем

относятся обратный осмос, ультрафильтрация, микрофильтрация, электродиализ. Преимущества этих методов заключаются в возможности ведения процесса при нормальной температуре (кроме процесса испарения через мембрану) без фазовых превращений и при меньших энергетических затратах, чем в других методах очистки, простоте оформления аппаратуры, высокой степени разделения, позволяющей увеличить выход готового продукта.

Процессы обратного осмоса, ультра- и микрофильтрации ведут под избыточным давлением и относят к группе баромембранных процессов, в которых молекулы или ионы растворенных веществ переносятся через полупроницаемую перегородку (мембрану) под давлением, превышающим осмотическое. Под осмосом понимается самопроизвольный перенос (молекулярная диффузия) растворителя через мембрану.

Различие между обратным осмосом и ультрафильтрацией состоит в том, что при ультрафильтрации разделяются низкоосмотические растворы молекулярной массой больше 500, а при обратном осмосе разделяются растворы низкомолекулярных веществ с высоким осмотическим давлением.

Движущая сила ультрафильтрации и обратного осмоса определяется разностью давлений рабочего и осмотического разделяемого раствора у поверхности мембраны

$$\Delta P = P - \Pi_1, \quad (8.54)$$

а с учетом осмотического давления пермеата (фильтрата) Π_2

$$\Delta P = P - (P_1 - P_2) = P - \Delta P. \quad (8.54)$$

Рабочее давление при обратном осмосе составляет 5—8 МПа. Осмотическое давление высокомолекулярных соединений мало, что позволяет проводить ультрафильтрацию при невысоком давлении (0,2—1 МПа). Ультрафильтрацией разделяют растворы высокомолекулярных и низкомолекулярных соединений.

Процесс выделения из раствора коллоидных частиц размером 0,1—10 мкм при давлении в десятки—сотни килопаскалей относится к микрофильтрации и занимает промежуточное положение.

В отличие от обычной фильтрации, при которой продукт в виде осадка откладывается на поверхности мембраны, при обратном осмосе и ультрафильтрации образуются два раствора, один из которых обогащен растворенным веществом.

Баромембранные процессы позволяют разделить частицы по размерам, мкм: обратный осмос — 0,0001—0,001, ультрафильтрация — 0,001—0,02 и микрофильтрация — 0,02—1,0.

При деминерализации сточных вод и разных смесей используют диализ и электродиализ.

Диализ — процесс разделения веществ в результате их неодинаковой диффузии через мембрану. По существу, диализ является разновидностью ультрафильтрации.

Более широкое применение при обработке воды и растворов находит в последние годы электродиализ. Электродиализные аппараты с биполярными и ионообменными мембранами применяют для выделения отдельных компонентов из сточных вод, регенерации и вторичного использования фтористоводородной и азотной кислот, щелочей из травильных растворов и из жидкостей после скрубберов для очистки газов, сульфата натрия, серной кислоты и т. д.

Для очистки сточных вод применяют мембранную установку, включающую наряду с мембраной и фильтр-держателем, образующими мембранный модуль, емкости, насосы, контрольно-измерительную аппаратуру и системы очистки мембран.

При выборе и разработке мембранных установок необходимо учитывать характер фильтруемой среды (жидкость или газ), вид целевого продукта (фильтрат или задержанные мембраной частицы); минимальный размер выделяемых частиц и размер пор мембраны.

Оптимальный размер пор выбирают на основе данных по селективности мембран от размера пор при максимально возможной производительности; объему перерабатываемой жидкости (малый или большой объем определяют сложность конструкции мембранного модуля); виду раствора (водный или неводный). В последнем случае агрессивность жидкой среды требует применения мембран и опорных элементов, стойких к действию растворителя.

Необходимо выполнение ряда требований.

1. Материалы разделительной системы должны работать под высоким давлением и быть устойчивыми к коррозии.
2. Установки должны быть компактны, просты в обслуживании, быстро разбираться и собираться при ремонте и транспортировании.
3. Должна обеспечиваться возможность периодического промывания установки для восстановления производительности мембран.
4. Высокая скорость течения жидкости над мембраной и ее равномерное распределение по секциям и элементам мембранного модуля должны предотвращать отложение осадка на мембранах и снижение влияния концентрированной поляризации.
5. Должна обеспечиваться возможность нагрева или охлаждения обрабатываемых жидкостей.

При создании мембранных модулей необходимо обеспечить их механическую прочность и герметичность.

Классифицируют мембранные модули по способу укладки мембран, по типу корпусов (корпусные и бескорпусные), по условиям демонтажа (разборные и неразборные), по положению мембранных элементов (горизонтальные или вертикальные) и по режиму работы.

По способу укладки мембран используют аппараты четырех типов: с плоскими мембранными элементами; с трубчатыми элементами; с элементами рулонного типа; с мембранами в виде полых волокон.

Пленочные мембраны входят в состав разделительного элемента и размещаются на пористой опоре-дренаже с подложкой. Иногда подложка играет роль опоры, и в этом случае мембраны размещаются с обеих сторон подложки.

Аппараты с плоскими мембранными элементами выпускают корпусными и бескорпусными, периферийными, с общим или отдельным из каждого элемента выводом пермеата. Элементы выполняют круглыми, эллиптическими и квадратными.

На рис. 8.24 представлен аппарат с плоскими мембранными элементами, работающий с растворами при давлении 2 МПа, рН = 14 и температуре до 100 °С. Аппарат представляет пакет мембранных элементов 9 эллиптической формы, находящийся между круглыми фланцами 11. Соосность элементов и их затяжка обеспечиваются направляющими штангами 8. Элементы состоят из пластин 7, покрытых с обеих сторон мембранами 6. Отверстия в пластинах и мембранах точно совмещаются и герметизируются со стороны входа разделяемого раствора в отверстие 10 проточным кольцом 5, а со стороны выхода из него — замковым кольцом 4. В проточных кольцах 5 выполнены прорези в радиальном направлении, обеспечивающие подачу раствора из отверстия одного элемента в межмембранный канал и отвод в другое отвер-

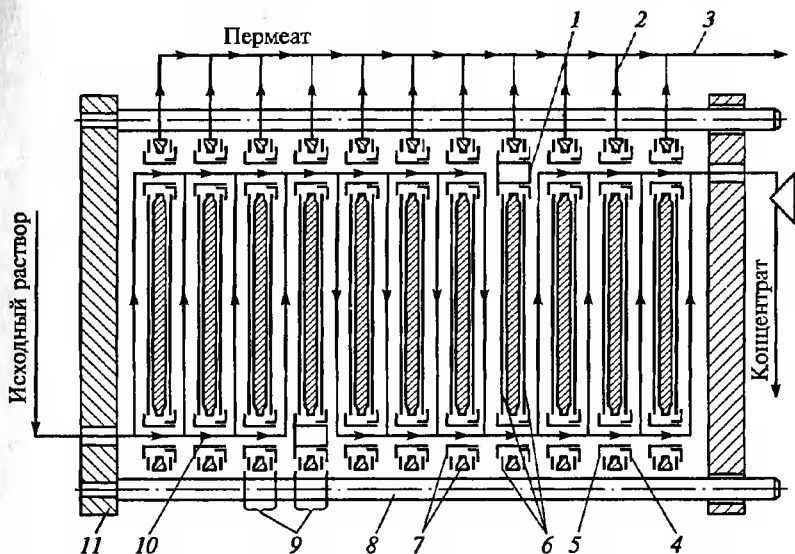


Рис. 8.24. Аппарат с плоскорамными элементами:

1 — заглушка; 2 — шланг; 3 — общий коллектор; 4 — замковое кольцо; 5 — проточное кольцо; 6 — мембраны; 7 — пластины; 8 — направляющая штанга; 9 — мембранные элементы; 10 — отверстия; 11 — фланец

стие следующего элемента. Для распределения разделяемого раствора по секциям одно из отверстий на соответствующих элементах перекрывают заглушкой 1. Пермеат отбирается из мембранных элементов по гибким капиллярным шлангам 2 и собирается в общий коллектор 3. Опорная пластина выполнена в виде двух склеенных пластмассовых дисков с разветвленной сетью внутренних каналов разного сечения для сбора пермеата. Недостатки аппаратов с эллиптическими элементами — нерациональный раскрой мембран, опорных пластин, конструктивная и монтажная сложность.

В конструкции РХТУ им. Д. И. Менделеева использован секционный модульный метод сборки: секции соединены параллельно, а элементы внутри секций — последовательно. Аппараты имеют следующие характеристики:

| | | |
|---|-------------|---------------|
| Рабочая поверхность мембран, м ² | 2 | 80 |
| Производительность по фильтрату, м ³ /сут | 0,5 | 20 |
| Рабочее давление, МПа | 10 | 10 |
| Плотность укладки мембран, м ² /м ³ | 180 | 270 |
| Рабочий диаметр мембран, мм | 250 | 370 |
| Число мембран | 50 | 750 |
| Габаритные размеры, мм | 350×350×300 | 600×1000×1200 |
| Масса с водой, кг | 50 | 1000 |

Аппараты с трубчатыми мембранными элементами можно использовать для разделения систем (сред) со взвешенными частицами, где не требуется высокая степень предварительной очистки разделяемых систем.

По конструкциям и способам изготовления элементы делят на три типа: с подачей разделяемых сред: внутрь трубки; снаружи трубки; одновременно внутрь и снаружи трубки.

Основные достоинства трубчатых мембранных элементов — низкое гидравлическое сопротивление, равномерное движение потока раствора над мембраной с высокой скоростью, отсутствие застойных зон, возможность механической очистки мембранных элементов от осадка без разборки аппарата, малая металлоемкость при бескорпусном выполнении, компактность установки.

Недостатки устройств: малая удельная поверхность мембран ($60—200 \text{ м}^2/\text{м}^3$), повышенная точность при изготовлении дренажного каркаса обычно из перфорированных металлических трубок, пористых керамических, металлокерамических, пластмассовых и графитовых композитных и стеклопластиковых трубок.

Конструкция блока стеклопластиковых каркасов из семи трубок представлена на рис. 8.25. Для уменьшения расхода материалов наружная поверхность труб может быть выполнена в виде шестигранника. Это также придает жесткость корпусу.

Аппараты с элементами рулонного типа (спиральные) имеют высокую удельную поверхность ($300—800 \text{ м}^2/\text{м}^3$), малую металлоемкость, удобны при монтаже и демонтаже элементов. К недостаткам элементов можно отнести высокое гидравлическое сопротивление межмембранных каналов и сложность монтажа.

Аппараты могут содержать мембранные элементы: с несколькими пакетами и одной пермеатотводящей трубкой; рулонные совместно навитые; несколькими пермеатотводящими трубками или с каналами для сбора пермеата.

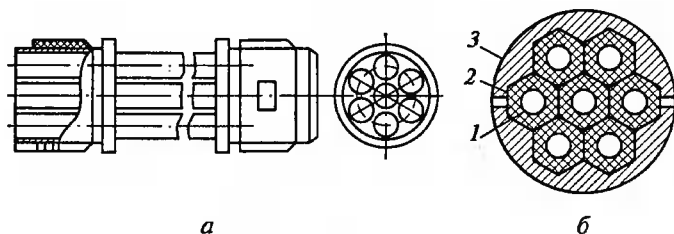


Рис. 8.25. Варианты блочного размещения труб в разделительных элементах:

a — блок стеклопластиковых каркасов; *б* — блок шестигранных труб: 1 — мембрана; 2 — подложка; 3 — корпус

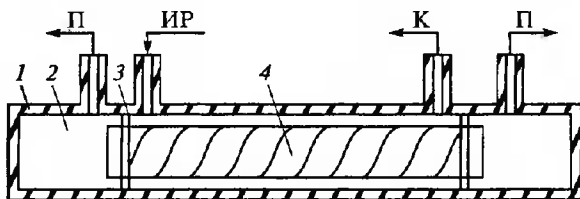


Рис. 8.26. Аппарат с пучком параллельно расположенных полых волокон: 1 — корпус; 2 — сборник пермеата; 3 — трубная решетка; 4 — спиральное волокно; П — пермеат; ИР — исходный раствор; К — концентрат

В этих аппаратах пермеат поступает под давлением в напорный канал элемента параллельно оси трубки.

Аппараты с мембранами в виде полых волокон вследствие развитой удельной проницаемости и удельной поверхности (20—30 тыс. $\text{м}^2/\text{м}^3$) нашли широкое применение при разделении сред обратным осмосом и ультрафильтрацией [24].

Полые волокна диаметром 45—900 мкм и толщиной стенки 10—50 мкм применяют в обратном осмосе, а диаметром 200—2000 мкм и толщиной 50—200 мкм — при ультрафильтрации.

В аппарате с параллельным расположением полых волокон (рис. 8.26) последние собраны в один пучок спирально навитой нитью. Она же обеспечивает зазор между отдельными волокнами. Раствор может подаваться как вдоль поверхности полых волокон, так и по их капиллярным каналам.

Недостатком таких аппаратов является малая интенсивность перемешивания раствора, жесткое крепление полых волокон в трубных решетках и, следовательно, трудность обработки растворов, содержащих взвешенные частицы.

При непрерывном процессе раствор проходит мембранный аппарат только раз и выходит из установки с заданной концентрацией. Применяют также схемы проточно-циркуляционного типа, где часть концентрата возвращается в исходный раствор, а оставшая часть с требуемой концентрацией выводится из системы потребителю.

Одноступенчатые соединения аппаратов используют при разделении низкоконцентрированных растворов, а многоступенчатые (рис. 8.27) — при очистке более концентрированных растворов (в этом случае исходным раствором для следующей ступени служит фильтрат предыдущей ступени, которая работает при более низком давлении).

Используемые в модулях мембраны должны обладать высокими разделяющей способностью (селективностью), удельной производительностью (проницаемостью), прочностью и химической стойкостью к действию очищаемых сред. Из мембран

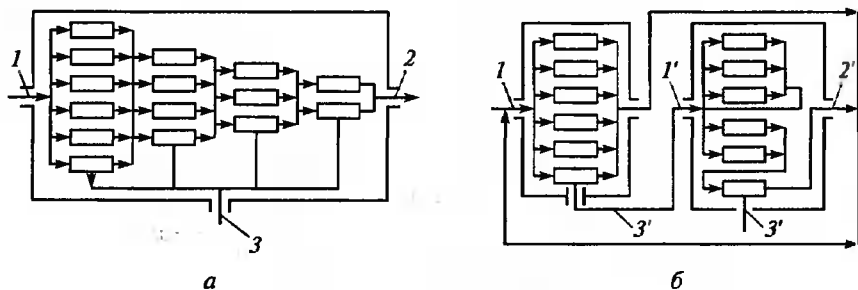


Рис. 8.27. Схемы установок обратного осмоса с параллельными (а) и параллельно-последовательными (б) соединениями аппаратов:

1, 1' — исходный раствор; 2, 2' — концентрат; 3, 3' — фильтрат

многих типов можно выделить полимерные и с жесткой структурой.

Полимерные мембраны — разработчик АО «Полимерсинтез» (ЗАО «Мембраны»), г. Владимир — типа МГА-90, МГА-100 для обратного осмоса с содержанием до 20 кг/м^3 , — предназначены для очистки сточных вод и промышленных стоков. Мембраны типа УАМ-80, УАМ-500 используют для разделения, в частности водомасляных эмульсий, пигментных красителей методом ультрафильтрации. Мембраны типа МГМ-80, МГП-100 рекомендуются для разделения, концентрирования агрессивных сред с рН 1...12, содержащих большинство органических растворителей, и выдерживают в водных средах температуру до 150°C .

Этилцеллюлозные мембраны типа УЭМ-200, УЭМ-500 предназначены для концентрирования, разделения и очистки разных веществ в кислых и особенно щелочных средах. Удельная производительность по воде $33\text{—}300 \text{ см}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$, средний диаметр пор $(2\text{—}4,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Мембраны с жесткой структурой — металлические, из пористого стекла, нанесенные и напыленные на каркас, — обладают высокой химической стойкостью.

Последние разработки мембранных технологий представлены в прил. 14.

Для установок с мембранными аппаратами применяют технологический, гидравлический и механический, а при использовании горячих растворов — и тепловой расчеты. При технологическом расчете определяют необходимую поверхность мембран, жидкостные потоки и их состав. При гидравлическом расчете находят гидравлическое сопротивление аппаратов, трубопроводов и арматуры [24, 25].

Расчет аппаратов обратного осмоса и ультрафильтрации проще выполнять на основе эмпирических корреляций (Ю. И. Дыт-

нерский). Составляют уравнения материального баланса по всему веществу и растворенному компоненту, дифференциальные уравнения изменения состава пермеата и проницаемости в произвольном сечении. Определив на лабораторных ячейках с мешалкой ряд констант и используя их при решении системы уравнений, рассчитывают выход концентрата и фильтрата, поверхность мембраны и состав фильтрата при концентрировании.

Расчет обратноосмотических аппаратов с плоскими мембранными элементами предпочтительнее выполнять на основе математического моделирования. Расчет заключается в совместном решении уравнений материального баланса по раствору и растворенному веществу и уравнений энергетического баланса по раствору и пермеату с учетом концентрированной поляризации и взаимного движения потоков.

Термическое сжигание. Термическое сжигание применяют для уничтожения высококонцентрированных сточных вод, содержащих минеральные или органические элементы. По этому методу сточные воды вводят в печь сжигания и испаряют при 900—1000 °С. Органические примеси сгорают до продуктов полного сгорания CO_2 , H_2O , NO_2 .

Промышленные стоки, удельная теплота сгорания которых $Q_{\text{сг}} \geq 8,4$ МДж/кг, сгорают как жидкое топливо. При $Q_{\text{сг}} < 8,4$ МДж/кг для сжигания стоков требуется высококалорийное топливо. Теплоту сгорания сточных вод с органическими загрязнениями рассчитывают по формуле

$$Q_{\text{сг}} = (1/\rho) \sum_{i=1}^n c_i Q_{\text{сг}}^i, \quad (8.55)$$

где ρ — плотность сточной воды, кг/м³; c_i — концентрация i -го компонента в стоках, моль/дм³; $Q_{\text{сг}}^i$ — удельная теплота сгорания i -го компонента, кДж/моль.

При неизвестном составе сточных вод $Q_{\text{сг}}$, МДж/кг, определяют по формуле

$$Q_{\text{сг}} = 12,75 \text{ ХПК} / \rho, \quad (8.56)$$

где ХПК — химическое потребление кислорода, г/дм³.

Биологический метод очистки сточных вод

В основе биологической очистки сточных вод от органических веществ лежат три взаимосвязанных процесса: синтез протоплазмы клеток микроорганизмов, окисление органических загрязнений и окисление продуктов метаболизма (обмена вещества) клеток. Для проведения таких процессов требуется участие ферментов. Происходящее при этом *аэробное окисление* содержащегося в органических веществах углерода до CO_2 и водорода до H_2O ха-

рактируется расходом кислорода, т. е. биологическим потреблением кислорода (БПК).

Характеристикой глубины разложения примесей в водостоке является биохимический показатель (БХП), равный отношению БПК к ХПК.

Под ХПК в отличие от БПК понимают количество кислорода, теоретически необходимое для полного превращения органических веществ в CO_2 , H_2O , а также в соль аммония и серную кислоту, если они содержат азот и серу. Молекулярный кислород, входящий в состав молекул веществ, идет на окисление этих веществ.

При биохимическом окислении органических веществ требуется меньше кислорода, чем при химическом окислении с той же эффективностью очистки.

В биологических фильтрах сточные воды очищаются микроорганизмами активного ила, биопленками, образующими биологически активную массу.

Производительность установки и количество избыточного ила на единицу объема сточной воды оценивают по окислительной мощности r и приросту ила (Пр).

Окислительную мощность рассчитывают по формуле

$$r = (\text{БПК}_{\text{исх}} - \text{БПК}_{\text{оч}}) V / V_a = \Delta \text{БПК} / \tau, \quad (8.57)$$

где $\Delta \text{БПК} = \text{БПК}_{\text{исх}} - \text{БПК}_{\text{оч}}$ — разность между БПК исходной и очищенной воды, $\text{г}/\text{м}^3$; V — расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{ч}$; V_a — рабочий объем аэротенка, м^3 ; $\tau = V_a / V$ — длительность аэрации, ч.

Прирост ила

$$\text{Пр} = C_n + K_3 \Delta t, \quad (8.58)$$

$$\text{Пр} = C_n + U \Delta S, \quad (8.59)$$

где C_n — концентрация взвешенных веществ, поступающих в аэротенк, $\text{г}/\text{м}^3$; K_3 — экономический коэффициент; Δt и ΔS — количество органических примесей, удаленных в аэротенках, соответственно в массовых единицах и единицах БПК, $\text{г}/\text{м}^3$ и $\text{г БПК}/\text{м}^3$; U — удельный прирост ила, $\text{г}/\text{г БПК}$.

Очистка при БПК меньше $20 \text{ мг О}_2/\text{дм}^3$ является полной, а больше $20 \text{ мг О}_2/\text{дм}^3$ — неполной.

Анаэробные схемы применяют для очистки сточных вод концентрацией $6—20 \text{ г}/\text{дм}^3$, для концентрирования минеральных солей $30 \text{ г}/\text{дм}^3$ и для брожения осадков и избыточного ила.

По анаэробной схеме (рис. 8.28) стоки, пройдя усреднитель 1, подаются в анаэробный восстановитель 2, где взаимодействуют с анаэробным илом. Затем смесь насосами 4 подается во флотатор 5, из которого иловая вода вместе с бытовыми водами поступает в аэротенк 6, а пенный продукт — в метантенк 3 на стабилизацию. Выходящая из аэротенка 6 смесь насосами 7 подается во флотатор 8, из которого аэробный активный ил возвращается на вход

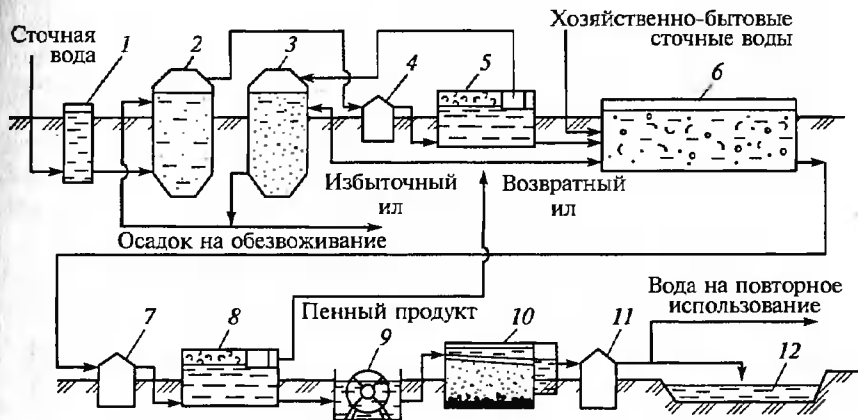


Рис. 8.28. Схема комбинированного метода очистки промышленных стоков: 1 — усреднитель; 2 — анаэробный восстановитель; 3 — метантенк; 4, 7, 11 — насосы; 5, 8 — флотаторы; 6 — аэротенк; 9, 10 — фильтры; 12 — водоем

схемы. Часть ила возвращается в аэротенк 6, а избыточная часть в метантенк 3. Биологически очищенная вода доочищается на фильтрах 9 и 10, после чего сбрасывается в водоем 12 или подается насосами 11 на повторное использование.

Стоки, очищаемые биологическими методами, должны отвечать *следующим требованиям*.

1. Органические вещества, входящие в стоки, должны быть способны к биохимическому окислению.

2. Их концентрация, выраженная через БПК, не должна превышать $0,5 \text{ г/дм}^3$ при очистке на биофильтрах и 1 г/дм^3 — при очистке в аэротенках — смесителях.

3. Концентрация ядовитых органических и неорганических (соли меди, свинца, хрома, ртути) веществ не должна превышать пределов, исключающих жизнедеятельность бактерий.

4. Количество механических примесей не должно превышать 150 мг/дм^3 .

5. Водородный потенциал среды pH должен быть 6,5—8,5.

6. Сточные воды должны содержать биогенные элементы (N, P и K).

7. Общее количество растворенных солей должно быть не больше 10 г/дм^3 ;

8. Стоки не должны содержать плавающих масел и смол.

9. Температура сточных вод — от 6—35 до 50—60 °С.

С учетом изложенного специалистами разработана типовая станция биологической очистки сточных вод производительностью 10 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, размещаемая на площади 11 га вместо 75 га — для стандартной станции очистки. Очистка ведется в аэротенках

колонного типа с доочисткой на песчаных фильтрах с водовоздушной промывкой. Реагентное кондиционирование смеси сырого осадка и уплотненного избыточного ила и обезвоживание проводят на фильтр-прессах ФПАКМ-25Н производительностью по сухому продукту $15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и влажностью обезвоженного осадка 60 %. Резервным оборудованием для обезвоживания осадка являются винтовые центрифуги. Пульпа из песколовок обезвоживается на таких же фильтр-прессах производительностью $30 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

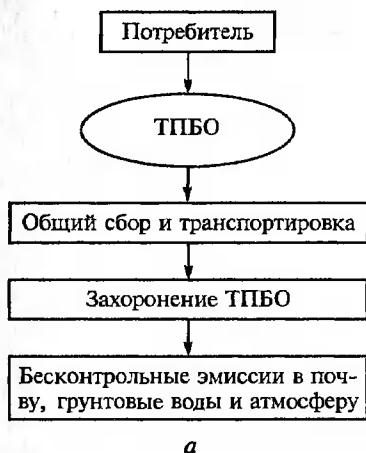
8.3. Рекуперация, вторичная переработка, хранение и использование твердых отходов. Оценка технологий

Десятки миллионов тонн промышленных отходов (с учетом твердых промышленных отходов — ТПО) образуются в результате жизнедеятельности крупнейших индустриальных центров России. К ним ежедневно добавляются отходы коммунально-городского хозяйства, включая твердые бытовые отходы (ТБО). Совокупный рост объемов ТПО и ТБО (ТПБО) составляет примерно 5—8 % в год [26—29]. Однако при развитии мощностей по переработке отходов существенно возрастает потребность в площадках для новых установок. Уже в настоящее время проблема размещения стала основным сдерживающим моментом в развитии производств по переработке ТПБО. В большинстве стран Европы и Северной Америки управление потоками ТПБО включает ряд обязательных этапов. К их числу относятся: программы по снижению объемов образования ТПБО, широкое внедрение их вторичного использования (с формированием потребительских свойств), применение соответствующих фракций ТПБО в качестве сырья для основных производственных процессов, утилизация энергетического потенциала отходов, захоронение остатков ТПБО, не обладающих никакими полезными свойствами на экологически нейтральных полигонах.

Фактически формула обращения с ТПБО в развитых странах воплощает принцип устойчивого развития и может быть кратко представлена следующим перечнем операций [30]:

- редукция;
- вторичное использование;
- переработка;
- извлечение энергии;
- захоронение остатков.

Полнота их реализации в разных странах определяется конкретными экологическими, сырьевыми, демографическими и другими условиями. В целом европейскими странами принята стратегия, в соответствии с которой возобновляемые источники энергии, к числу которых относятся ТПБО, должны составлять в их энергобалансе 10—15 % к 2010 г. [31].



a

Рис. 8.29. Реальные ХТС переработки ТПБО в развивающихся (а) и экономически развитых странах (б):

a — примитивные цепочки удаления ТПБО;
б — совершенные цепочки удаления ТПБО



б

В Москве создано МГУП «Промотходы». Основные направления его деятельности:

создание общегородской системы централизованного удаления и переработки всех видов отходов (кроме радиоактивных*) про-

* Радиационной безопасностью и отходами отрасли занимается московское НПО «Радон».

мышленных предприятий, а также экологически опасных отходов и вторичных материальных ресурсов от объемов коммунального и жилого секторов города;

развитие системы экологического контроля, правового регулирования, нормативно-методического и информационного обеспечения обращения с отходами;

координация работ, направленных на сокращение промышленных отходов города и др.

В связи с разнообразием веществ и материалов, подпадающих под категорию ТПБО, и разными технологиями их переработки до настоящего времени не существует единого подхода к созданию типового (стандартного) перерабатывающего завода. Сейчас стратегии управления ТПБО осуществляются посредством химико-технологических систем (ХТС) удаления отходов, которые фактически являются инструментом их воплощения. Структура такой ХТС является прямым отражением экономической и экологической политики государства.

Во многих регионах Российской Федерации, странах СНГ, части Восточной Европы и в развивающихся странах реальные ХТС включают две основные системы — источник ТПБО и свалку (рис. 8.29, а). В большинстве же экологически развитых стран ХТС удаления ТПБО включают спектр методов и производств, позволяющих осуществлять индивидуальную переработку и обезвреживание различных ингредиентов. Вместе с тем, все современные ХТС включают полигоны захоронения ТПБО, куда поступают непрореагировавшие остатки от переработки отходов (рис. 8.29, б).

Таким образом, при выборе методов и оборудования переработки твердых отходов (промышленных пылей, остатков непрореагировавшего сырья, побочных продуктов, отходов основного производства, осадков, шламов и др.) существенную роль играют их состав, количество, цена и экологическая безопасность. В России вторичную переработку осуществляют по четырем основным вариантам (характерно для крупных промышленных центров и городов): *обезвреживание, извлечение полезных веществ, уничтожение и захоронение*. Анализ соответствующих процессов позволил сформировать основное требование к их разработке: технологический процесс должен потреблять минимальное количество реагентов и энергозатрат, а продукт вторичной переработки — иметь потребительскую ценность* [4].

* Справка: себестоимости переработки ТПБО основными промышленными методами, включающими механическую сепарацию, компостирование, сжигание и захоронение, существенно различны. Так, стоимость сепарации и захоронения ТПБО составляет первые десятки долларов за тонну, компостирование — 50...70 долл.; сжигание — 100...150 долл. [30].

8.3.1. Обезвреживание твердых отходов

Для обезвреживания твердых отходов часто применяют метод их капсулирования, заключающийся в обволакивании токсичного отхода инертной пленкой, например стеклообразной или полимерной. Используемый метод переплавки отходов заключается в выжигании вредных компонентов, формировании новой структуры ВМР и их потребительских свойств: размеров, цвета и т. п. Химические методы позволяют получать из отходов новые продукты: превращать твердые органические отходы гидрированием и гидролизом в жидкое и газообразное топливо. Наиболее распространенный метод фиксации отходов — цементирование — применяется для отходов, содержащих воду. Недостаток метода — увеличение объема отходов и возможная гидратация цемента при малых рН. Применяется для неорганических отходов, особенно тяжелых металлов, а также радиоактивных веществ. Для фиксации с использованием органических полимерных материалов готовится смесь отходов с соответствующими смолами или мономерами, затем вводится катализатор, который обеспечивает полимеризацию и создание объема фиксированного материала. Отходы обычно химически не связываются с полимером. Происходит микрообволакивание органической оболочкой. Для обработки отходов обычно используют формальдегидные, виниловые и полиэфировые соединения. Такой монолит обладает сопротивлением на сжатие на уровне бетона. Недостаток метода — возможность появления ядовитых паров в процессе полимеризации.

8.3.2. Извлечение ценных компонентов из ВМР

Для извлечения ценных компонентов из ВМР используют методы экстрагирования и кристаллизации. *Экстрагирование* — извлечение из твердого вещества одного или нескольких компонентов с помощью растворителя. При этом извлекаемые компоненты переходят из твердой фазы в растворитель (экстрагент). Для последующего выделения целевого компонента из смеси с экстрагентом применяют выпаривание или ректификацию. Используются следующие основные типы экстракторов: смесительно-отстойные, колонные и центробежные. *Кристаллизация* — выделение твердой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов. Процесс характеризуется переходом вещества из жидкой фазы в твердую вследствие изменения его растворимости. Далее выделенный кристаллический продукт подлежит вторичной переработке, а фильтрат подлежит дальнейшей переработке.

Обычно экстракционные установки состоят из двух основных частей — для собственно экстракции и стадии регенерации экстрагента (рис. 8.30, 8.31).

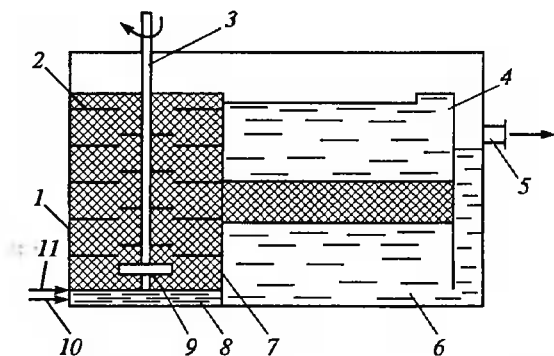


Рис. 8.30. Ступень ящичного экстрактора (конструкция ЦНИИхиммаш):

1 — смесительная камера; 2 — затворная перегородка; 3 — вал с диском; 4 — гидрозатор; 5 — отвод тяжелой фазы; 6 — отстойная камера; 7 — перегородка между смесительной и отстойной камерой; 8 — предкамера; 9 — смесительно-транспортное устройство; 10, 11 — подвод тяжелой и легкой фаз

Принцип действия установки по очистке грунта от нефти и нефтепродуктов (разработчик ЦНИИхиммаш, Москва) основан на использовании интенсивной *виброкавитационной экстракции* загрязнений, содержащих нефть и нефтепродукты, с последующим разделением пульпы на чистый (песок) и извлеченную нефть (нефтепродукты). В качестве экстрагентов могут использоваться различные вещества, в частности вода, нефть, углеводороды. При проведении работ на морском побережье — соленая морская вода.

В конструкции установки применяется специально разработанный экстрактор, обладающий высокой производительностью и эффективностью, а также оригинальный узел для последующего отделения грунта от нефти и нефтепродуктов.

Установка массой не более 2,5 т и производительностью 1 т загрязненного грунта в час имеет модульную конструкцию. Тип модулей и их количество определяются видом и степенью загрязненности грунта. Габаритные размеры модуля установки 2×2×3 м. Расход воды не превышает 200 кг на 1 т исходного грунта, электроэнергии — 10 кВт·ч.

Способ экстракции обеспечивает степень очистки грунта не

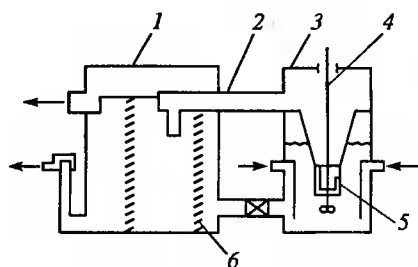


Рис. 8.31. Смесительно-отстойный экстрактор с отдельными устройствами транспортирования и перемешивания жидкости:

1 — отстойник, 2 — лоток; 3 — смеситель; 4 — вал с мешалкой; 5 — осевой насос, 6 — успокоительные перегородки

менее 99 % и высокую производительность процесса при компактности оборудования. Технология безотходна и экологически чистая.

Возможно создание передвижной очистной установки, что позволяет использовать ее при ликвидации последствий аварий, в частности на нефтепромыслах и нефтепроводах.

Существенным достоинством метода является то, что извлекаемые из грунта нефтепродукты можно применять повторно, например, в виде топлива. По сравнению с зарубежными технологиями обеспечивается снижение эксплуатационных затрат в 3—4 раза и капитальных — в 10 раз.

Кристаллизатор с *водяным* или *воздушным охлаждением* состоит из корпуса 1 (рис. 8.32, а), в котором вращается мешалка б. Охлаждающая вода или рассол протекает по змеевику 4. Мешалка препятствует осаждению образовавшихся кристаллов на дне аппарата и обеспечивает циркуляцию раствора внутри кристаллизатора. При периодической работе аппарат заполняют раствором. По окончании кристаллизации раствор вместе с кристаллами из ап-

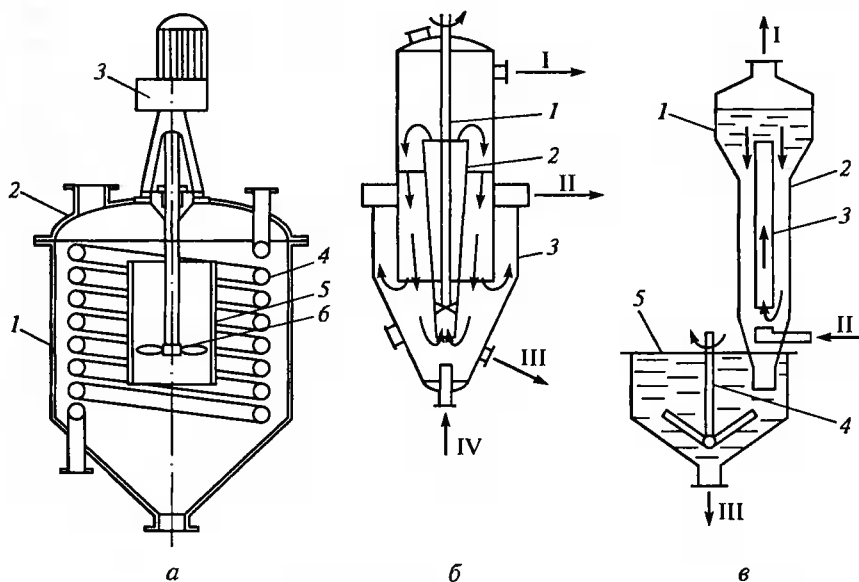


Рис. 8.32. Кристаллизаторы:

а — с мешалкой и змеевиком для охлаждения раствора: 1 — корпус; 2 — крышка; 3 — привод мешалки; 4 — змеевик; 5 — циркуляционная труба; б — мешалка; б — с принудительной циркуляцией суспензии: I — соковый пар; II — маточный раствор; III — суспензия; IV — сточная вода; 1 — мешалка; 2 — циркуляционная труба; 3 — осадительная камера; в — с естественной циркуляцией раствора: I — пар; II — раствор; III — суспензия; 1 — сепаратор; 2 — корпус; 3 — центральная труба; 4 — мешалка; 5 — гидрозатвор

парата сливается в центрифугу, где кристаллы отделяются от маточника. При непрерывной работе кристаллизаторов их соединяют последовательно. В кристаллизаторах с воздушным охлаждением раствора образование кристаллов происходит при непосредственном контакте насыщенного раствора с воздухом. При этом часть растворителя испаряется. Схема кристаллизатора с *принудительной*, создаваемой мешалкой, *циркуляцией* суспензии приведена на рис. 8.32, б, а с естественной циркуляцией раствора — на рис. 8.32, в [2, 32].

Дальнейшая переработка твердых отходов (шламов) ведется в оборудовании для *сушки* жидких, пастообразных и сыпучих продуктов химической, пищевой, медицинской, микробиологической, стройматериалов, горнодобывающей и смежных с ними отраслей промышленности, а также для сушки осадков сточных вод и отходов разных производств.

АО «НИИХиммаш» разработана сушильная техника широкого назначения, используемая, например, в качестве финишного оборудования процессов экстракции и кристаллизации. Ниже приведены схемы (рис. 8.33, а—е) и технико-экономические показатели таких аппаратов [33].

Вальцевая сушилка «вн» предназначена для сушки суспензий и текучих паст.

Рабочей поверхностью является цилиндрический обогреваемый валец, установленный на двух опорах и снабженный регулируемым приводом для вращения. Исходный продукт наносится тонким слоем на рабочую поверхность и снимается специальным ножом в виде пленки или чешуек. Время сушки соответствует одному обороту вальца. Сушилки могут поставляться комплектно. Исполнение: одно- и двухвальцевые, открытые и герметизированные с чугунными или хромированными вальцами; диаметр вальца, м: от 1,2 до 2; производительность по испаренной влаге, кг/ч: с т 25 до 2000.

Обрабатываемые продукты: мездровый клей, гербициды, молоко, кормовые белки, варенья, каши, картофельное пюре, детское питание, овощные и фруктовые соки и т.д.

Распылительная сушилка «рц» и «рф» предназначена для сушки растворов и суспензий, обеспечивает интенсивное испарение влаги при кратковременном пребывании продукта в зоне теплового воздействия, представляет цилиндрическую камеру с коническим днищем. В верхней части установлены центробежный распылитель или форсунки и устройство для подвода теплоносителя. Получаемый продукт в виде порошка не требует дополнительного измельчения. В качестве теплоносителя используется подогретый воздух или дымовые газы от сжигания мазута или природного газа. Диаметр камеры, м: 1,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,5; 8,0; 10,0; 12,5. Производительность по испаренной влаге, кг/ч: от 10 до 25 000.

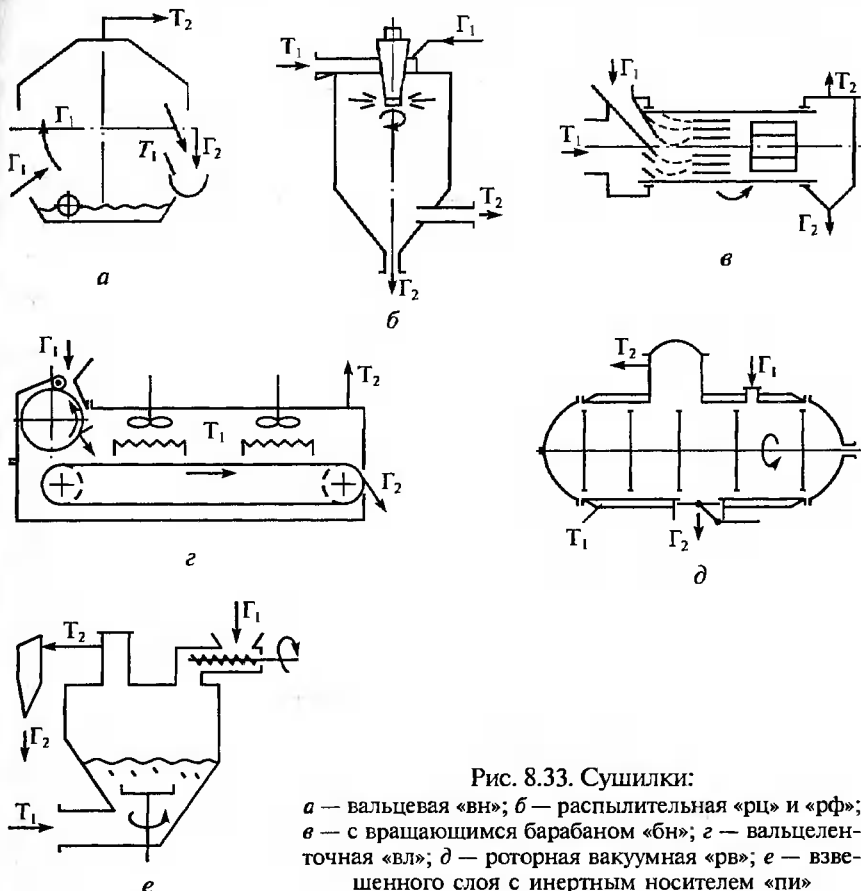


Рис. 8.33. Сушилки:

a — вальцевая «вн»; *б* — распылительная «рц» и «рф»; *в* — с вращающимся барабаном «бн»; *г* — вальцеленточная «вл»; *д* — роторная вакуумная «рв»; *е* — взвешенного слоя с инертным носителем «пи»

Обрабатываемые продукты: минеральные и органические соли, катализаторы, пигменты, красители, кормовые белки, ферменты, медицинские продукты, кофе, чай, соки, сточные воды и др.

Сушилка с вращающимся барабаном «бн» предназначена для сушки кусковых и зернистых материалов, в том числе комкующихся и рассыпающихся паст. Представляет горизонтальный цилиндр (барабан), установленный на опоры для его вращения и снабженный соответствующим приводом. Сушка осуществляется горячими газами.

Корпус барабана снабжен рядом насадок лопастного или цепного типа, обеспечивающих перемешивание и перемещение материала вдоль барабана при активном теплообмене. Диаметр корпуса, м: 0,5; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5. Производительность по испаренной влаге, кг/ч: от 10 до 25 000. Обрабатываемые продукты: минеральные удобрения, угольные горнохи-

мические и металлургические концентраты, каолин, мел, осадки бытовых и промышленных стоков, доменные шлаки, шламы, кокс, гипс, доломит, песок, щебень, полимеры в порошке и гранулах, лигнин, отходы животноводческого производства, деревопереработки и т. д.

Вальцеленточная сушилка «вл», «лс» предназначена для сушки пастообразных продуктов. Представляет двухступенчатую установку, включающую вальцевую и ленточную части. Вальцевая часть выполнена в виде ребристого обогреваемого цилиндра, установленного на опоры с приводом для вращения. Продукт прижимным валиком впрессовывается в канавки, подсыхает за один оборот и специальным ножом-гребенкой удаляется из канавок в виде кусочков или палочек, затем передается на бесконечную ленту, размещенную в коробе с калориферами для нагрева воздуха и циркуляционными вентиляторами.

Ленточная сушилка «вл», «лс» самостоятельно используется для сыпучих, гранулированных и волокнистых материалов.

Сушилки позволяют строго регулировать время пребывания продукта в аппарате, влажность и температуру теплоносителя и материала, изменять поток теплоносителя, протокоток, смешанный и т. д. Диаметр вальца, м: от 0,8 до 1. Ширина ленты, м: 0,8; 1,0; 1,2; 2,0; 3,0. Производительность по испаренной влаге, кг/ч: от 100 до 1500.

Обрабатываемые продукты: пигменты и наполнители после фильтров, таблетированные материалы, бобины, жомы овощей и фруктов и т. д.

Сушилка роторная вакуумная «рв» предназначена для сушки жидких, пастообразных и сыпучих продуктов от органических растворителей или продуктов токсичных или пожаровзрывоопасных по своим химическим свойствам; периодического действия; представляет обогреваемую горизонтальную цилиндрическую или биконическую емкость, внутри которой помещен ротор, мешалка с лопастями разных конструкций, в том числе с ножевыми и размольными.

Сушилка работает под вакуумом до остаточного давления 50 мм рт. ст., что обеспечивает высокие скорости сушки при невысоких температурах нагрева. Это важно для сушки термонестойких материалов.

Сушилка абсолютно герметична, при ее работе обеспечивают надежность, экологическая чистота, высокое качество готового продукта, минимальные энергозатраты. Объем корпуса, м³: 0,3; 1,6; 4,0; 6,0; 10,0; 30,0. Производительность по испаренной влаге, кг/ч: от 5 до 500.

Обрабатываемые продукты: полиамид, поликарбонат, полиэтилен, поливинилхлорид, порошкообразный полисульфон, экстракт полифенола, кальнитриновая кислота, 2-хлорбензойная кислота, хлориды натрия и калия, метилглюкамин.

Сушильный аппарат взвешенного слоя с инертным носителем «пи» предназначен для сушки сыпучих зернистых и порошкообразных продуктов. Проектируется индивидуально во всех элементах соответственно гидродинамическим свойствам обрабатываемого материала.

Сушильный аппарат с псевдооживленным (взвешенным) слоем работает на принципе активного продува слоя материала в режиме, создающем расширение (кипение) слоя материала, характеризующимся высокой интенсивностью теплообмена и, соответственно, высокой производительностью.

Аппарат представляет вертикальную цилиндрической формы камеру, в нижней части которой установлен газоподвод с газораспределительной решеткой; на нее засыпается слой инертных частиц (фторопласта или др.).

Сушильные аппараты АО «НИИХимМаш» с инертным носителем имеют универсальное применение и способны обрабатывать широкий диапазон продуктов жидкотекучих, пастообразных и сыпучих (при соответствующих видах питателей).

Готовый продукт получается в виде порошка или чешуек. Объем корпуса, м³: 1,5; 6,0; 20,0. Производительность по испаренной влаге, кг/ч: от 50 до 1000. Обрабатываемые материалы: красители, ферменты, наполнители, органика и др.

Часто после сушки мелкодисперсных порошков в целях снижения пыления их подвергают уплотнению (*грануляции*) на грануляторах: барабанных, тарельчатых, роторных, брикетных и др. [34]. Окомкователь порошков (пылей) роторный ОНР показан на рис. 8.34.

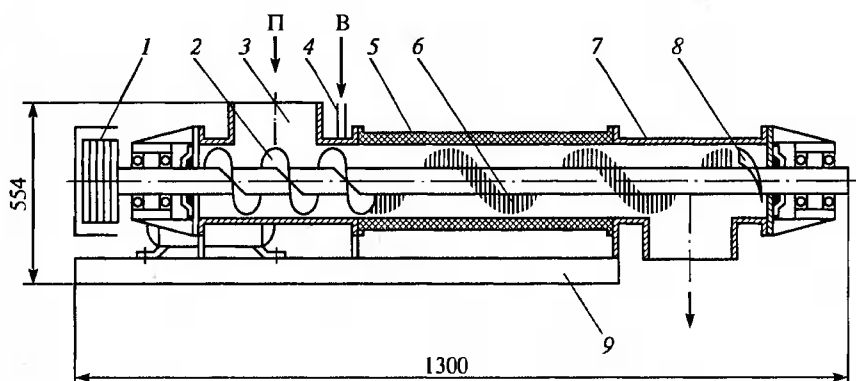


Рис. 8.34. Окомкователь пыли роторный ОНР-200:

П — пыль; В — вода; 1 — привод; 2 — подающий шнек; 3 — загрузочный патрубок; 4 — форсунка; 5 — эластичная вставка; 6 — ротор штыревой; 7 — разгрузочный патрубок; 8 — обратный виток; 9 — рама

Техническая характеристика ОПР-200:

| | |
|---|--------------|
| Производительность по пыли, м ³ /ч | ≤ 3 |
| Температура пыли, °С | ≤ 100 |
| Диаметр корпуса, мм | 200 |
| Число оборотов ротора, мин ⁻¹ | 350 |
| Мощность привода, кВт | 5,5 |
| Габаритные размеры, L×B×H, мм | 1300×744×554 |

Применение окомкователя целесообразно перед выгрузкой высушенного порошка или пыли на ленту транспортера или в емкость. Обработанная пылевая масса гранулируется. Гранулы размером от 1 до 10 мм и влажностью 7—15 % не создают вторичного пыления при транспортировании, захоронении в отвалы и подготовке к утилизации. Окомкователь может применяться в черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов, химической, машиностроении [35].

8.3.3. Использование твердых отходов в качестве вторичных энергетических (ВЭР) и материальных (ВМР) ресурсов

Термические методы *уничтожения* твердых ВМР позволяют использовать энергетический (топливный) потенциал отходов, а в случае комплексной переработки — извлекать из продуктов термообработки вещества, применяемые в основной или смежной отраслях. Процесс осуществляют в термических реакторах разных конструкций (шахтных, циклонных, с псевдоожиженным слоем и др.). Недостаток метода сжигания — образование сопутствующих топочных газов, подлежащих дополнительной очистке. В ряде случаев при термической переработке твердые отходы подвергают пиролизу — высокотемпературному превращению органических соединений, сопровождающемуся их деструкцией и вторичными процессами. Продукты пиролиза используют как жидкое и газообразное топливо [28].

На рис. 8.35 представлена схема установки ЭЧУТО, разработанная в Энергетическом институте им. Г. М. Кржижановского.

В терморекторе 1 размещена камера термического разложения 4, с люком загрузки 7, нижним люком 2, мешалкой 3, одновременно являющейся и устройством для подачи в камеру рецикла дымовых газов для дожига полукокса, и шибром 5. Камера газификации помещена в обогревательную камеру, в нижней части которой имеется колосниковая решетка для сжигания твердых топлив и двухступенчатая горелка 20 для сжигания сжиженного или природного газа и газообразных продуктов пиролиза. Обогревательная камера имеет снаружи слой теплоизоляции. Установка снабжена также газораспределителем 6 и вентилятором 16, обеспечивающим поступление необходимого для процесса воздуха и

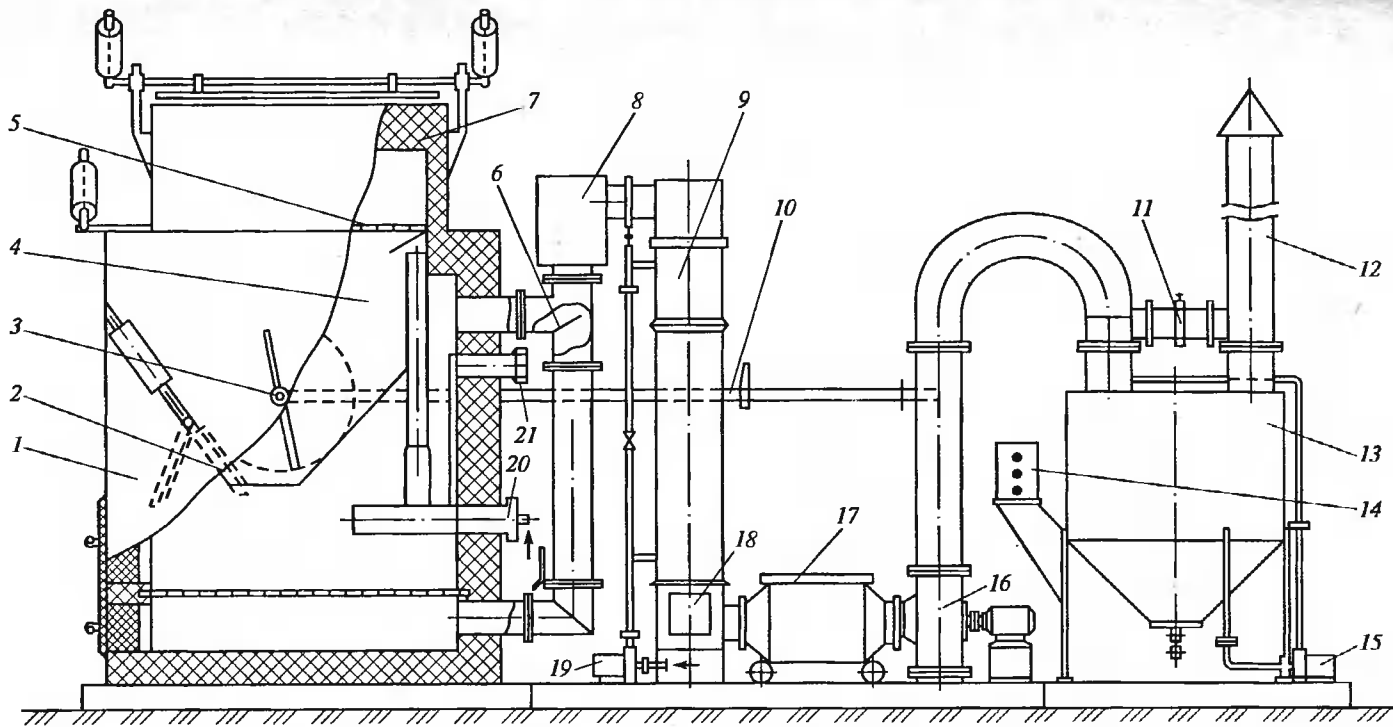


Рис. 8.35. Схема установки ЭЧУГО:

1 — терморектор; 2 — люк нижний; 3 — мешалка; 4 — камера термического разложения; 5 — шибер; 6 — газораспределитель; 7 — люк загрузки; 8 — картридж катализатора; 9 — теплообменник; 10 — линия рецикла дымовых газов; 11 — байпас с задвижкой; 12 — труба; 13 — скруббер; 14 — пульт управления; 15, 19 — насос; 16 — вентилятор (дымосос); 17 — фильтр; 18 — люк воздушный; 20 — горелка; 21 — воздухозаборник

отвод дымовых газов. В качестве дополнительного оборудования в состав установки могут быть включены: картридж катализатора дожигания 8, теплообменник 9, скруббер 13.

Установка работает следующим образом. В камеру термического разложения (КТР) 4 через шлюз загружают исходные твердые отходы. После закрытия промежуточного шиберов и верхнего люка внутренний объем камеры оказывается полностью изолированным от внешней атмосферы. В горелочное устройство 20 подают топливо и воздух и за счет выделяющегося при горении тепла разогревают устройство. Образующиеся в процессе горения продукты сгорания просасываются через систему дымоходов обогревательной камеры (или движутся за счет естественной тяги), отдают тепло на нагрев камеры термического разложения и, последовательно пройдя через картридж катализатора 8, теплообменник 9, скруббер 13, дымосос 16 и дымовую трубу 12, выбрасываются в атмосферу.

По мере роста температуры в КТР начинается процесс термического разложения (пиролиз) органической составляющей отходов и выделяющиеся газообразные продукты пиролиза через вертикальный газоход, размещенный внутри КТР, поступают в горелочное устройство, где сгорают, замещая за счет своей теплотворной способности соответствующую часть необходимого для процесса топлива. При этом происходит огневое обезвреживание вредных компонентов, содержащихся в продуктах пиролиза, чем обеспечивается значительное снижение содержания вредных веществ в дымовых газах (продуктах сгорания). По достижении температуры 600—650 °С основной процесс выделения парогазовых летучих продуктов пиролиза завершается.

По завершении основного процесса газовой выделения — завершении интенсивности горения факела, осуществляется механическое перемешивание массы отходов в камере, что активизирует остаточные теплообменные процессы.

После практически полного завершения процесса пиролиза через внутренний канал мешалки 3 в камеру подается газифицирующий агент (воздух, паровоздушная или водовоздушная смесь) и полукокс газифицируется до коксозольного остатка при вращательном и возвратно-поступательном (механическом и гидродинамическом) перемешивании материала с одновременной подачей газифицирующего агента и активацией процесса газификации во всем объеме камеры.

Образующиеся газообразные продукты газификации также поступают в горелку, где подвергаются огневому обезвреживанию.

После завершения процесса газификации через нижний люк 2 коксозольный остаток сбрасывается на колосники, где дожигается в ходе последующего цикла.

Переработка отходов с целью использования их энергетического потенциала без нанесения экологического ущерба окружаю-

шей среде представляет сложную энерготехнологическую проблему. К таким ВЭР относятся отходы химической и термохимической переработки углеродистого или углеводородного сырья, древесные отходы в лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, отходы химических производств (например, пластмассы или смолы) — смеси, разделение которых экономически нецелесообразно.

Большого экономического эффекта достигают при применении систем, *вырабатывающих* электроэнергию или *полностью обеспечивающих себя* ею, кислородом, сжатым воздухом и теплом (паром). Избытки электроэнергии, тепла и продуктов разделения воздуха используют для нужд коммунально-городского хозяйства. Схема такого энерготехнологического агрегата с применением печей Ванюкова предназначена для переработки ТБПО в барботируемом расплаве шлака.

Сущность технологического процесса переработки отходов в печи Ванюкова заключается в высокотемпературном разложении (плавке) компонентов рабочей массы в слое барботируемого шлакового расплава при температуре 1350—1400 °С за 2—3 с, что обеспечивает полное разложение всех сложных органических соединений (в том числе дибензодиоксинов и дибензофуранов) до простейших компонентов. Барботаж осуществляется за счет подачи через стационарные дутьевые устройства окислительного дутья.

ТБПО рассматриваются как топливо с теплотворной способностью 1500—1800 ккал/кг при влажности 51,7 %.

Плавка осуществляется автогенно без добавления топлива на дутье, обогащенном кислородом до 50—70 %.

Комплекс по утилизации отходов позволяет перерабатывать шихту без предварительной сортировки и сушки со значительным колебанием по химическому и морфологическому составу за счет универсальности плавильного агрегата.

Экологическая безопасность — результат отсутствия на выходе из печи высокотоксичных соединений и применения системы очистки газа, имеющей запас по пропускной способности и рассчитанной на улавливание практически всех возможных вредных соединений, встречающихся в бытовых и промышленных отходах и образующихся при их переработке.

Твердые отходы и флюсы автотранспортом подают на завод, где их взвешивают и подвергают дозиметрическому контролю.

В результате плавки образуются газы, содержащие продукты сгорания, разложения и шлак, состоящий из силикатов и оксидов металлов. Возможно образование донной фазы, содержащей черные и цветные металлы.

Шлак после водной грануляции поступает на предприятия стройиндустрии или на строительство автодорог.

Донная фаза отливается в слитки и отправляется на переработку на предприятия черной и цветной металлургии.

Газы охлаждаются в газоохладителе с получением пара энергетических параметров, очищаются от пыли, возгонов, вредных примесей и выбрасываются через дымовую трубу в атмосферу.

Уловленная пыль, в зависимости от содержания в ней компонентов, отправляется или потребителю, или возвращается в оборот — на повторную переработку со свежими отходами.

На рис. 8.36 представлена структурно-технологическая, а на рис. 8.37 — принципиальная аппаратурно-технологическая схема переработки ТПО.

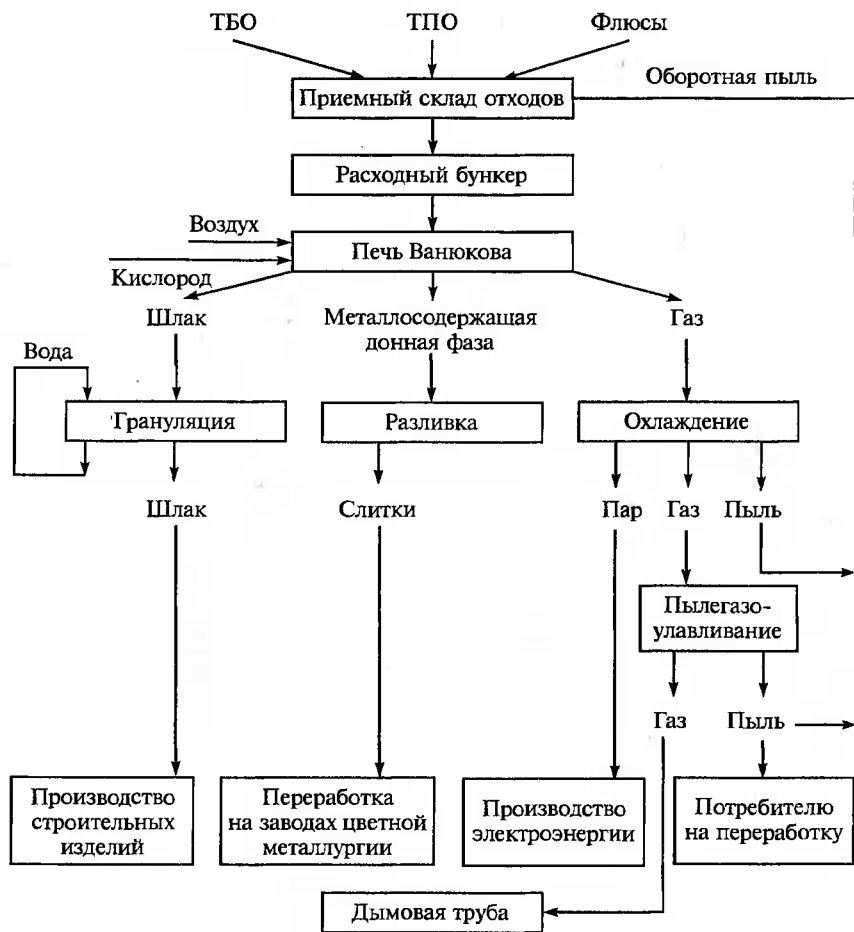


Рис. 8.36. Структурно-технологическая схема переработки ТПО

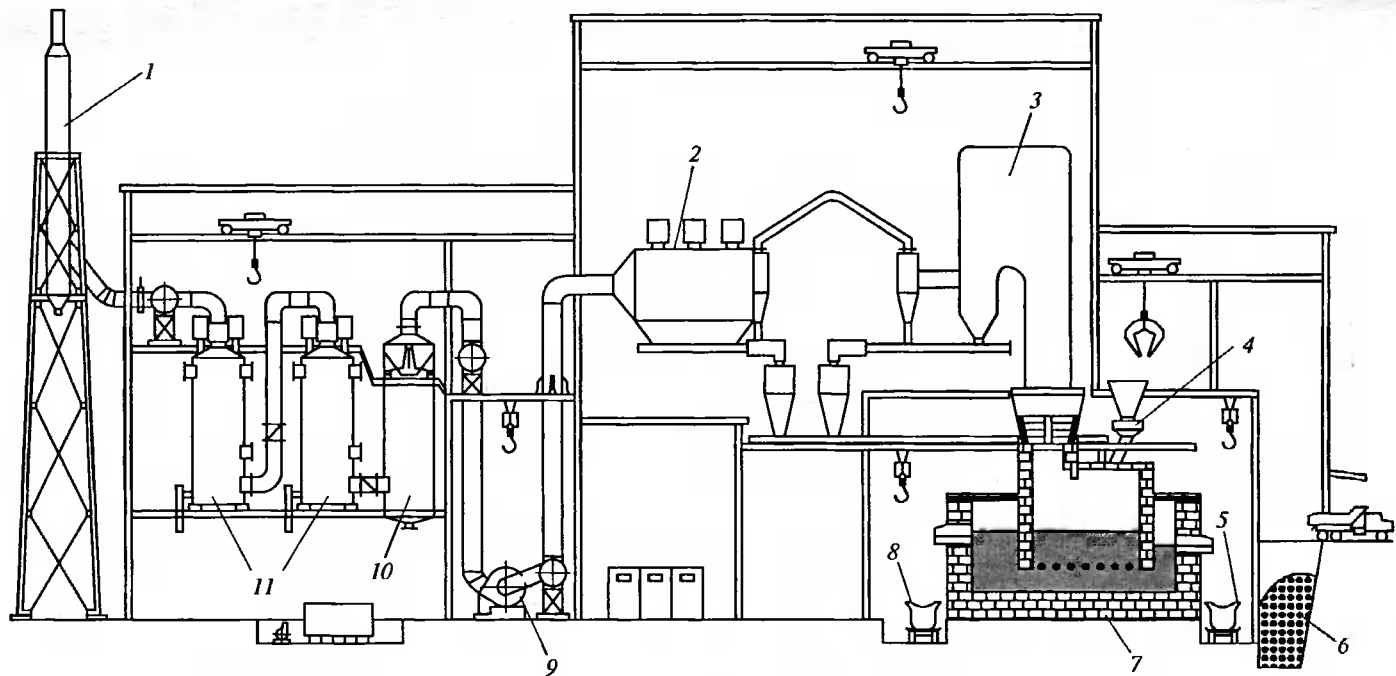


Рис. 8.37. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема переработки ТБПО:

1 — труба; 2 — сухой электрофильтр; 3 — котел-утилизатор; 4 — узел загрузки печи; 5 — сплав на металлургические заводы; 6 — склад сырья; 7 — плавильный агрегат (печь Ванюкова); 8 — шлак на производство стройматериалов; 9 — дымосос; 10 — скруббер; 11 — мокрый электрофильтр

Реальный состав отходящего в атмосферу газа:

| Элемент | Zn | Cd | Pb | Cu | V | Bi | Ag | W | Zr | Ba |
|-----------------------------------|-------|------|-------|-----|------|-------|------|-------|-------|-------|
| C, мкг/нм ³ | 3,0 | 0,02 | 0,3 | 0,5 | 0,03 | 0,3 | 0,01 | 0,002 | 0,005 | 0,8 |
| ПДК, мкг/нм ³ | 50 | 0,3 | 0,3 | 2,0 | 2,0 | 50 | 1000 | 150 | 1000 | 4,0 |
| Элемент | Hg | Ni | As | Sn | Sr | Sb | Mo | K | B | Cr |
| C, мкг/нм ³ | 0,005 | 0,03 | 0,003 | 0,3 | 0,1 | 0,005 | 0,01 | 0,005 | 0,1 | 0,005 |
| ПДК, мкг/нм ³ | 0,3 | 1,0 | 3,0 | 20 | 1000 | 20 | 100 | 100 | 10 | 1,5 |

Капитальные вложения на строительство модулей в условиях средней полосы России, млн долл. США:

| Модуль | МПВ-30 | МПВ-60 | МПВ-120 | МПВ-240 |
|------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| Строительные работы | 3,33 | 4,48 | 6,38 | 9,75 |
| Монтажные работы | 1,13 | 1,53 | 2,17 | 3,49 |
| Оборудование | 3,75 | 5,06 | 7,2 | 11,61 |
| Прочие работы и затраты | 0,99 | 1,33 | 1,89 | 2,95 |
| Всего | 9,2 | 12,4 | 17,64 | 27,8 |

Удельные расходы энергоресурсов на 1 т твердых отходов:

| Модуль | МПВ-30 | МПВ-60 | МПВ-120 | МПВ-240 |
|--|--------|--------|---------|---------|
| Собственного производства: | | | | |
| электроэнергии, кВт·ч | 285 | 240 | 202 | 192 |
| кислорода техническо- го, нм ³ | 423 | 316 | 277 | 256 |
| сжатого воздуха, нм ³ | 260 | 195 | 372 | 441 |
| теплоты, Гкал | 0,8 | 0,6 | 0,35 | 0,3 |
| От внешнего источника: | | | | |
| электроэнергии, кВт·ч | 175 | — | — | — |
| природного газа, нм ³ | 81 | 50 | 22 | 14 |
| воды производствен- ной, м ³ | 2,9 | 2,24 | 2,26 | 1,95 |

Годовое производство и выпуск товарной продукции:

| Модуль | МПВ-30 | МПВ-60 | МПВ-120 | МПВ-240 |
|--|--------|--------|---------|---------|
| Твердые бытовые отходы, | | | | |
| тыс. т | 30 | 60 | 120 | 240 |
| Твердые промышленные отходы, тыс. т | | | | |
| Всего ТБПО, тыс. т | 5 | 10 | 20 | 40 |
| Всего ТБПО, тыс. т | 35 | 70 | 140 | 280 |
| Электроэнергия, МВт·ч | — | — | 1700 | 8040 |
| Тепло (отработанный пар), | | | | |
| Ткал | 20,0 | 50,0 | 120,0 | 240,0 |
| Азот жидкий, т | 130 | 350 | 800 | 1480 |
| Аргон жидкий, т | 130 | 350 | 800 | 1480 |
| Аргон газообразный, тыс. м ³ | 110 | 300 | 680 | 1250 |

Модули, кроме МПВ-30, полностью обеспечивают себя кислородом, сжатым воздухом, теплом и электроэнергией. Избыток электроэнергии, тепла и продуктов разделения воздуха (кислорода, азота и аргона) используется для нужд населения и промышленных предприятий. Теплом отработанного пара турбогенератора в зависимости от мощности модуля можно отапливать от трех до 30 га тепличных хозяйств. Шлак используется для изготовления строительных изделий (минеральной ваты, пирозита, декоративной керамической плитки, фундаментальных блоков и др.), а также для строительства дорог. Из газов печи Ванюкова по желанию заказчика возможно получение товарной угольной кислоты (сухого льда) и метанола (сырья для получения высокооктанового бензина). Условная экономия земельных площадей при переработке 120 тыс. т ТБО (базовый модуль МПВ-120) за счет высвобождения их при ликвидации или сокращении полигонов составит 150 га при продолжительности эксплуатации модуля в течение 30 лет. При наличии в отходах черных и цветных металлов возможна их утилизация и вторичное использование.

Технология разработана и апробирована институтами «Гинцветмет», «Гипроцветмет», МИСиС с участием АКХ им. Памфилова на РОЭМЗ (Рязань).

Научно-производственной фирмой «Термоэкология» и АО «ВНИИЭТО» (Москва) разработана технология и оборудование для термической переработки и утилизации твердых бытовых, промышленных и больничных отходов. Используемая для переработки и утилизации отходов технология «ПИРОКСЭЛ» обеспечивает:

возможность безоотходной высокотемпературной переработки отходов, в том числе токсичных и с высокой влажностью;

очистку отходящих газов от пыли, соединений хлора и фтора, тяжелых металлов, оксидов серы, азота и т. д.

полное уничтожение образующихся в процессе переработки диоксинов и фуранов;

производство полезного продукта — теплоизоляционных, отделочных и конструкционных строительных материалов.

Метод высокотемпературной переработки отходов «ПИРОКСЭЛ» базируется на комбинировании процессов сушки, пиролиза, сжигания, электрошлаковой обработки и предусматривает соответствующее аппаратное оформление (рис. 8.38).

Технические характеристики установок «ПИРОКСЭЛ»:

| Установка | ТПО-2,5 | ТПО-10 | ТПО-25 | ТПО-100 | ТПО-250 |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|---------|---------|
| Производительность, тыс./год | 2,5 | 10 | 25 | 100 | 250 |
| Мощность источника питания, кВт | 250 | 750 | 1800 | 8000 | 16 000 |

| | | | | | |
|--|-----|------|------|--------|--------|
| Расход электроэнергии, кВт·ч/т | 210 | 170 | 130 | 100 | 80 |
| Объем дутьевого воздуха, м ³ /ч | 500 | 3000 | 9000 | 15 000 | 30 000 |
| Расход подпиточной воды на охлаждение, м ³ /ч | 3 | 4 | 6 | 15 | 30 |
| Численность персонала, чел. | 10 | 18 | 47 | 95 | 136 |

Основное технологическое оборудование включает плавильную электропечь, пиролизную шахту, сушильный барабан с загрузочным устройством. Отходы подаются через загрузочное устройство и сушильный барабан в пиролизную шахту и плавильную электропечь, последовательно проходя через сушку, пиролиз, окисление углерода и обработку жидким шлаком. В результате происходит разложение отходов на шлак, металл, пиролизные и дымовые газы. Шлак подогревается графитовыми электродами, подключенными к источнику питания, при этом состав шлака регулируется добавкой флюсов. Сливают шлаки и металл периодически через дозирующие отверстия с последующей грануляцией.

В процессе переработки образуются пиролизные и дымовые газы. Первые проходят по замкнутому рециркуляционному тракту, вклю-

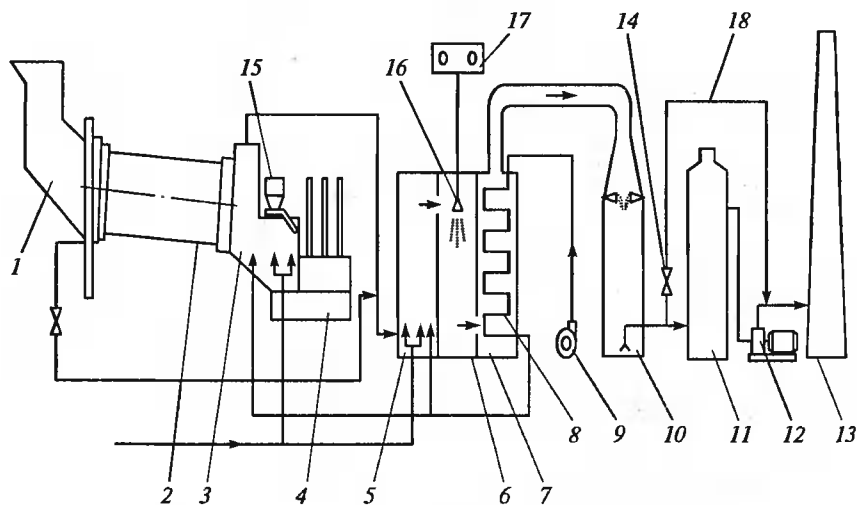


Рис. 8.38. Принципиальная схема «ПИРОКСЭЛ»:

1 — бункер загрузочный; 2 — барабан; 3 — топка; 4 — печь электрическая; 5 — камера дожигания; 6 — камера нейтрализации; 7 — камера охладительная; 8 — воздухонагреватель; 9 — воздуходувка; 10 — скруббер; 11 — фильтр; 12 — дымосос; 13 — труба дымовая; 14 — задвижка; 15 — бункер; 16 — форсунка; 17 — ре- агентное хозяйство; 18 — байпас фильтра

чающему циклон (очистка от пыли), холодильник (выделение и удаление конденсата воды), дымосос и возвращаются в подсвдовое пространство электропечи для сжигания. Вторые из подсвдового пространства направляются в реактор (для дополнительного разложения диоксинов и связывания хлора), оттуда — в фильтр, скруббер, дымосос и через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

Все оборудование объединено в единый производственный комплекс (табл. 8.5).

Технологии всех производственных участков взаимосвязаны. Объединяющим является принцип безотходности производства: продукты переработки отходов на одном производственном участке являются либо товарной продукцией, либо исходным материалом для переработки на другом участке. В конечном итоге, из твердых бытовых, медицинских и ряда промышленных отходов производятся: пористый наполнитель (пирозит), красящие пигменты и резиновая крошка. Избыток тепла, образующийся в результате работы установок центра, используется для переработки загрязненного снега и отопления производственных помещений.

Первый из подобных комплексов — Региональный экологический центр ЮВАО г. Москвы — создан и успешно работает на территории этого административного округа столицы. Производительность центра — 25 тыс. т отходов в год (рис. 8.39).

Таблица 8.5

Основные технические характеристики центра ЮВАО г. Москва

| Участок | Производство, т/сут | Потребляемая мощность, кВт | Водопотребление, м ³ /сут | | Природный газ, нм ³ /сут |
|--|---------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------|-------------------------------------|
| | | | оборотн. | техн. | |
| Термической переработки | 82 | 650 | 2016 | 260,5 | 1640 |
| Производства пирозита | 49 м ³ | 116 | — | 14,4 | 2760 |
| Производства металлической фибры | 7 | 300 | — | 8,0 | — |
| Переработки резино-технических изделий | 10 | 200 | 120 | 51,6 | — |
| Производства коагулянта | 1,2 | 162 | 120 | 3,6 | — |
| Производства пигмента | 0,12 | 72,5 | — | — | — |
| Итого | — | 1500,5 | 2256 | 338,1 | 3800 |

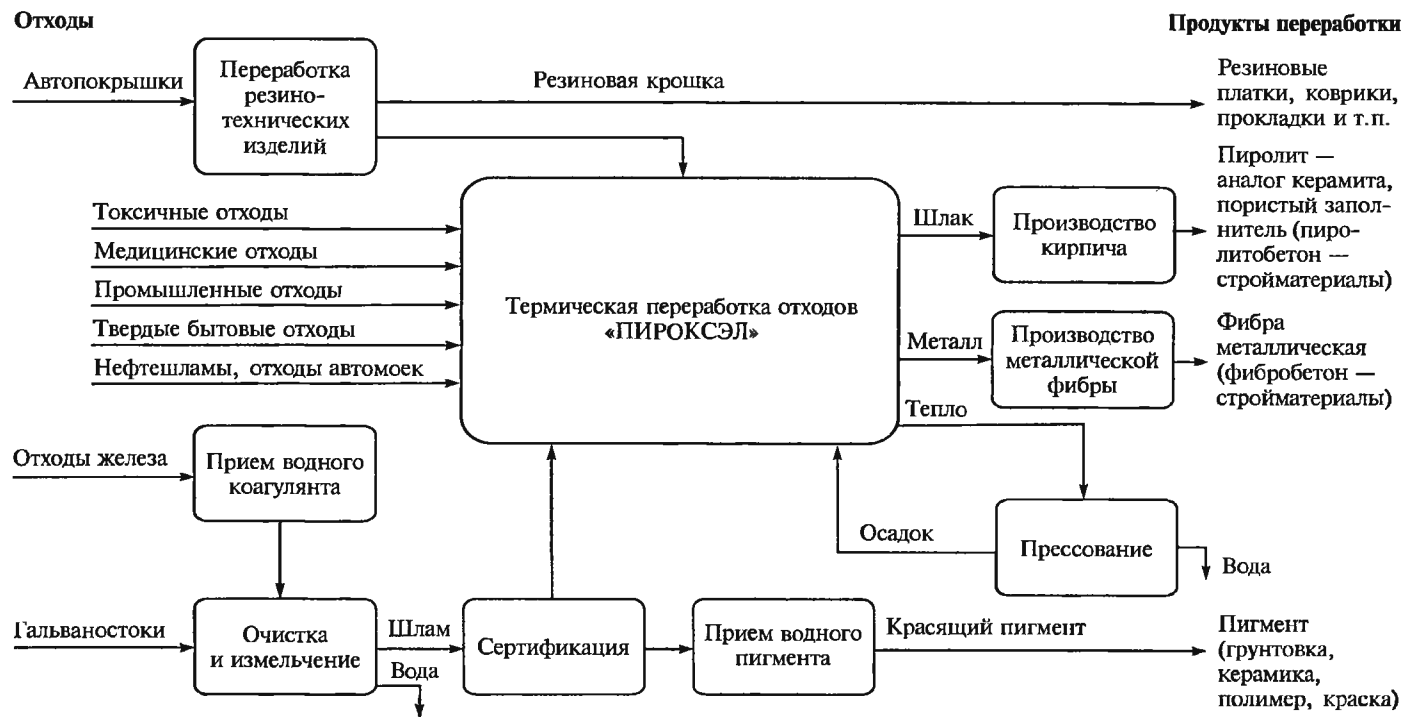


Рис. 8.39. Структурная схема регионального экологического центра ЮВАО г. Москвы

Относительно низкая себестоимость оборудования, а также возможность реализации получаемых в результате переработки отходов материалов определяют срок окупаемости комплекса — 2,1 г.

ОАО «Уральский институт металлов» предложены технологии комплексной технологии переработки железосодержащих отходов предприятий черной металлургии и сухой грануляции шлака с утилизацией его тепла. В основу комплексной технологии заложены отработанные в отечественной и зарубежной металлургии процессы. Технологическая схема включает термическое обезмасливание мелкой окалины из вторичных отстойников прокатных цехов, сгущение и частичное обезвоживание шламов, агломерацию и холодное или горячее брикетирование отходов в разных сочетаниях с добавками с целью получения продуктов, удовлетворяющих требованиям доменного и сталеплавильного переделов. При необходимости отходы с повышенным содержанием цинка могут быть металлизированы с попутной отгонкой и улавливанием оксида цинка. Схема имеет блочную структуру и может быть реализована по частям, в том числе и на предприятиях с неполным металлургическим циклом. В зависимости от видов, количества, физических и химических свойств образующихся отходов, задействованного и резервного оборудования в основных и вспомогательных цехах, а также на близрасположенных предприятиях, комплексная технологическая схема корректируется с максимальным учетом местных условий для минимизации дополнительных капитальных затрат.

Преимущества технологии:

полное использование текущих железосодержащих отходов;
возможность утилизации заскладированных отходов из шламо-накопителей;

снижение потребности в привозном сырье;

высокое качество получаемых продуктов и их эффективное применение в производстве;

максимальное использование резервных производственных площадей и оборудования при минимальных дополнительных капитальных затратах;

уменьшение затрат на содержание отвалов и улучшение экологической обстановки;

высокая экономическая эффективность и быстрая окупаемость затрат.

Предлагается также технология и установка для грануляции жидких шлаков воздухом с утилизацией до 45—50 % тепла расплава. Производительность установки изменяется в пределах 1,5—4,0 т/ч. Конструкция узла распыливания обеспечивает проработку 100 % жидкой части без образования корок и настывлей и снижает энергозатраты на дробление шлака до 0,7—0,8 кВт · ч/т. Получаемый гранулят имеет средний фракционный состав: более 5,0 мм —

0,2—0,5 %; 2,5—5,0 мм — 20—25 %; 1,25—2,5 мм — 40—50 %; 0,63—1,25 мм — 30—35 %; менее 0,63 мм — остальное.

При грануляции самораспадающихся шлаков происходит их стабилизация и исключается образование пыли при охлаждении гранул. Отработанный воздух обеспыливается и передается на регенерацию тепла. Вредных газообразных продуктов не выделяется. Весь процесс идет в автоматическом режиме.

Тепло шлака утилизируется в виде горячей воды, пара и горячего воздуха. Соотношение между объемами утилизаторов могут меняться в широких пределах.

В зависимости от состава исходного шлака гранулят может быть использован в агломерационном производстве, цементной промышленности, в дорожном строительстве, сельском хозяйстве и т. п. Грануляция способствует повышению гидравлической активности шлаков.

Технология сухой грануляции опробована на Череповецком и Оскольском металлургических комбинатах, Верх-Исетском металлургическом, Серовском и Актюбинском ферросплавных заводах.

В производстве стекла и стеклянного волокна твердые отходы (стеклобой) могут достигать 50—70 %, а в производстве стеклянного волокна отходы составляют не менее 15—30 % годной продукции. Задачи промышленной экологии, требования к малоотходным производствам и технологии стекловарения предопределили основные варианты рационального использования получаемых отходов как ВМР. Неоднородный состав отходов, их специфические свойства (твердость, абразивность и др.) создают основные трудности повторного использования в процессах стекловарения. Комплекс проведенных исследований в Московском государственном университете инженерной экологии (МГУИЭ) позволил разработать оригинальные методы промышленной рекуперации отходов [12].

Рекуперацию отходов стекловолокна переплавкой (рис. 8.40), включающую кучевую загрузку через окно 1 отходов 12, их варку при $(1300 \pm 50)^\circ\text{C}$, гомогенизацию расплава и термическую грануляцию ведут в реакторе с двойным сводом 5 (в нем размещен теплообменник). Реактор снабжен плавильным бассейном стекломассы 11, узлами подачи топлива — форсунками 2, 7 и воздуха 6. Каналы ввода воздуха и топлива снабжены устройствами для изменения угла их наклона, нижняя часть свода 5 в конце плавильного бассейна выполнена с наклоном под углом 25 ± 45 град. Термический гранулятор 10 со штуцерами ввода и вывода охлаждающей воды снабжен форсункой 9 с механизмом регулирования угла наклона относительно вытекающей струи стекломассы. Термическое гранулирование струи стекломассы ведут при вязкости $10^5 \div 10^9$ Пз струей воды под давлением 0,15—0,3 МПа при соотношении струи расплава стекломассы и воды 1,4...2 и со-

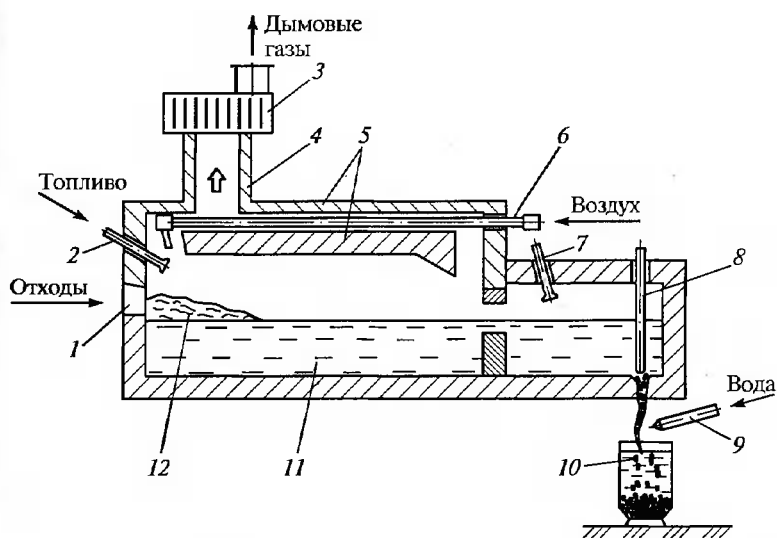


Рис. 8.40. Термический реактор для переплавки стеклобоя и отходов стекловолокна:

1 — загрузочное окно; 2, 7, 9 — форсунки; 3 — фильтр; 4 — дымовая труба; 5 — двойной свод; 6 — узел подачи воздуха; 8 — питатель; 10 — гранулятор; 11 — стекломасса; 12 — отходы

ударяющихся под углом 45—80 град. на высоте, равной 15—30 диаметров отверстия питателя. Применение в реакторе двойного свода 5 с теплообменником и фильтра 3 позволяет эффективно использовать тепло отходящих газов и, снижая перепад температур между верхней и нижней частями плавильного бассейна, резко уменьшить выбросы в атмосферу из расплава вредных и дефицитных компонентов (бора, фтора, мышьяка и др.), значительно улучшить структуру получаемых гранул (диаметром 2—4 мм). Производительность по гранулам составляет 10 т/сут.

Оптимальные условия в объеме отходов и получаемом расплаве, минимальные потери при сгорании топлива и стабилизация химического состава стеклогранул, соответствующего требованиям на сырьевые материалы для стекловарения, позволили по сравнению с имеющимися решениями снизить расход топлива на 40 %, повысить производительность в 2,5—3 раза и значительно (с 3,5—4 % до 0,2—0,3 %) снизить выбросы в окружающую среду соединений бора. Экономия минерального сырья при подготовке стекольной шихты с использованием специально переработанных отходов основного производства достигает 30 %.

Рекуперация отходов стекловолокна их самоизмельчением в сочетании с термообработкой при 450—830 °С в туннельной или барабанной печи и последующим резким охлаждением заключается в

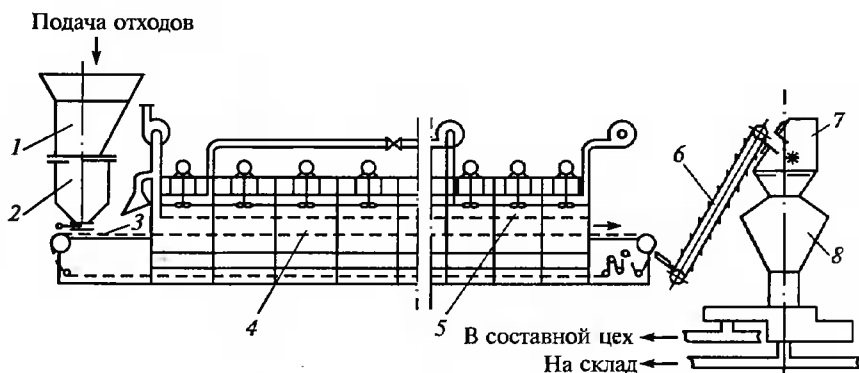


Рис. 8.41. Технологическая схема рекуперации твердых отходов стекловолокна и стеклобоя:

1 — бункер накопительный; 2 — бункер расходный; 3 — зона сортировки и аспирации; 4 — зона нагрева; 5 — зона охлаждения; 6 — конвейер; 7 — измельчитель; 8 — пневмосистема

следующем (рис. 8.41). Стекланные нити (их отходы) в мягкой и твердой фазах, прошедшие операции сбора, транспортировки и сортировки направляют в *туннельную печь* в виде слоя с определенным соотношением его высоты к ширине, которое может изменяться от 0,025 до 0,35, и термообработыванию при 450—830 °С. Размеры слоя обеспечивают равномерный отжиг отходов и удаление (выжигание) органического или неорганического покрытия их поверхности (а следовательно и стабильность их химических и физико-механических свойств) по всему объему.

Подготовленные таким образом (термообработанные) отходы подают в камеру охлаждения с целью резкого снижения их температуры. Охлаждение осуществляют за счет термического удара (например, сжатым воздухом) при перепаде в $(0,005—0,3) T_{cr}$ — температуры сгорания наиболее термостойкого компонента покрытия стекланных нитей или их отходов, что вызывает спонтанные структурные изменения в объеме переработанного материала, его разупрочнение (растрескивание) и массовое самоизмельчение волокон отходов. Отходы с прочностью на истирание и излом меньшей, чем до операции резкого охлаждения, направляют на измельчение, например, в молотковой дробилке при соотношении твердой фазы с мягкой большим, чем в три раза по сравнению с их соотношением перед термообработкой. Дополнительно возможен ввод возвратного стеклобоя (например, бракованных стеклошариков) в измельчитель или в печь отжига в количестве 2—45 % от массы отходов. Возвратный стеклобой вводят в измельчитель с целью интенсификации процесса измельчения отходов: стеклобой выполняет роль дополнительных помольных тел. Одно-

временно решается вопрос о его вторичном использовании. Стеклобой вводят в печь отжига при наличии в стекле кусков крупнее 30—70 мм. За счет термоудара такие куски разрушаются на фракции 1—15 мм, которые затем направляются в измельчитель в качестве помольных тел и для дополнительного их измельчения до максимальных размеров 0,8—1,0 мм.

Технико-экономический эффект от использования этого способа рекуперации выражается в увеличении производительности процесса в 1,4—1,7 раза, снижении энергозатрат на 32—43 % и уменьшении загрязнения окружающей среды. Использование в стекловарении порошка из отходов целевого продукта путем его добавки в качестве комплексного компонента в традиционную порошковую или компактированную шихту позволяет экономить до 45 % дорогостоящего минерального сырья.

На основе разработанных технологий вторичной переработки промышленных и бытовых отходов стекла и стекловолокна получены новые материалы и изделия, отвечающие в полной мере требованиям экологической экспертизы, сертификации и промышленного дизайна: стеклогранулят, стеклопорошки, стеклянные микрошарики и полые микросферы, воднодисперсионные краски, облицовочная стеклоплитка разных фактуры и оттенков и другие материалы.

Создание новых дешевых лакокрасочных композиций повышенной прочности, термо- и износостойкости, с малым тепловым расширением становится возможным благодаря разработке составов, в частности наполнителей, с улучшенными свойствами.

Таковыми уникальными характеристиками обладают мелкодисперсные системы из сферических частиц стекла размерами от 3 до 400 мкм. Гранулометрический и химический составы наполнителей (микрошарики и микросферы) являются основными критериями для выбора конкретной области их использования. Идеальная форма поверхности, отсутствие острых кромок обеспечивают равномерное распределение напряжений вокруг частиц, улучшение механических и потребительских характеристик наполненных материалов.

Предложен состав антикоррозионной композиции для обработки и восстановления покрытий днища кузова легковых автомобилей, а также для защиты от коррозии химического и нефтегазового оборудования. За счет введения в битумную основу стеклянных наполнителей увеличивается гидрофобность и адгезионная способность, возрастает ударная прочность и термостойкость покрытия, повышается проникающая способность наносимой композиции, рекомендованной также в качестве клея для древесины, пластмасс, резины и других конструкционных материалов.

Разработано аппаратурно-технологическое оформление линии для производства воднодисперсионной краски разного назначе-

ния (рис. 8.42). В качестве наполнителя 2 латексной основы используются микрошарики, микросферы, а также порошки из промышленного и бытового стеклобоя. В смесителе 1 происходит перемешивание всех компонентов 3 (собираются в бункере-накопителе 4), необходимых для получения воднодисперсионной композиции. После прохождения камер дозировки 5 и расфасовки 6 продукцию направляют на склад.

Воднодисперсионная композиция наносится на бетонную, отштукатуренную, кирпичную, деревянную и другие поверхности без предварительной их подготовки. Срок службы покрытия по сравнению с аналогом возрос в 3—7 раз.

Предлагаются к реализации также составы рефлектирующих эмалей и мастик, в которых светоотражающую функцию выполняют стеклянные микроизделия (разработчик — МГУИЭ).

В НПО «Радон» перерабатываются твердые и жидкие радиоактивные отходы (ТРАО и ЖРАО) средней и низкой активности (твердые — 10^{-3} Ки/кг, жидкие — до 10^{-4} Ки/л).

В целях экономии объема хранилищ и обеспечения безопасности при длительном хранении ТРАО перед захоронением перерабатывают — сжигают и прессуют. Сжигают горючие отходы (за исключением галогенсодержащих): древесину, бумагу, ветошь, спецодежду, биологические отходы и т. п. Коэффициент сокращения объема: 60—80. Образующуюся золу отверждают цементированием, превращая в монолитные блоки. Высокоэффективная система газоочистки обеспечивает надежную защиту атмосферного воздуха.

Прессованию подвергаются негорючие отходы или те, сжигание которых нецелесообразно ввиду содержания опасных веществ:

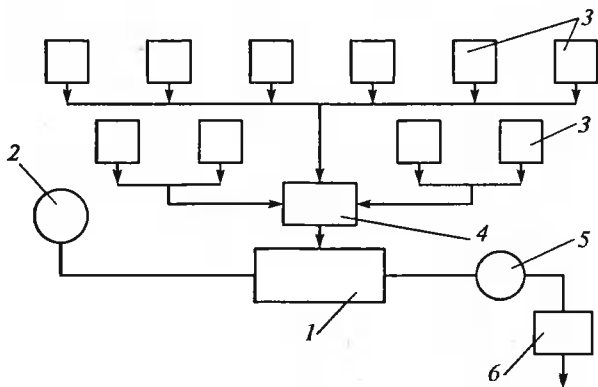


Рис. 8.42. Принципиальная схема получения высоконаполненной воднодисперсионной композиции:

1 — смеситель; 2 — наполнитель (микроизделия); 3 — компоненты; 4 — бункер-накопитель; 5 — камера дозировки; 6 — камера расфасовки

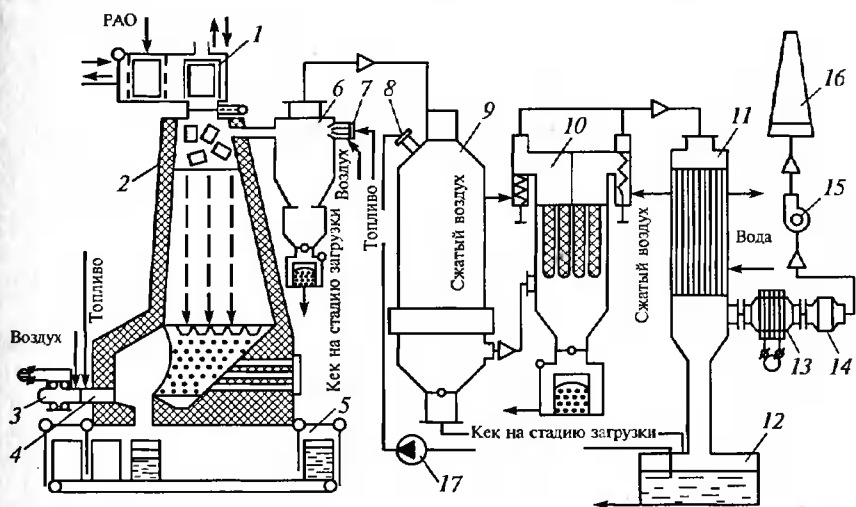


Рис. 8.43. Технологическая схема установки сжигания РАО на базе шахтной печи:

1 — узел загрузки; 2 — шахтная печь; 3 — пламенный генератор; 4 — узел ввода углеводородов; 5 — узел шлакоудаления; 6 — камера дожигания; 7 — газовая горелка; 8 — распылительное устройство; 9 — испарительный теплообменник; 10 — металлорукавный фильтр; 11 — теплообменник; 12 — сборник конденсата; 13 — подогреватель отходящих газов; 14 — фильтр тонкой очистки; 15 — вентилятор; 16 — дымовая труба; 17 — рециркуляционный насос

металлоизделия, резина, пластмассы, лабораторное оборудование. Коэффициент сокращения объема: 4 — 8.

Крупногабаритные и сверхпрочные конструкции поступают на захоронение в индивидуальных контейнерах без переработки. Пустоты, образующиеся в хранилище между упаковками с РАО, заполняют цементным раствором.

ЖРАО подвергаются разным методам очистки и обезвреживания, позволяющим сконцентрировать радиоактивные вещества в малом объеме. На конечной стадии их переводят в твердые формы, безопасные при длительном хранении.

Особенности переработки РАО по данной технологии (рис. 8.43): способность перерабатывать отходы сложного морфологического состава с содержанием негорючих компонентов до 40% (в том числе металлов);

относительно малые объемы отходящих газов и малые уносы радиоактивности из печи;

высокая степень сокращения первоначального объема отходов;

получение конечного продукта в виде плавленого химически стойкого материала.

Техническая характеристика установки:

| | |
|---|--------|
| Производительность по горючим отходам, кг/ч: | |
| твердым | 200 |
| жидким | 40 |
| Максимальная температура в зоне плавления, °С | 1650 |
| Диаметр подовой части, м | 1,1 |
| Высота шахты, м | 5,0 |
| Объем отходящих газов печи, м ³ | 1500 |
| Расход охлаждающей воды, м ³ | 35 |
| Коэффициент сокращения объема | 10—100 |
| Эффективность системы газоочистки: | |
| по аэрозолям | 99,5 |
| радионуклидам | 99,5 |

8.3.4. Санитарное захоронение отходов

Санитарное (контролируемое) захоронение отходов является альтернативой современной практике сброса ТПБО на открытые свалки. Концепция метода нацелена на создание полигонов как экономически нейтральных производственных объектов и включает следующие основные принципы: максимальное использование рабочего объема полигона, контроль состава поступающих на захоронение отходов; учет поступающей на захоронение массы, минимизация негативного влияния ингредиентов отхода на биосферу и др.

Санитарному захоронению подлежат отходы, обезвреживание которых нецелесообразно по экономическим соображениям или технически затруднено (часто невозможно). Причем наземное складирование вновь образуемых твердых отходов недопустимо. Существующие отвалы, например фосфогипса, являются потенциальным сырьем для стекольной промышленности.

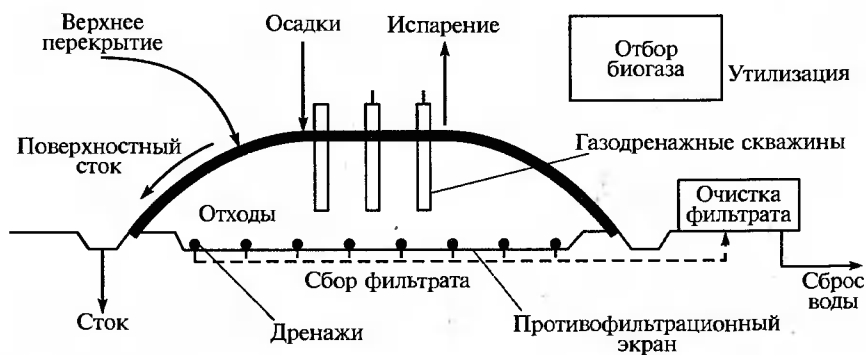


Рис. 8.44. Принципиальная схема устройства полигона для санитарного захоронения ТПБО

Полигон для захоронения отходов должен быть обустроен природоохранными техническими средствами, обеспечивающими перехват водных и газовых эмиссий, формируемых структурой отходов (рис. 8.44). К этим средствам относятся: противофильтрационный экран в основании полигона, система дренажа для сбора фильтрата в основании полигона, система дренажа для отвода поверхностного стока с прилегающих территорий, система откачки и очистки свалочного фильтрата, газодренажная система, система откачки и обезвреживания (утилизации) газовых эмиссий, непроницаемый поверхностный рекультивационный экран.

Принцип максимального использования рабочего пространства предполагает реальное доведение плотности ТПБО до $\geq 0,8$ т/м³ и реализацию высотной схемы складирования [30]. Средние затраты захоронения отходов составляют 110—340 долл./т, химическая фиксация в твердое состояние увеличивает затраты примерно на 200 долл./т, фиксация отходов капсулированием — на 100 долл./т [36].

Список литературы

1. *Калыгин В. Г., Попов Ю. П.* Порошковые технологии: экологическая безопасность и ресурсосбережение. — М.: Изд-во МГАХМ, 1996. — 212 с.
2. *Бондарева Т. И.* Экология химических производств. — М.: Изд-во МИХМ, 1986. — 92 с.
3. Оборудование, сооружения, основы проектирования химико-технологических процессов защиты биосферы от промышленных выбросов / А. И. Родионов, Ю. П. Кузнецов, В. В. Зенков, Г. С. Соловьев. — М.: Химия, 1985. — 352 с.
4. Газоочистные аппараты сухого и мокрого типов. Каталог: — М.: Изд-во ЦИНТИхимнефтемаш, 1984. — 92 с.
5. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации циклонов НИИОГАЗ. — Ярославль: ЦГТ, 1971. — 74 с.
6. *Алиев Г. М.-А.* Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
7. *Страус В.* Промышленная очистка газов. — М.: Химия, 1981. — 616 с.
8. Очистка промышленных газов от пыли / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др. — М.: Химия, 1981. — 392 с.
9. *Степанов Г. Ю. Зицер И. М.* Инерционные воздухоочистители. — М.: Машиностроение, 1986. — 184 с.
10. *Александров В. П., Соломонов В. А., Вальдберг А. Ю.* Применение рукавных фильтров для очистки от золы дымовых газов котельных установок // Обз. инф. «Научные и технические аспекты охраны окружающей среды». — 1999. — № 2. — С. 75—102.
11. Очистка технологических газов в цветной металлургии / И. Г. Бородин, А. Ю. Вальдберг, Г. Ф. Мустафин и др. — М.: Металлургия, 1992. — 342 с.
12. *Чичев А. Н.* Промышленная экология в производствах энергонасыщенных конденсированных систем. — М.: Изд-во МГУИЭ, 2000. — 114 с.

13. *Ужов Г. Н., Вальдберг А. Ю.* Очистка газов мокрыми фильтрами. — М.: Химия, 1972. — 248 с.
14. Справочник по пыле- и золоулавливаю / Под общ. ред. А. А. Руанова. — М.: Энергия, 1975. — 296 с.
15. *Протасов В. Ф., Молчанов А. В.* Экология, здоровье и природопользование в России. — М.: Финансы и статистика, 1995. — 528 с.
16. Очистка хозяйственно-бытовых сточных вод и обработка осадков / А. Ф. Афанасьева, М. Н. Сирота, Л. С. Савельева и др. — М.: Изограф, 1997. — 96 с.
17. *Чмыр В. П., Шлапак В. П., Бектобеков Г. В.* Защита природной среды. — К.: Либидь, 1994. — 240 с.
18. *Стадницкий Г. В., Родионов А. И.* Экология. — СПб.: Химия, 1996. — 240 с.
19. *Мазур И. И., Молдаванов О. И., Шишов В. Н.* Инженерная экология: В 2-х т. — М.: Высш. шк., 1996. — 637, 655 с.
20. Экология, охрана природы и экологическая безопасность / Под ред. В. И. Данилова-Данильяна. — М.: Изд-во МНЭПУ, 1997. — 744 с.
21. *Бернс Ф., Кордонье Ж.* Водочистка. Очистка сточных вод нефтепереработки. Подготовка водных систем охлаждения. — М.: Химия, 1997. — 288 с.
22. *Булатов М. А., Бондарева Т. И., Кутенов А. М.* Химические производства с замкнутым водооборотным циклом. — М.: МИХМ, 1991. — 80 с.
23. *Терновский И. Г., Кутенов А. М.* Гидроциклонирование. — М.: Наука, 1994. — 350 с.
24. *Дытнерский Ю. И.* Обратный осмос и ультрафильтрация. — М.: Химия, 1978. — 351 с.
25. *Дытнерский Ю. И.* Баромембранные процессы: теория и расчет. — М.: Химия, 1986. — 271 с.
26. Environmental Protection Agency. 1977. State Decision — Makers Guide for Hazardous Waste Management.
27. *Сметанин В. И.* Защита окружающей среды от отходов производства и потребления. — М.: Колос, 2000. — 232 с.
28. *Родионов А. И., Клушин В. Н., Систер В. Г.* Технологические процессы экологической безопасности. — Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. — 800 с.
29. Твердые бытовые отходы: Справочник / В. Г. Систер, А. Н. Мирный, Л. С. Скворцов и др. — М.: Изд-во АКХ им. К. Д. Памфилова, 2001. — 320 с.
30. *Лившиц А. Б.* Современная практика управления твердыми бытовыми отходами // Чистый город. — 1999. — № 1(5). — С. 2—12.
31. *Xenahis E.* «Strategies on Biomass Energies in EU», in the proceedings of Conference «The future of biogas in Europe», Denmark, Hesnig, 1997. P. 12—13.
32. *Алабовский А. Н., Удыма П. Г.* Аппараты погружного горения. — М.: Изд-во МЭИ, 1994. — 256 с.
33. *Калыгин В. Г.* Промышленная экология. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. — 240 с.
34. *Классен П. В., Гришаев И. Г.* Основы техники гранулирования. — М.: Стройиздат, 1982. — 272 с.
35. Каталог НИИОГАЗ. Наша продукция — чистый воздух. — М.: Изд. НИИОГАЗ, 1989. — 17 с.
36. *Доусон Г., Мерсер Б.* Обезвреживание токсичных отходов. — М.: Стройиздат, 1996. — 288 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Каковы главные направления деятельности специалистов в области инженерной защиты биосферы (ООПС)?
2. В чем состоит основное различие технологических газов, дымовых отходов и вентиляционных выбросов?
3. Назовите основные классы аппаратов для очистки газообразных и газопылевых выбросов.
4. Чем отличается процесс абсорбции от процесса адсорбции; соответственно конструкция абсорбера от конструкции адсорбера?
5. Опираясь на классификацию методов (способов) очистки промышленных стоков, назовите наиболее перспективные экобиозащитные технологии обезвреживания жидких отходов.
6. Какие варианты (технологии) вторичной переработки твердых промышленных отходов вам известны?
7. Каким образом соблюдают на практике принципы малоотходных технологий, например, при сжигании твердых отходов?

ГЛАВА 9

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

9.1. Производственный шум: механизм, нормирование и методы защиты

Всякий нежелательный для человека звук является шумом. Интенсивное шумовое воздействие на организм человека неблагоприятно влияет на протекание нервных процессов, способствует развитию утомления, изменениям в сердечно-сосудистой системе и появлению шумовой патологии, среди многообразных проявлений которой ведущим клиническим признаком является медленно прогрессирующее снижение слуха.

Обычные промышленные шумы характеризуются хаотическим сочетанием звуков. В производственных условиях источниками шума являются работающие станки и механизмы, ручные, механизированные и пневмоинструменты, электрические машины, компрессоры, кузнечно-прессовое, подъемно-транспортное, вспомогательное оборудование (вентиляционные установки, кондиционеры) и т.д.

В качестве звука человек воспринимает упругие колебания, распространяющиеся в виде волн в твердой, жидкой или газообразной средах. Звуковые колебания характеризуются скоростью их распространения c и частотой f . Скорость звука связана с длиной волны и частотой

$$c = \lambda f, \quad (9.1)$$

где c — скорость звука, м/с; λ — длина волны, м; f — частота, Гц.

Например, скорость распространения звуковых волн, м/с: 1410 в воде; 5000 в стекле и стали; 40—50 в резине; 343 в воздухе.

Человеческое ухо воспринимает как слышимые звуковые колебания с частотой $f = 16$ (20)... 20 000 Гц. Колебания с частотой ниже 16 (20) Гц (*инфразвук*) и выше 20 кГц (*ультразвук*) не воспринимаются (не слышатся) органами слуха, хотя и вредно влияют на организм человека. Наиболее чувствительно ухо к колебаниям в диапазоне частот от 50 до 5000 Гц, что в основном соответствует диапазону человеческого голоса.

При распространении звуковой волны происходит перенос энергии. Средний поток энергии в какой-либо точке среды в единицу времени, отнесенный к единице поверхности, нормальной к направлению распространения волны, называется *интенсивностью звука* в данной точке.

Колебательные движения упругой среды создают колебания давления, которые ухо воспринимает как звук. *Интенсивность звука*, Вт/м^2 , связана со *звуковым давлением* зависимостью

$$I = p^2 / (\rho c), \quad (9.2)$$

где p — звуковое давление; ρ — плотность среды (газа); c — скорость распространения звука (волны); ρc — удельное акустическое сопротивление среды, равное для воздуха 41 , для воды — $1,5 \cdot 10^5$, для стали — $4,8 \cdot 10^6$ (МПа·с)/м.

Человеческое ухо воспринимает шум со звуковым давлением $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па при $f = 1$ кГц — *порог слышимости*, $p = 200$ Па — *порог болевого ощущения*. Интенсивность звука, соответствующая *порогу слышимости*, при $f = 1$ кГц составляет $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м², а соответствующая *порогу болевого ощущения* $I = 100$ Вт/м².

Для характеристики акустических явлений принята специальная измерительная система интенсивности звука и звукового давления, учитывающая приближенную логарифмическую зависимость между раздражением и слуховым восприятием, — шкала логарифмических единиц — децибелов (дБ), в которых измеряют уровни I и p .

Уровень интенсивности звука

$$L_I = 10 \lg(I/I_0), \quad (9.3)$$

а уровень звукового давления

$$L_p = 10 \lg(p^2/p_0^2) = 20 \lg(p/p_0). \quad (9.4)$$

Подставив значения порога слышимости и порога болевого ощущения в эти формулы, получим, что изменение I и p составляет всего 140 дБ.

Шум, являющийся сложным звуком, можно разложить на простые составляющие, графическое изображение которых называется спектром. Спектр шума может быть разным. По характеру спек-

тра шумы подразделяют на *широкополосные* и *тональные*. По величине интервалов между составляющими его звуками различают шум *дискретный* (*линейчатый*) с большими интервалами, *сплошной* с бесконечно малыми интервалами и *смешанный*, характеризующийся отдельными пиковыми дискретными составляющими на фоне сплошного спектра (рис. 9.1). Производственные шумы чаще всего имеют смешанный спектр [1].

По частоте шумы разделяют на низкочастотные, если максимальные уровни звукового давления лежат в области низких частот (до 350 Гц), среднечастотные (максимум в диапазоне частот 350... 800 Гц) и высокочастотные (максимум выше 800 Гц).

По временным характеристикам шумы подразделяют на *постоянные* и *непостоянные*. К постоянным относятся шумы, уровни звука которых за восьмичасовой рабочий день изменяются во времени не более чем на 5 дБА (уровень звука измеряется шумомером по шкале А). Непостоянные шумы разделяют на *колеблющиеся* во времени, *прерывистые* и *импульсные*. К *колеблющимся* шумам относятся такие, уровни звука которых непрерывно меняются во времени. К *прерывистым* — шумы, уровни звука которых меняются ступенчато на ≥ 5 дБ. К *импульсным* — шумы, состоящие из одного или нескольких звуковых сигналов, длительность каждого из которых менее 1 с. Наибольшую опасность для человека представляют тональные высокочастотные непостоянные шумы.

Любой источник шума характеризуется звуковой мощностью, которая определяет общее количество звуковой энергии, излучаемой источником в окружающее пространство за единицу времени. Мощность звука связана с интенсивностью зависимостью:

$$W = \oint_S L dS, \quad (9.5)$$

где S — поверхность сферы, в центре которой находится источник шума интенсивностью L .

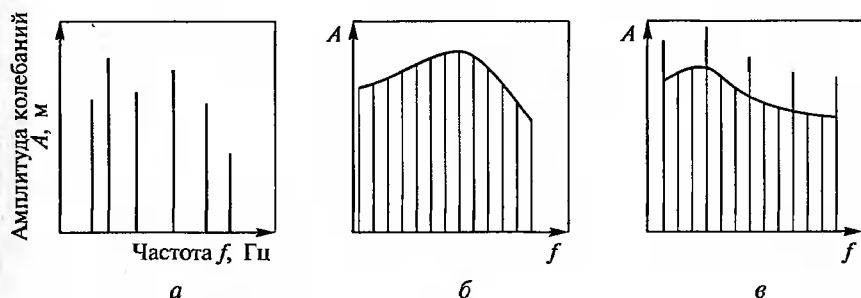


Рис. 9.1. Типы шумовых спектров:

а — дискретный (линейчатый); б — сплошной; в — смешанный

Уровень акустической мощности источника шума:

$$L_W = 10 \lg(W/W_0), \quad (9.6)$$

где W_0 — условный порог акустической мощности ($W_0 = 10^{-12}$ Вт).

Если в производственном помещении находится n одинаковых источников шума, равноудаленных от расчетной точки и обладающих одинаковым уровнем шума L , то общий уровень

$$L_\Sigma = L_1 + 10 \lg n, \quad (9.7)$$

где L_1 — уровень шума одного источника, дБ; n — число источников.

Из формулы (9.7) следует, что два одинаковых источника создадут суммарный уровень всего на 3 дБ больший, чем каждый из них (так как $10 \lg 2 \approx 10 \cdot 0,3 = 3$); 10 источников — на 10 дБ; 100 источников — на 20 дБ и т.д.

На производстве такое условие часто невыполнимо, поскольку износ технологического оборудования неодинаков, поэтому расчет L_Σ ведут по другой формуле

$$L_\Sigma = 10 \lg(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n}), \quad (9.8)$$

где L_1, L_2, L_n — уровни звукового давления, создаваемого источниками в расчетной точке.

При измерении и анализе шумов, проведении акустических расчетов спектры (см. рис. 9.1) оценивают в октавных или третьоктавных диапазонах. Полоса частоты, в которой верхняя граничная частота f_2 в два раза больше нижней f_1 , называется октавной, т.е. $f_2/f_1 = 2$. Для третьоктавной полосы $f_2/f_1 = \sqrt[3]{2} = 1,26$. В качестве частоты, характеризующей полосу в целом, принимают среднюю геометрическую полосу $f_{cp} = \sqrt{f_1 f_2}$. Средние геометрические частоты октавных полос стандартизованы и составляют 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц при соответствующих им граничных частотах, Гц: 45 и 90; 90 и 180; 180 и 355; 355 и 710; 710 и 1400; 1400 и 2800; 2800 и 5600, 5600 и 11200 [1—6].

Допустимые уровни звукового давления нормируют для каждой октавной полосы частот в соответствии с рекомендациями [6]. Этот документ предусматривает дифференцированный подход с учетом характера производственной деятельности в условиях шума (умственный труд, нервно-эмоциональные нагрузки, физический труд и т.д.). Учитывают и характер действующего шума (тональный, импульсный, постоянный и др.) и длительность воздействия шумового фактора при расчете эквивалентных уровней для непостоянных шумов.

Совокупность восьми нормативных уровней звукового давления на разных средних геометрических частотах называется *пре-*

дельным спектром (ПС). Каждый из спектров имеет свой индекс (например, ПС-80, где 80 — нормативный уровень звукового давления, дБ, в октавной полосе с $f = 1000$ Гц).

Некоторые стандартизованные параметры для широкополосного шума приведены в табл. 9.1. Для ориентировочной оценки допускают за характеристику постоянного шума на рабочем месте принимать уровень звука, измеряемой по шкале А шумомера. Самые жесткие нормы шума (см. прил. 15) в настоящее время действуют в России, а наиболее мягкие в США. Чтобы осознать эти значения, необходимо помнить, что шум березовой рощи и пение птиц составляют 35—45 дБА. Величины акустической (звуковой) мощности промышленного оборудования представлены в прил. 16 [8].

Для шума, создаваемого в помещениях установками кондиционирования воздуха, вентиляции и воздушного отопления,

Таблица 9.1

Допустимые уровни звукового давления и эквивалентные уровни звука для широкополосного шума

| Рабочее место | L_p , дБ, в октавных полосах со средними геометрическими частотами, Гц | | | | | | | | Эквивалентные уровни звука, дБА |
|--|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|---------------------------------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| Помещения конструкторских бюро, программистов вычислительных машин, лабораторий теоретических исследований и т. п. | 71 | 81 | 54 | 49 | 45 | 42 | 40 | 38 | 50 |
| Помещения управления, рабочие комнаты | 79 | 70 | 68 | 58 | 55 | 52 | 50 | 49 | 60 |
| Помещения лабораторий экспериментальных исследований | 94 | 87 | 82 | 78 | 75 | 73 | 71 | 70 | 80 |
| Постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственных помещениях | 99 | 92 | 86 | 83 | 80 | 78 | 75 | 74 | 85 |

а также в случае тонального или импульсного шума допустимые уровни на рабочих местах следует принимать на 5 дБ ниже значений, указанных в табл. 9.1. Уровень звука связан с ПС зависимостью

$$\text{дБА} = \text{ПС} + 5 \text{ дБ}. \quad (9.9)$$

Кроме характера выполняемых работ, учитывают и длительность воздействия шума [2]. В этом случае при воздействии широкополосного шума от 0,25 до 4 ч допустимые уровни могут быть увеличены на 20 дБ, а при воздействии тонального или импульсного (0,25—1,5 ч) — на 15 дБ.

На сегодняшний день существует ряд приборов, используемых для анализа шума: ВШВ-003 (позволяет проводить измерения в частотном диапазоне 2(10)—20 000 Гц, уровень измеряемого звука 25—140 дБ), ШВК-1 с фильтрами ФЭ-2, ФЭ-3 (уровень измеряемого звука 30—140 дБ в частотном диапазоне 2—40 000 Гц) и др. В прил. 17 представлены некоторые из них.

Методы защиты от шума [3—5]:

Уменьшение шума в источнике возникновения: замена ударных механизмов безударными, возвратно-поступательных движений вращательными, подшипников качения на подшипники скольжения, совершенствование кинематических схем, применение пластмассовых деталей, использование глушителей из звукопоглощающего материала, виброизоляция шумных узлов и частей машин, покрытие издающих шум поверхностей вибродемпфирующим материалом, статическая и динамическая балансировки.

Звукопоглощение: метод основан на поглощении звуковой энергии волн, распространяющихся по воздуху звукопоглощающими материалами, которые трансформируют ее в тепловую.

Звукопоглощающие материалы и конструкции подразделяют: на волокнисто-пористые (войлок, минеральная вата, фетр, акустическая штукатурка и др.);

мембранные (пленка, фанера, закрепленные на деревянные обрешетки);

резонаторные (классический резонатор Гельмгольца);
комбинированные.

Звукопоглощающие свойства материалов определяются коэффициентом звукопоглощения, равным отношению количества поглощенной звуковой энергии к общему количеству падающей энергии:

$$\alpha = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}}, \quad (9.10)$$

причем при $\alpha = 0$ вся звуковая энергия отражается без поглощения; при $\alpha = 1$ вся энергия поглощается (рис. 9.2).

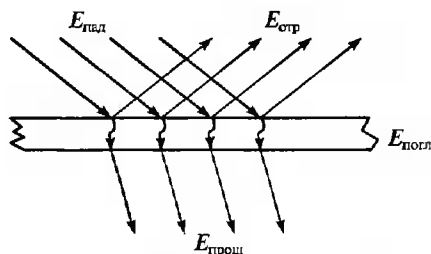


Рис. 9.2. Схема поглощения (отражения) звуковой энергии в листовом конструкционном материале

Коэффициент звукопоглощения α
 конструкционными материалами (элементами):

| | |
|----------------------|---------|
| Бетоном | 0,015 |
| Стеклом | 0,02 |
| Деревом | 0,1 |
| Войлоком | 0,3—0,5 |
| Открытым окном | 1,0 |

Звукопоглощение в помещении определяют по формуле

$$\Delta L_{\text{обл}} = 10 \lg(A_2/A_1), \quad (9.11)$$

где A_1 — полное звукопоглощение в помещении до установки облицовки, м^2 ($A_1 = \alpha_{\text{необл}} S_{\text{пов}}, \text{м}^2$; принимают $\alpha_{\text{необл}} = 0,1$); A_2 — эквивалентная площадь поглощения после установки облицовки, м^2 ($A_2 = A_1 + \Delta A$, где ΔA — добавочное поглощение, вносимое облицовкой).

Тогда величина снижения шума составит

$$\Delta L_{\text{обл}} = 10 \lg(\Delta A/A_1). \quad (9.12)$$

Звукоизоляция: метод основан на отражении звуковой волны, падающей на ограждение (экран).

На рис. 9.3, а показаны пути проникновения шума (воздушного и структурного) при нахождении его источников как снаружи, так и внутри здания, а на рис. 9.3, б — пути проникновения шумов из шумного в тихое помещение. От наружного или внутреннего источника воздушный шум проникает через окна и стены, а вибрации передаются по грунту, трубопроводам и строительным конструкциям, колебания которых вызывают появление структурного шума.

Звукоизолирующие свойства ограждения (экрана) характеризуются коэффициентом звукопроницаемости τ — отношением прошедшей звуковой мощности к падающей

$$\tau = P_{\text{прош}}/P_{\text{пад}}. \quad (9.13)$$

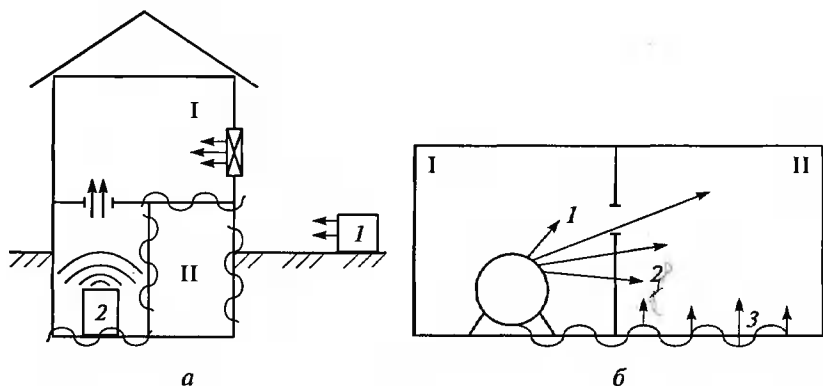


Рис. 9.3. Проникновение шумов:

a — в здании: 1 — источник шума; 2 — источник вибраций; I — воздушный шум; II — структурный шум; *b* — из одного помещения в другое: 1, 2 — распространяющиеся по воздуху звуки или шумы; 3 — энергия упругих колебаний — распространяется по строительным конструкциям и излучается в виде шума (структурные или ударные звуки, шумы); I — шумное помещение, II — тихое помещение

Звукоизолирующая способность конструкции

$$R = -10 \lg \tau. \quad (9.14)$$

Увеличение расстояния от машин (аппаратов), производящих сильный шум: суммарный уровень шума, дБ, на расстоянии r , м, от источника в свободном пространстве

$$L_{\Sigma} = L_0 - 20 \lg r - 11, \quad (9.15)$$

где L_0 — уровень шума источника, дБ.

Индивидуальные средства защиты. Суммарный уровень шума можно снизить на 5—20 дБ, используя вкладыши в ушные раковины: беруши, вату, губку и др. При уровне шума выше 120 дБ применяют наушники (антifoны) и специальные шлемы. Существуют шумопоглощающие кабины, внедряется дистанционное управление сверхшумными процессами или испытаниями.

Можно прогнозировать дальнейшее снижение шума на производственных площадках и, соответственно, в населенных пунктах. Однако при достижении определенных минимальных уровней шума отмечено, что дальнейшее его снижение дается с большим трудом, а затраты на каждый последующий снижаемый децибел могут быть сравнимы с затратами на 5—10 дБ предыдущих [7]. Поэтому борьба с акустическим загрязнением биосферы будет определяться в первую очередь экономическими затратами.

9.2. Вибрация: механизм, нормирование и методы защиты

Под вибрацией понимают механические, часто синусоидальные, колебания системы с упругими связями, возникающие в машинах и аппаратах при периодическом смещении центра тяжести какого-либо тела от положения равновесия, а также при периодическом изменении формы тела, которую оно имело в статическом состоянии. Чаще всего такое колебательное движение происходит из-за неуравновешенных силовых воздействий: дисбаланс вращающихся частей, инерционное возбуждение при работе возвратно-поступательных механизмов, ударные процессы и др.

На рис. 9.4 показана простейшая колебательная система и кривая ее колебаний. Если груз 2 вывести из состояния равновесия, система будет совершать *свободные* или *собственные* (т. е. под действием собственных сил) колебания. Если же периодический возмущающий фактор присутствует во все время колебаний, то они называются *вынужденными*. Наиболее опасно совпадение частот собственных и вынужденных колебаний (явление резонанса).

Вибрацию по способу передачи на человека (в зависимости от характера контакта с источниками вибрации) подразделяют на *местную (локальную)*, передающуюся чаще всего на руки работающего, и *общую*, передающуюся посредством вибрации рабочих мест и вызывающую сотрясение всего организма. В производственных условиях нередко интегрированно действует местная и общая вибрации.

Длительное воздействие вибрации высоких уровней на организм человека приводит к преждевременному утомлению, снижению производительности труда, росту заболеваемости и, нередко, к возникновению профессиональной патологии — вибрационной болезни (прил. 18 [9]).

В зависимости от источника возникновения общая вибрация подразделяется: на транспортную, транспортно-технологическую и технологическую. *Локальной вибрации* подвергаются люди, работающие с ручным механизированным электрическим или пневматическим инструментом.

Для каждой из трех категорий вибрации нормируются величины виброскорости и виброускорения как в линейных единицах (м/с , м/с^2), так и в логарифмических (дБ) в зависимости от частоты вибрации. Общая вибрация нормируется в диапазоне частот 0,8—80 Гц, а местная (локальная) — в ди-

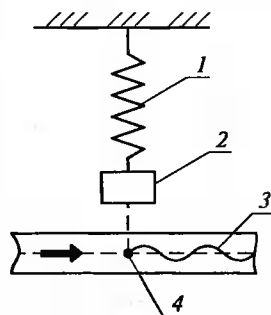


Рис. 9.4. Простейшая колебательная система: 1 — пружина (один конец жестко закреплен); 2 — груз массой m ; 3 — кривая колебаний; 4 — возмущающий фактор

апазоне 8—1000 Гц. При этом учитывается направление действия вибрации: горизонтальная и вертикальная составляющие (z — вертикальная ось, x и y — горизонтальные оси).

В прил. 19 и 20 представлены фрагментарные примеры нормирования как общей (для категории I), так и локальной вибраций [12, 14, 18].

Спектры уровней колебательной скорости являются основными характеристиками вибраций. Они бывают (как и для шума) *дискретными, сплошными и смешанными* (см. рис. 9.1). По характеру спектра вибрацию подразделяют на *узкополосную* и *широкополосную*; по частотному составу — на *низкочастотную* с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах 8 и 16 Гц, *среднечастотную* — 31,5 и 63 Гц, *высокочастотную* — 125, 250, 500, 1000 Гц для локальной вибрации; и соответственно 1 и 4, 8 и 16, 31,5 и 63 Гц для вибрации рабочих мест.

По временным характеристикам вибрацию подразделяют на *постоянную*, для которой величина виброскорости изменяется *не более чем в два раза* (на 6 дБ) за время наблюдения не менее 1 мин, и *непостоянную*, для которой величина виброскорости изменяется *не менее чем в два раза* (на 6 дБ) за то же время наблюдения (≥ 1 мин).

Непостоянную вибрацию подразделяют на *колеблющуюся во времени, прерывистую и импульсную*.

Наиболее опасная частота общей вибрации лежит в диапазоне 6—9 Гц, поскольку она совпадает с собственной частотой колебаний тела человека (~ 6 Гц), его желудка (~ 8 Гц). В результате может возникнуть резонанс, который приведет к механическим повреждениям или разрыву внутренних органов. В положении стоя это возможно для головы относительно основания, плечевого пояса, бедер при $f = 4...6$ Гц, а в положении сидя — для головы относительно плеч — при $f = 4...30$ Гц. Для лежачего человека область резонансных частот находится в интервале 3—3,5 Гц [2].

При частоте больше 16—20 Гц вибрация сопровождается шумом. Шумовые (звуковые) эффекты присутствуют также в инфразвуковом и ультразвуковом диапазонах.

К основным характеристикам вибрации относят: амплитуду смещения A_m , м, скорость v , м/с, ускорение a , м/с², период T , с, или частоту f , Гц, продолжительность и направление действия. Главные параметры в случае синусоидальных колебаний:

$$A = A_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (9.16)$$

$$v = 2\pi f A, \quad (9.17)$$

$$a = (2\pi f)^2 A, \quad (9.18)$$

где A_m — смещение; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; t — время, с; φ — начальная фаза, м.

Весь спектр частот вибраций, воспринимаемых человеком, может быть разделен (как и для шума) на октавные и третьоктавные полосы частот со средними геометрическими частотами октавных полос 1, 2, 4, 8, 16, 32, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000 Гц.

За нулевой уровень колебательной скорости принята величина $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с, соответствующая средней квадратичной колебательной скорости при стандартном пороге звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Порог восприятия вибрации для человека значительно выше: $1 \cdot 10^{-4}$ м/с. За нулевой уровень колебательного ускорения принимают $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с². При колебательной скорости 1 м/с возникают болевые ощущения.

Относительные уровни виброскорости и виброускорения определяются по формулам:

$$L_v = 20 \lg(v/v_0), \quad (9.19)$$

$$L_a = 20 \lg(a/a_0). \quad (9.20)$$

В настоящее время около 40 российских государственных стандартов регламентируют технические требования к вибрационным машинам и оборудованию, системам виброзащиты, методам измерения и оценки параметров вибрации.

Основными нормативными правовыми актами, регламентирующими параметры производственных вибраций, являются документы [14—19].

Для наиболее распространенных в промышленности частот вибраций (15—100 Гц) диапазон амплитуд допустимых колебаний 0,03—0,003 мм.

Защита от вибраций должна начинаться с устранения их источника путем совершенствования кинематических схем и улучшения работы механизмов методами:

статической и динамической балансировки, устраняющей дисбаланс вращающихся масс (деталей) оборудования.

виброизоляции, снижающей уровень вибрации путем уменьшения передачи колебаний от их источника к объекту. Ее осуществляют посредством введения в колебательную систему дополнительной упругой связи, препятствующей передаче вибраций от машины к основанию.

Критерий эффективности виброизоляции — коэффициент передачи, показывающий, какая доля динамической силы, возбуждаемой машиной, передается через амортизаторы на основание:

$$\mu = \text{КП} \frac{\text{Передаваемая через основание сила}}{\text{Возмущающая сила машин}} = \frac{F_m^{\text{основ}}}{F_m^{\text{маш}}}. \quad (9.21)$$

Чем меньше μ , тем лучше виброизоляция. Хорошая виброизоляция достигается при КП = 1/15...1/8. Коэффициент передачи может быть рассчитан по формуле

$$КП = \left[(f/f_0)^2 - 1 \right]^{-1}, \quad (9.22)$$

где f — частота вынужденных колебаний; $f_0 = (2\pi)^{-1} \sqrt{q/m}$ — частота собственных колебаний; q — жесткость виброизоляторов (сила для их деформации на единицу длины); m — масса агрегата.

При $f = f_0$ наступает резонанс!

Амортизаторы подразделяются на *резиновые, пружинные, газовые, гидравлические, комбинированные* и др.

Вибропоглощение и виброгашение. *Вибропоглощение* — нанесение на вибрационную поверхность упруговязких демпфирующих материалов, обладающих большим внутренним трением (резина, мастика, пластики — см. прил. 21 [10]).

Виброгашение — создание добавочной колеблющейся системы с динамической частотой, равной частоте возмущающей силы, но с реакциями, противоположными ей (рис. 9.5).

Для снижения вибрации возможно применение виброгасителей ударных: маятникового, пружинного и плавающего типов, а также камерных. Ориентировочно маятниковые ударные виброгасители используют для гашения колебаний с частотой 0,4—2 Гц, пружинные — 2—10 Гц, плавающие — выше 10 Гц.

Виброгасители камерного типа по конструкции аналогичны камерным глушителям шума и устанавливаются на всасывающей и нагнетательной стороне компрессоров и трубопроводов [10].

Динамическое виброгашение осуществляется также при установке агрегата на массивном фундаменте.

Другим типом виброгасителей являются буферные емкости, служащие для превращения пульсирующего потока газа в равномерный [11].

Индивидуальные средства защиты от вибраций: обувь с амортизирующими подошвами (толстая мягкая резина), антивибрационные рукавицы, в которых амортизатором является прокладка из специального поролона толщиной до 12 мм.

Для контроля уровня вибраций применяют виброметры и шумомеры ВМ-1 (ВВМ-001), ВШВ-003, ВШВ-3М2 и др.

В программе практических мероприятий важную роль отводят разработке и внедрению научно обоснованных режимов труда и отдыха. Например, суммарное время контакта человека с вибрацией не должно превышать 2/3 продолжительности рабочей смены. Рекомендуется устанавливать два регламентируемых пе-

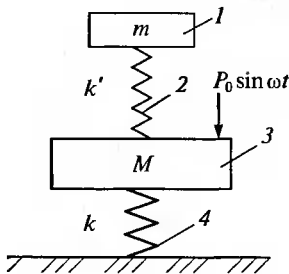


Рис. 9.5. Схема динамического гасителя:

1 — виброгаситель массой m ;
2 — упругий элемент жесткостью k' ; 3 — механизм массой M ; 4 — упругий элемент жесткостью k

перыва для активного отдыха, проведения физиопрофилактических процедур, производственной гимнастики по специальному комплексу.

В прил. 22 приведено допустимое время воздействия локальной и общей вибрации в зависимости от степени превышения ее параметров над нормативными значениями [12, 18].

В прил. 23 указаны допустимые величины вибрации в производственных помещениях предприятий [9].

Список литературы

1. Охрана труда и экологическая безопасность в химической промышленности / А. С. Бобков, А. А. Блинов, И. А. Роздин и др. — М.: Химия, 1997. — 400 с.
2. *Липунов А. Г., Погорелов В. Н., Подгорных Е. А.* Охрана труда. — М.: ИЦ «Витязь», 1996. — 240 с.
3. ГОСТ 12.1.0.03—89. Шум. Общие требования безопасности.
4. ГОСТ 12.1.0.01—89. Ультразвук. Общие требования безопасности.
5. ГОСТ 12.1.0.29—80. Средства и методы защиты от шума. Классификация.
6. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
7. *Иванов Н. И.* Проблемы акустического загрязнения окружающей среды // Экология и промышленность России. — 1998. — № 8. — С. 30.
8. Инженерная экология / Под ред. В. Т. Мелведева. — М.: Гардарика, 2002. — 687 с.
9. Безопасность жизнедеятельности / Под ред. Э. А. Арустамова. — М.: Изд. дом «Дашков и К°», 2000. — 678 с.
10. Охрана окружающей среды / Под ред. С. В. Белова. — М.: Высш. шк., 1991. — 319 с.
11. Безопасность жизнедеятельности / Под ред. О. Н. Русака. — СПб.: ЛТА, 1997. — 293 с.
12. Справочная книга по охране труда в машиностроении / Г. В. Бектобеков, Н. Н. Борисова, В. И. Коротков и др. — Л.: Машиностроение, 1989. — 541 с.
13. Экология и безопасность жизнедеятельности / Д. А. Кривошеин, Л. А. Муравей, Н. Н. Роева и др. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. — 447с.
14. СН 2.2.4/2.1.8.556-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданиях.
15. ГОСТ 12.4.0.12—83. Вибрация. Средства измерения и контроля вибрации на рабочих местах.
16. ГОСТ 12.4.0.02—74. Средства индивидуальной защиты рук от вибрации. Общие требования.
17. ГОСТ 12.4.0.24—76. Обувь специальная виброзащитная.
18. ГОСТ 12.1.0.12—90. Вибрационная безопасность. Общие требования.
19. ГОСТ 12.1.0.43—84. Вибрация. Методы измерения на рабочих местах в производственных помещениях.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие характерные закономерности присущи волновым процессам? Дайте понятия основным параметрам.
2. Какие вы знаете типы, виды техногенных шумов?
3. Чем отличается структурный шум от воздушного шума?
4. Что такое «нормирование» шумов и вибрации? Какие параметры выбраны для нормирования?
5. Назовите методы защиты от производственного шума, ультра- и инфразвука, вибрации.
6. В чем проявляется биологическое действие вибрации? В чем состоит особенность и отличие виброгашения от виброизоляции?
7. Какими приборами измеряют шум, ультра- и инфразвук, а также вибрацию?

ГЛАВА 10

НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ И ИОНИЗИРУЮЩИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ (ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛЯ) ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

10.1. Неионизирующие поля и излучения.

Электромагнитное загрязнение биосферы: опасность, оценка, технические средства защиты

С развитием электроэнергетики, радио- и телевизионной техники, средств связи, электронной офисной техники, специального промышленного оборудования появилось большое количество искусственных источников электромагнитных полей (ЭМП), что обусловило интенсивное «электромагнитное загрязнение» среды обитания человека.

Биологические эффекты электромагнитных воздействий на человека зависят от частоты, продолжительности и интенсивности облучения, площади облучаемой поверхности и общего состояния здоровья человека. Наиболее чувствительны больные организмы, в частности, страдающие аллергическими заболеваниями или имеющие склонность к образованию опухолей. Очень опасно облучение в период эмбриогенеза и в детском возрасте [1].

Длительное воздействие ЭМП на организм человека вызывает нарушение функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем, что выражается в повышенной утомляемости, снижении качества выполняемой работы, сильных болях в области сердца, изменении кровяного давления и пульса. Наиболее характерными при воздействии радиоволн всех диапазонов являются отклонения от нормального состояния центральной нервной и сердечно-сосудистой систем человека.

К субъективным ощущениям относятся: частая головная боль, сонливость или бессонница, вялость, слабость, утомляемость, рассеянность, головокружение и др. Иногда проявляется мутагенное воздействие и временная стерилизация при облучении с интенсивностями выше теплового порога [2].

10.1.1. Механизм ЭМП

Электромагнитные поля окружают нас постоянно. Однако человек различает только видимый свет, который занимает лишь узкую полосу спектра ЭМВ — электромагнитных волн (рис. 10.1). Глаз человека не различает ЭМП, длина волны которых больше или меньше длины световой волны, поэтому мы не видим излучений промышленного оборудования, радаров, радиоантенн, линий электропередач и др. Все эти устройства, как и многие другие, использующие электрическую энергию, излучают так называемые антропогенные ЭМП, которые вместе с естественными полями Земли и Космоса создают сложную и изменчивую электромагнитную обстановку.

Электромагнитное поле — особая форма материи, посредством которой осуществляется воздействие между электрическими заряженными частицами [3]. Физические причины существования ЭМП связаны с тем, что изменяющееся во времени *электрическое поле* напряженностью E , В/м, порождает *магнитное поле* напряженностью H , А/м, а изменяющееся магнитное поле — вихревое электрическое поле. Обе компоненты, E и H , непрерывно изменяясь, возбуждают одна другую (рис. 10.2).

Векторы \vec{E} и \vec{H} бегущей ЭМВ в зоне распространения всегда взаимно перпендикулярны. При распространении в проводящей среде напряженности электрического и магнитного полей связаны соотношением

$$E = H(\omega\mu/\gamma)^{0.5} \exp(-kR), \quad (10.1)$$

где ω — частота электромагнитных колебаний; μ — магнитная проницаемость вещества экрана; γ — удельная проводимость ве-

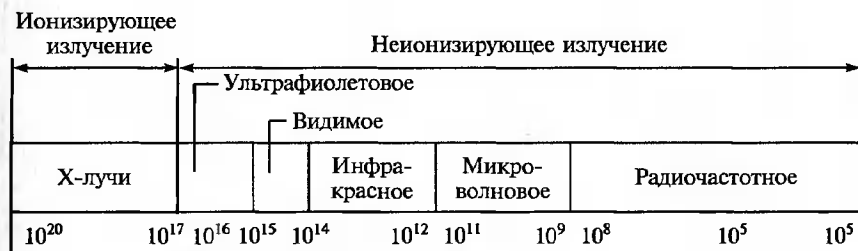


Рис. 10.1. Электромагнитный спектр

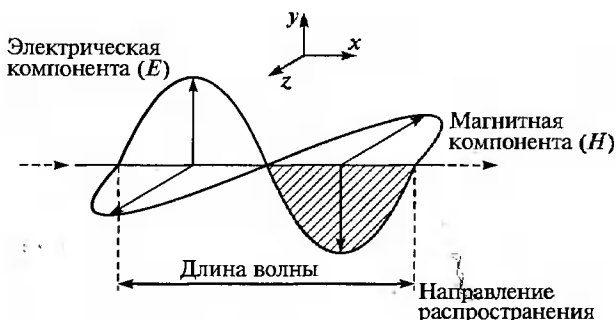


Рис. 10.2. Две компоненты ЭМП (дальняя зона излучения)

шества экрана; k — коэффициент затухания; R — расстояние от входной плоскости экрана до рассматриваемой точки [4].

Электромагнитные поля неподвижных или равномерно движущихся заряженных частиц неразрывно связано с этими частицами. При ускоренном движении заряженных частиц ЭМП «отрывается» от них и существует независимо в форме электромагнитных волн (не исчезая с устранением источника). Например, радиоволны не исчезают и при отсутствии тока в излучившей их антенне.

Электромагнитные поля характеризуются *длиной волны* λ . Источник, генерирующий излучение, т.е. создающий электромагнитные колебания, характеризуется *частотой* f . Международная классификация ЭМВ по частотам приведена в табл. 10.1 [3].

Таблица 10.1

Международная классификация электромагнитных волн

| Частоты | Диапазон | Длины волн | Диапазон |
|---------------------|--------------|-------------------|-------------|
| Крайне низкие, КНЧ | 3—30 Гц | Декаметровые | 100—10 Мм |
| Сверхнизкие, СНЧ | 30—300 Гц | Метровые | 10—1 Мм |
| Инфракрасные, ИНЧ | 0,3—3 кГц | Гектокилометровые | 1000—100 км |
| Очень низкие, ОНЧ | 3—30 кГц | Мириаметровые | 100—10 км |
| Низкие частоты, НЧ | 30—300 кГц | Километровые | 10—1 км |
| Средние, СЧ | 0,3—3 МГц | Гектометровые | 1—0,1 км |
| Высокие частоты, ВЧ | 3—30 МГц | Декаметровые | 100—10 м |
| Очень высокие, ОВЧ | 30—300 МГц | Метровые | 10—1 м |
| Ультравысокие, УВЧ | 0,3—3 ГГц | Дециметровые | 1—0,1 м |
| Сверхвысокие, СВЧ | 3—30 ГГц | Сантиметровые | 10—1 см |
| Крайне высокие, КВЧ | 30—300 ГГц | Миллиметровые | 10—1 мм |
| Гипервысокие, ГВЧ | 300—3000 ГГц | Децимиллиметровые | 1—0,1 мм |

Особенностью ЭМП является его деление на «ближнюю» и «дальнюю» зоны. На практике в «ближней» зоне — зоне индукции на расстоянии от источника $r < \lambda$ ЭМП можно считать квазистатическим. Здесь оно быстро убывает с расстоянием, обратно пропорционально r^2 или r^3 . Поле в зоне индукции служит для формирования электромагнитной волны. «Дальняя» зона ($r \geq 3\lambda$) — зона сформировавшейся электромагнитной волны, в которой интенсивность поля убывает обратно пропорционально расстоянию до источника r^{-1} . Граница «ближней» и «дальней» зоны представлена на рис. 10.3 [3].

Согласно теории ЭМП, «ближняя» (зона индукции) находится на расстоянии

$$r \leq \lambda/2\pi \approx \lambda/6,$$

где $\lambda = c/f$ — длина волны; c — скорость распространения волны (для вакуума или воздуха — скорость света); f — частота электромагнитных колебаний. «Дальняя» зона, или зона распространения (зона излучения), находится на расстоянии $r > \lambda/6$ [4].

В зоне индукции еще не сформировалась бегущая волна, вследствие чего E и H инвариантны, поэтому нормирование в этой зоне ведут как по электрической, так и по магнитной составляющей поля. Это характерно для ВЧ-диапазона. В зоне излучения ЭМП характеризуется электромагнитной волной, наиболее важным параметром которой является плотность потока мощности (ППМ).

В «дальней» зоне излучения принимают $E = 377H$, где 377 — волновое сопротивление вакуума, Ом. В российской практике санитарно-гигиенического надзора на частотах выше 300 МГц в «дальней» зоне излучения обычно измеряют плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ) или плотность потока мощности (ППМ) — S , Вт/м². За рубежом ППЭ обычно измеряют для частот > 1 ГГц. ППЭ характеризует величину энергии, теряемой системой за единицу времени вследствие излучения электромагнитных волн.

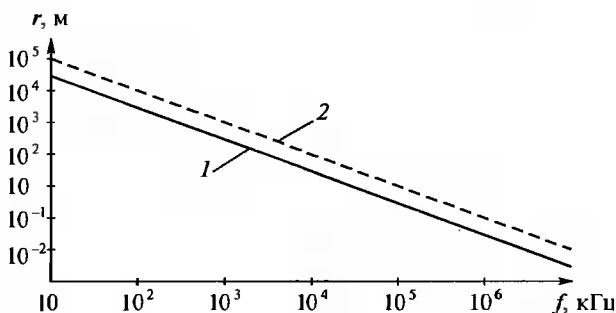


Рис. 10.3. Ближняя (1) и дальняя (2) зоны ЭМП для разных частот

10.1.2. Природные (естественные) источники ЭМП

Природные (естественные) источники ЭМП делят на две группы. Первая — поле Земли: постоянное (основное) магнитное поле (55,7—33,4 А/м, причем напряженность геомагнитного поля убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору). Процессы в магнитосфере вызывают колебания геомагнитного поля в широком диапазоне частот: от 10^{-5} до 10^2 Гц, амплитуда может достигать сотых долей ампер на метр. Вторая — радиоволны, генерируемые космическими источниками (Солнце, галактики и др.). В силу относительно низкого уровня излучения космических радиоисточников и нерегулярного характера воздействия их суммарный эффект поражения земных биообъектов незначителен.

Человеческое тело также излучает ЭМП с частотой более 300 ГГц и плотностью потока энергии $\sim 0,003$ Вт/м². Если общая площадь поверхности среднего человеческого тела 1,8 м², то общая излучаемая энергия составляет примерно 0,0054 Вт.

10.1.3. Техногенные (антропогенные) источники ЭМП

Техногенные (антропогенные) источники ЭМП в соответствии с международной классификацией также делят на две группы. Первая — источники, генерирующие крайне низкие и сверхнизкие частоты от 0 Гц до 3 кГц. Вторая — источники, генерирующие от 3 кГц до 300 ГГц, включая микроволны (СВЧ-излучение) в диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц (табл. 10.2).

Таблица 10.2

Некоторые техногенные источники ЭМП (ЭМИ) [5]

| Источники излучения | Диапазоны частот излучения, волны |
|---|--|
| Радиотехнические объекты | 30 кГц—30 МГц |
| Радиопередающие станции | 30 кГц—300 МГц |
| Радиолокационные и радионавигационные станции | СВЧ-диапазон (300 МГц—300 ГГц) |
| Телевизионные станции | 30 МГц—3 ГГц |
| Плазменные установки | Видимый, ИК-, УФ-диапазоны |
| Термические установки | Видимый, ИК-диапазон |
| Высоковольтные линии электропередач | Промышленные частоты, статическое электричество |
| Рентгеновские установки | Жесткий УФ, рентгеновский диапазон, видимое свечение |
| Лазеры | Оптический диапазон |
| Мазеры | СВЧ-диапазон |

| Источники излучения | Диапазоны частот излучения, волны |
|--|--|
| Технологические установки | ВЧ, СВЧ, ИК, УФ, видимый, рентгеновский диапазоны |
| Ядерные реакторы | Излучения рентгеновское и γ , ИК, видимое и т. п. |
| Источники ЭМП специального назначения (наземные, водные, подводные, воздушные), применяемые в радиоэлектронном противодействии | Радиоволны, оптический диапазон, акустические волны (комбинированность действия) |

К первой группе относятся в первую очередь все системы производства, передачи и распределения электроэнергии.

Источником электрических полей промышленной частоты являются, например, токоведущие части действующих электроустановок: линии электропередач (ЛЭП), трансформаторные подстанции, электростанции, индукторы, конденсаторы термических установок, фидерные линии, генераторы, трансформаторы, электромагниты, соленоиды, электро- и кабельная проводки, металло-керамические магниты, офисная электро- и электронная техника, транспорт на электроприводе и др. В разных технологиях электромагнитную энергию высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов используют в основном для процессов электротермии, т. е. для нагрева материала в ЭМП. Данное направление перспективно, так как обеспечивает высокие скорости и качество обработки материалов, экологически и экономически эффективно: в ЭМП разогрев материала на атомном и молекулярном уровнях происходит во всем объеме сразу за счет электрических потерь, тогда как температура окружающей среды остается практически не измененной [4].

Вторую группу составляют функциональные передатчики (коммерческие передатчики, радиотелефоны, средства направленной радиосвязи, навигации, локаторы), различное технологическое оборудование, использующее СВЧ-излучение, переменные (50 Гц—1 МГц) и импульсные магнитные поля, медицинские терапевтические и диагностические установки (20 МГц—3 ГГц), бытовое оборудование (СВЧ-печи), средства визуального отображения информации на электронно-лучевых трубках (мониторы ПК, телевизоры и т. п.).

10.1.4. Нормирование ЭМП

Применение новых технологических процессов и радиоэлектронных систем и устройств, излучающих электромагнитную энер-

гию в окружающую среду, создает и ряд трудностей, связанных с отрицательным воздействием ЭМИ на организм человека. Установлено, что этот вид энергии воздействует на весь организм, вызывая его перегрев под влиянием переменного поля, а также отрицательно действует и на отдельные системы организма. Данные об интенсивности облучения человека на некоторых рабочих местах приведены в табл. 10.3 [3].

Нормативной базой в Российской Федерации являются санитарные нормы и правила (СНиП), а также предельно допустимые уровни (ПДУ) для некоторых источников ЭМП. Нормируют ЭМИ в соответствии с нормативными документами и справочными данными [7—21]. В табл. 10.4 приведены допустимые значения *E* и *H* и энергети-

Таблица 10.3

Интенсивность ЭМИ на рабочих местах

| Производственный процесс | Основные источники излучения | Интенсивность облучения персонала, мкВт/см ² |
|--|---|---|
| Регулировка, настройка и испытание комплекса РЛС в выпускных цехах заводов и ремонтных мастерских | Антенные системы | ≥ 1000 |
| Регулировка, настройка и испытание комплекса РЛС в условиях полигона | Антенные системы | ≥ 500 |
| Регулировка, настройка и испытание отдельных СВЧ-узлов, блоков и приборов | Катодные выводы магнетрона, волноводо-коаксиальные переходы и др. | ≤ 1000 |
| Научно-исследовательские работы | Антенные устройства, генераторные блоки, СВЧ-приборы и др. | ≤ 1000 |
| Эксплуатация РЛС на аэродромах гражданской авиации | Антенные системы | 100—1000 |
| Эксплуатация СВЧ-аппаратов в некоторых областях народного хозяйства, в том числе физиотерапевтические кабинеты | Антенные системы, генераторные блоки, излучатели и др. | 1—2000 |
| Контрольно-измерительные работы в экранированных помещениях | Генераторные блоки, антенные системы | 5—50 (сложные ЭМП) |

Предельно допустимые уровни напряженности и ЭН — энергетической нагрузки ЭМП*

| Частоты, МГц | E , В/м, \leq | H , А/м, \leq | Нормативная энергетическая нагрузка, (мкВт·ч)/см ² | Дополнения |
|-------------------------|-------------------|-------------------|---|---|
| 6·10 ⁻² —3 | 50 | — | — | Допускается превышение уровней в два раза при воздействии не более 0,5 рабочего дня |
| 3—30 | 20 | — | | |
| 30—50 | 10 | — | | |
| 50—300 | 5 | — | | |
| 6·10 ⁻² —1,5 | — | 5 | | |
| 30—50 | — | 0,3 | | |
| 300—3·10 ⁵ | — | — | 200 | Кроме случаев облучения от вращающихся и сканирующих антенн |
| | — | — | 2000 | Облучение от вращающихся и сканирующих антенн с частотой 1 Гц и скважностью не менее 50 |
| | — | — | 2000 | Последовательное или одновременное облучение в непрерывном или прерывистом режимах |

* В течение рабочего дня.

ческой нагрузки ЭМП на рабочих местах и в местах возможного нахождения персонала. Указанные значения не должны превышать в течение рабочего дня в зависимости от природы полей [7—9, 16].

Электромагнитное поле радиочастот

Электрическая напряженность на рабочих местах не должна превышать 20 В/м в диапазоне частот 100 кГц—30 МГц и при $f = 30—300$ МГц; *магнитная* $H \leq 5$ А/м при $f = 0,1 \div 1,5$ МГц. В диапазоне СВЧ 300 МГц—300 ГГц допустимая ППМ при облучении в течение всего рабочего дня составляет 10 мкВт/см², 2 ч — 100 мкВт/см², 15—20 мин — 1000 мкВт/см² (при обязательном использовании защитных очков).

В остальное рабочее время интенсивность облучения не должна превышать 10 мкВт/см².

В случае непрерывного облучения от вращающихся и сканирующих антенн ПДУ облучения 100 мкВт/см² при 8 ч воздействия и 1000 мкВт/см² при облучении до 2 ч/сут.

Для лиц, профессионально не связанных с облучением, и для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см².

Электрические поля промышленной частоты (50 Гц)

ПДУ напряженности электрического поля в жилых помещениях составляет 500 В/м. ПДУ электрических полей, излучаемых воздушными ЛЭП напряжением 300 кВ и выше [14]:

внутри жилых зданий — 500 В/м;

на территории жилой застройки — 1 кВ/м;

в ненаселенной местности — 15 кВ/м.

Для защиты населения вдоль ЛЭП устанавливаются СЗЗ, в пределах которых запрещается строить жилые и общественные здания, склады нефтепродуктов, ремонтировать механизмы и машины. Размеры зоны ограничений застройки и СЗЗ выбирают по методикам, представленным в СН 2971-84 и 2963-84, или по табл. 10.5 и 10.6.

В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 для вновь проектируемых ЛЭП при $E \geq 1$ кВ/м, зданий и сооружений допускаются следующие границы СЗЗ: 20 м — при 330 кВ; 30 м — при 500 кВ; 40 м — при 750 кВ; 55 м — при 1150 кВ [21].

Таблица 10.5

Граница санитарной зоны вдоль ЛЭП

| Напряжение, кВ | Расстояние от проекции на землю крайних фаз проводов, м | Напряжение, кВ | Расстояние от проекции на землю крайних фаз проводов, м |
|----------------|---|----------------|---|
| 1150 | 300 (55) | 220 | 25 |
| 750 | 250 (40) | 110 | 20 |
| 500 | 150 (30) | 35 | 15 |
| 330 | 75 (20) | До 20 | 10 |

Примечание. Расстояния в скобках допускаются для сельской местности.

Таблица 10.6

Санитарно-защитные зоны радио- и телестанций

| Объекты | Частоты, МГц | СЗЗ, м |
|-----------------------|--------------|----------|
| ДВ радиостанции | 0,03—0,3 | 100—1000 |
| СВ радиостанции | 0,3—3 | 200—1000 |
| КВ радиостанции | 3—30 | 50—700 |
| ТВ и УКВ радиостанции | 30—1000 | 25—800 |

Источники ЭМП частот 0—3 кГц

Составляющие напряженности ЭМП источников этой группы представлены в табл. 10.7.

Таблица 10.7

Параметры ЭМП ЛЭП

| Источник | E , В/м | H , А/м |
|---|-------------|------------------|
| ЛЭП 6—35 кВ | 10—500 | 0,1—2 |
| ЛЭП 110 кВ | 100—3000 | 0,1—20 |
| ЛЭП 330 кВ | 1000—5000 | 10—100 |
| ОРУ* подстанции 500 кВ | 1000—50 000 | 10—100 |
| Кабель электропитания подъезда жилого дома | ≤ 300 | $B \leq 20$ мкТл |

* Открытое распределительное устройство.

Общая протяженность российских ЛЭП напряжением 6—1150 кВ превышает 4,5 млн км. Провода ЛЭП излучают энергию в окружающее пространство. Напряженность полей под линией зависит от напряжения ЛЭП (электрическое поле), нагрузки (магнитное поле), высоты подвески, расстояния между проводами, растительного покрова и рельефа местности под линией (электромагнитная энергия в значительной мере поглощается почвой). Однако замеры в местах прохождения ЛЭП-500 кВ по территории населенных пунктов показывают, что население во многих случаях облучается повышенными уровнями поля.

При $E > 1$ кВ/м должны быть приняты меры по исключению воздействия на человека ощутимых электрических разрядов и токов стекания в случаях касания изолированных от земли объектов — машин и механизмов [5, 6, 21].

Магнитное поле промышленной частоты

ПДУ напряженности магнитного поля для условий выполнения работ под напряжением установлены на уровне 3,2 кА/м при воздействии на тело работающего и 5,2 кА/м — при воздействии на кисти рук. Международные рекомендации IRPA/INIRC содержат более жесткие нормы: 400 А/м для производственных воздействий и 80 А/м — для населения.

По действующим европейским нормам ENV-50166 (1995) допустимые значения напряженности разделены на три категории:

1) $E = 6,1$ кВ/м, $H = 159$ А/м (при превышении обязательная информация персонала);

2) $E = 12,3$ кВ/м, $H = 320$ А/м (при превышении обязательно ограничение времени пребывания под действием ЭМП);

3) $E = 19,6$ кВ/м, $H = 480$ А/м (кроме ограничения времени пребывания обязательно предупреждение «Опасная работа!»).

10.1.5. Основные методы коллективной и индивидуальной защиты от ЭМП

В зависимости от условий воздействия ЭМП, характера и местонахождения источника излучения могут быть использованы: защита временем и расстоянием, снижение интенсивности излучения и экранирование источника, защита рабочего места от излучения, применение средств индивидуальной защиты (СИЗ).

Защита временем

Применяется в отсутствии возможности уменьшить напряженность (интенсивность) ЭМП до ПДУ. Допустимое время (τ) определяют из соотношения

$$6,42 = \text{ППМ} \text{th} (0,05\tau)^{1,2}. \quad (10.2)$$

Защита расстоянием (наиболее эффективный метод)

Используется, если нельзя снизить интенсивность облучения другими методами.

Для диапазона ДВ, СВ, КВ и УКВ «защитное» расстояние

$$R = \sqrt{30\rho G/E_{\text{доп}}}, \quad (10.3)$$

где ρ — средняя выходная мощность, Вт; G — коэффициент направленности антенны; $E_{\text{доп}}$ — допустимая напряженность электрического поля, В/м.

Для диапазона СВЧ

$$R = \sqrt{30\rho G/4\pi\text{ППМ}_{\text{доп}}}. \quad (10.4)$$

Уменьшение мощности излучения

Осуществляется непосредственной регулировкой передатчика (генератора); его заменой на менее мощный с помощью специальных устройств — аттенуаторов, которые поглощают, отражают или ослабляют передаваемую энергию на пути от генератора к антенне.

Экранирование источника

Основными видами средств коллективной защиты (включая рабочие места) являются экранирующие устройства — составные

части электрической установки, предназначенные для защиты персонала в ОРУ и на воздушных ЛЭП.

Конструктивно экранирующие устройства оформляют в виде козырьков, навесов или перегородок из металлических канатов, прутков, сеток или пластин из резины. Они должны иметь антикоррозионное покрытие и быть заземлены.

Экраны делятся на *поглощающие* и *отражающие* электромагнитную энергию. Выбор конструкции экранов зависит от характера технологического процесса, мощности источника и диапазона волн. Коэффициент экранирования

$$L = 20 \lg \Theta, \quad (10.5)$$

где $\Theta = E/E_{\Theta} > 1$ (или $H/H_{\Theta} > 1$) — эффективность экранирования.

Наряду со *стационарными* и *переносными* экранирующими устройствами применяют *индивидуальные* экранирующие комплекты (предназначены для защиты от воздействия ЭМИ $E \leq 60$ кВ/м, создаваемого 50-Гц электроустановками напряжением 400, 500 и 750 кВ). В состав экранирующих комплектов входят спецодежда из металлизированной ткани, средства защиты головы, рук и лица.

10.1.6. Безопасность лазерного излучения

Особое место среди источников ЭМИ (ЭМП) занимают лазерные установки. В промышленности применяют лазерные установки, работающие в диапазонах длин волн от ИК до рентгеновского (от 0,2 до 1000 мкм с большой плотностью энергии). Лазерная технология, например, обработка материалов лазерным излучением, позволяет осуществлять сварку материалов, сверление, резку и т. д.

Благодаря уникальным свойствам (точной направленности луча, когерентности, монохроматичности), эти устройства также широко используют, в частности, в физике, химии, биологии, практической медицине (хирургия, офтальмология).

Лазер — оптический квантовый генератор (ОКГ) ЭМИ оптического диапазона, преобразующий энергию разных видов в энергию лазерного луча. Плотность мощности излучения лазерных установок достигает $10^{11} - 10^{14}$ Вт/см², а для испарения большинства материалов достаточно 10^9 Вт/см². Для сравнения: плотность солнечного излучения 0,15—0,25 Вт/см². Поэтому серьезную опасность представляет не только прямое, но и диффузионно отраженное лазерное излучение. Проявляются и сопутствующие факторы: ЭМП, высокое напряжение, аэрозоли от возгона веществ в зоне действия лазерного луча [17].

Существуют лазеры газовые, жидкостные и твердотельные (на диэлектрических кристаллах, стеклах, полупроводниках) непрерывного и импульсного (моноимпульсного и импульсно-перио-

дического) действия. Классификация лазеров по степени опасности генерируемого излучения, требования к конструкции лазерных установок и технологическим процессам с использованием таких установок приведены в стандартах и нормах [18—20].

В основу классификации лазеров положена степень опасности лазерного излучения для обслуживающего персонала:

класс I (безопасные) — выходное излучение не опасно для *глаз*;

класс II (малоопасные) — опасно для *глаз* прямое или зеркально отраженное излучение;

класс III (среднеопасные) — опасно для *глаз* прямое, зеркально и диффузионно отраженное излучение на расстоянии 10 см от отражающей поверхности и (или) для *кожи* прямое или зеркально отраженное излучение;

класс IV (высокоопасные) — опасно для *кожи* диффузионно-отраженное излучение на расстоянии 10 см от отражающей поверхности.

Биологические эффекты от действия луча лазера на живые ткани заключаются в термическом (тепловом), энергетическом, фотохимическом и механическом воздействиях, а также электрострикции и образовании в пределах клетки микроволнового ЭМП (ЭМИ). Эти воздействия нарушают жизнедеятельность как отдельных органов, так и всего организма. Выделяют первичный и вторичный механизмы воздействия на человека. Первичный проявляется в органических изменениях облучаемых тканей (ожоги), вторичный — как реакция на облучение (расстройства центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, изменения в обмене веществ и др.).

В качестве приоритетных критериев при оценке *степени опасности генерируемого лазерного излучения* приняты: энергия или мощность излучения, плотность энергии (мощности), длительность и длина волны излучения.

ПДУ, требования к устройству, размещению и безопасной эксплуатации лазеров позволяют разрабатывать мероприятия по обеспечению безопасных условий труда при работе с ними. Санитарные нормы и правила определяют ПДУ для каждого режима работы, участка оптического диапазона по специальным формулам и таблицам. Нормируется энергетическая экспозиция облучаемых тканей [19, 20]. В качестве примера ниже приведены ПДУ лазерного излучения (энергетической экспозиции) при облучении ультрафиолетовой областью спектра [16]:

| | | | | | | |
|-------------------------------|---------|------------|------------|------------|------------|---------|
| λ , нм | 200—210 | ≤ 215 | ≤ 290 | ≤ 300 | ≤ 370 | > 370 |
| ПДУ, Дж/см ² | 0,0001 | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 1,0 | 2,0 |

Предупреждение поражений лазерным излучением включает систему мер инженерно-технического, планировочного, организационного и санитарно-гигиенического характера.

При использовании лазеров II и III классов в целях исключения облучения персонала необходимо ограждение лазерной зоны или экранирование пучка излучения. Экраны и ограждения должны быть огнестойки, не выделять токсичных веществ при нагреве, из материалов с наименьшим коэффициентом отражения. Лазеры IV класса опасности размещают в отдельных изолированных помещениях и обеспечивают дистанционным управлением. При монтаже в одном помещении нескольких лазеров следует исключить возможность облучения операторов «соседними» установками.

Для удаления возможных токсичных газов, паров и пыли оборудуют приточно-вытяжную вентиляцию. Для защиты от шума применяют звукоизоляцию установок, звукопоглощение и др.

В качестве индивидуальных средств защиты используют очки со специальными стеклами — фильтрами, щитки, маски, халаты светло-зеленого или голубого цветов [17].

Контроль уровней лазерного излучения проводят в основном фотоэлектрическими приборами, например, ЛДМЗ, «Измеритель-1» (для контроля плотности мощности и энергии отраженного лазерного излучения при длинах волн, мкм: 0,53; 0,63; 0,69; 1,069) и ИЛД-2 (для измерения направленного и отраженного излучения волн 0,49—1,15 и 2—11 мкм).

10.1.7. Безопасность персональных ЭВМ (ПК)

Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) ПК являются источниками ЭМИ весьма широкого диапазона частот. Порождаемое ЭЛТ низкочастотное, высокочастотное, инфракрасное, видимое световое, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения требуют специального анализа и специфических экозащитных мероприятий. Основными источниками ЭМП в НЧ и ВЧ-диапазонах являются экран монитора, питающие провода (разъемы) и системный блок (рис. 10.4).

Результаты работ по комплексному обследованию электромагнитной обстановки на рабочих местах пользователей персональных компьютеров (с ЭЛТ) представлены в табл. 10.8. Очевидно, что распределение ЭМП в помещениях с компьютерами неравномерно, а уровни достаточно высоки, что позволяет говорить об опасном факторе их биологического воздействия.

Излучение монитора должно укладываться в нормы ГОСТ Р 50949—96 и СанПиН 2.2.2.542-96 [15], которые, в основном, соответствуют известному шведскому стандарту безопасности (*Swedish National Board of Measurements and Testing*) *MPR II (Measurements of Power Radiation)*, принятому в конце 1990 г. Данный стандарт разработан на принципе *ALARA* («*As Low As Rationally Achievable*» — «Столь низко, как разумно достижимо»), и учитывает комплексное воздействие на оператора многих психофизиологи-

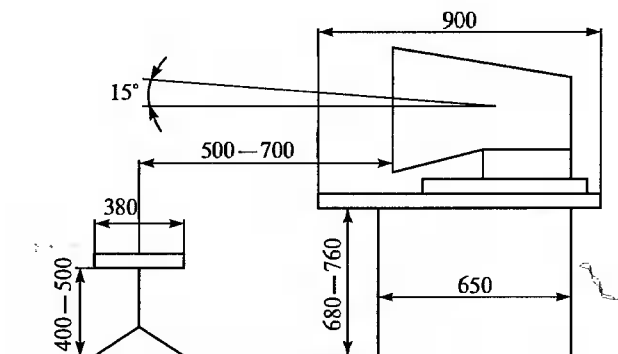


Рис. 10.4. Схема рабочего места пользователя ПК с ЭЛТ

ческих и физических факторов, включая ЭМП естественного происхождения. Мониторы ведущих стран с маркировкой «*Low Radiation*» оснащены встроенными средствами защиты и в полной мере отвечают требованиям ISO. Новым направлением является применение металлизированных покрытий, экранирующих волокон, наносимых изнутри на стенки корпуса монитора, а также специальный состав стекла, из которого сделан экран ЭЛТ. Данные технические решения снижают уровень электростатического поля в 10—100 раз, а переменных электрических и магнитных полей — в 2—5 раз по сравнению с незащищенными моделями мониторов.

Таблица 10.8

**Максимальные зафиксированные на рабочем месте напряженности поля
(Центр безопасности, ЛИПЭМС ВНИИФТРИ)**

| Поле | По оси экрана | Вокруг монитора |
|--------------------|---------------|-----------------|
| Электрическое: | | |
| 100 кГц—300 МГц | 17 В/м | 24 В/м |
| 0,02—2 кГц | 150 В/м | 155 В/м |
| 2—400 кГц | 14 В/м | 16 В/м |
| Магнитное: | | |
| 0,02—2 кГц | 550 мА/м | 600 мА/м |
| 2—400 кГц | 35 мА/м | 35 мА/м |
| Электростатическое | 22 В/м | — |

Дополнительным мероприятием остается использование экранных фильтров. Наивысшую степень защиты (по зарубежным данным) обеспечивают следующие фильтры: Эргостар, АЗФ-1 «Эргон» (РФ), «Русский щит», *Polaroid* (Англия), *CP-Workstation* (США).

Персональные компьютеры с жидкокристаллическим экраном не имеют источников мощного излучения ЭМП и при работе от аккумуляторов практически безопасны. При работе от сети блок питания необходимо размещать не ближе 1,2 м от пользователя.

10.2. Ионизирующие поля и излучения: опасность, оценка и нормирование, технические средства защиты, безопасные технологии

10.2.1. Электростатические поля (ЭСП), загрязнение и защита биосферы

Статическое электричество — продукт образования, сохранения и разделения свободных электрических зарядов на поверхностях и в объемах диэлектрических и полупроводниковых веществ и материалов или на изолированных проводниках [22].

Экспериментально установлено, что положительные заряды скапливаются на поверхности того из двух соприкасающихся (трущихся) веществ, диэлектрическая проницаемость которого больше. Если соприкасающиеся вещества имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость, то электрические заряды не возникают.

Электростатическое поле характеризуется напряженностью, определяемой отношением силы, действующей в поле на точечный электрический заряд, к величине этого заряда. Единица измерения напряженности ЭСП — 1 В/м [23].

Внешние признаки статического электричества могут проявляться в виде [6]:

силового взаимодействия между заряженными телами или их отдельными участками;

разряда статического электричества (искры или короны);
воздействия на организм человека.

Разряды статического электричества наиболее опасны в горячем газе (или паре) и пожаро-взрывоопасных пылях.

Статическое электрическое поле существенно влияет на живые организмы. Земля заряжена отрицательно относительно свободного пространства. Аэрозольные же частицы и молекулы газа атмосферы, как правило, положительны. У земной поверхности напряженность электрического поля составляет 100—130 В/м [5]. При статической электризации напряжение относительно Земли

достигает десятков, а иногда и сотен тысяч вольт. Сила тока при статической электризации составляет $10^{-7} - 10^{-3}$ А.

Явление статической электризации наблюдается в следующих основных случаях: в потоке и при разбрызгивании жидкостей в струе газа или пара при соприкосновении и последующем разделении двух твердых разнородных тел (контактная электризация) — базовых для таких технологических процессов, как сушка в кипящем слое, транспорт газов, паров и пыли, размол, дробление и рассев, слив, налив, перекачка, размешивание и фильтрование электризующихся жидкостей, подача мономеров и легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) в полимеризаторы [24].

Напряженность ЭСП на рабочих местах может достигать, например:

250 кВ/м при изготовлении пластических масс;

280 кВ/м при формовании и упаковке компакт-дисков;

40 кВ/м на ременных передачах станков и лентах конвейеров.

Опасность возникновения статического электричества проявляется в возможности образования электрической искры (пожарная опасность) и вредном действии его на организм человека, причем не только при непосредственном контакте с зарядом, но и за счет электрического поля вокруг заряженных поверхностей. У людей, работающих в зоне электростатического поля, проявляются раздражительность, головная боль, нарушение сна, снижение аппетита. Легкие «уколы» и «пощипывания» при работе с сильно наэлектризованными материалами негативно влияют на психику рабочих, а в определенных ситуациях могут вызвать шоковое состояние. При постоянном прохождении через тело человека малых токов электризации возможны неблагоприятные физиологические изменения в организме, приводящие к профзаболеваниям.

Вследствие этого введен ПДУ напряженности электростатических полей [25, 26]: 60 кВ/м в течение 1 ч. При $E < 20$ кВ/м время пребывания в электростатических полях не регламентируется. При $E = 20 \div 60$ кВ/м допустимое время пребывания персонала без средств защиты зависит от конкретного уровня напряженности на рабочем месте и определяется по формуле (в часах)

$$\tau_{\text{доп}} = (E_{\text{пред}}/E_{\text{факт}})^2, \quad (10.6)$$

где $E_{\text{факт}}$ — фактическое значение напряженности поля, кВ/м.

Искровой разряд воспламеняет горючую смесь тогда, когда энергия, выделяющаяся в разряде, равна или больше минимальной энергии зажигания смеси. Условие безопасности:

$$W_p \leq \alpha W_{\text{мин}}, \quad (10.7)$$

где α — коэффициент безопасности, который выбирают исходя из реальных производственных условий ($\alpha < 1$); W_p , $W_{\text{мин}}$ — энергия разряда и минимальная энергия зажигания, Дж.

Для некоторых веществ минимальная энергия зажигания приведена в табл. 10.9.

Основная величина, характеризующая способность материалов проводить ток, а также определяющая их способность к электризации — удельное электрическое сопротивление ρ , Ом · м.

Все вещества и материалы подразделяют на диэлектрические ($\rho > 10^8$ Ом · м), антистатические ($\rho = 10^5 \dots 10^8$ Ом · м) и электропроводящие ($\rho < 10^5$ Ом · м) [27].

Значения объемного (ρ_v) и поверхностного (ρ_s) удельного электросопротивления должны указываться в технологическом регламенте, а также в исходных данных при проектировании любого технологического процесса. Для практических целей необходимо брать их максимальные значения или определять экспериментально для каждого конкретного продукта.

Меры защиты от статического электричества направлены на предупреждение возникновения и накопления зарядов статического электричества, создание условий рассеивания зарядов и устранение опасности их вредного воздействия [9].

Основные методы и средства защиты от статического электричества представлены на рис. 10.5 (по А. С. Бобкову), а ниже рассмотрены практические способы увеличения поверхностной и объемной электропроводности твердых и жидких диэлектрических материалов [24].

Увлажнение воздуха. Повышение относительной влажности воздуха до 65—75 %, если это допустимо по условиям технологического процесса, в ряде случаев существенно увеличивает поверхностную электропроводность диэлектрических гидрофильных материалов, способных адсорбировать на поверхности тонкую пленку влаги.

Таблица 10.9

Минимальная энергия зажигания некоторых веществ

| Вещество | W_{\min} , мДж | Вещество | W_{\min} , мДж |
|-------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Ацетилен | 0,011 | Цинковая пыль | 650,0 |
| Бензол | 0,21 | Цирконий (пыль) | 5,0 |
| Бензин Б-70 | 0,15 | Этан | 0,24 |
| Диэтиловый эфир | 0,19 | Этилен | 0,095 |
| Полистирол (пыль) | 15,0 | Водород | 0,013 |
| Ацетон | 1,21 | Метан | 0,29 |
| Циклопропан | 0,23 | Аммиак | 0,68 |



Рис. 10.5. Основные методы и средства защиты от статического электричества

Повышенная влажность в зоне взаимодействия электризующихся материалов создается общим или местным увлажнением воздуха в помещении.

Химическая обработка поверхности, электропроводные покрытия. Увеличение поверхностной электропроводности полимерных материалов химической обработкой поверхности кислотами, например, серной или хлорсульфоновой. В ряде случаев на поверхность диэлектрика наносится проводящая пленка из углерода, металлов и оксидов металлов.

Антистатические вещества. Нанесение на поверхность диэлектрика гигроскопических и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Добавление в горючие диэлектрические жидкости антистатических присадок: «Сигбол», «Аккор-1», «АСП-1» и др.

Электропроводящие наполнители (ацетиленовая сажа, алюминиевая пудра, графит, цинковая пыль) вводятся в массу твердого диэлектрика для повышения объемной электропроводности.

Для предотвращения опасного проявления зарядов статического электричества на технологическом оборудовании устанавливают нейтрализаторы статического электричества. Нейтрализация статических зарядов достигается в результате ионизации воздуха от нейтрализаторов: индукционных, высоковольтных, высокочастотных, переменного напряжения промышленной частоты, радиоактивных, аэродинамических.

Наиболее простыми являются индукционные нейтрализаторы статического электричества. Электрическое поле на заземленных «игольках», тонких проволоочках создается зарядами статического электричества наэлектризованного материала. Под действием сильного электрического поля вблизи разрядного электрода происходит ударная ионизация (развивается коронный разряд), в результате которой образуются ионы обоих знаков (рис. 10.6). Ионы, имеющие знак противоположный знаку наэлектризованного материала, под действием электрического поля движутся в направлении заряженного материала и оседают на нем, нейтрализуя поверхностный заряд диэлектрика.

В высоковольтных нейтрализаторах на разрядный игольчатый электрод подается высокое

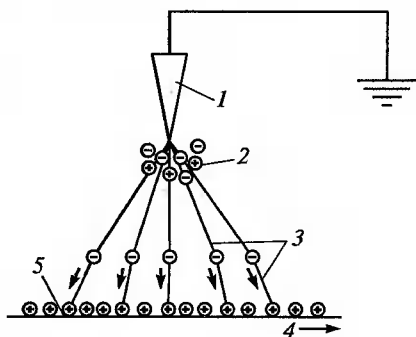


Рис. 10.6. Схема нейтрализации зарядов индукционным нейтрализатором:

1 — разрядный электрод; 2 — зона ударной ионизации; 3 — силовые линии электростатического поля наэлектризованного материала; 4 — направление движения диэлектрика; 5 — наэлектризованный диэлектрик

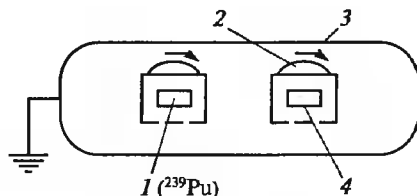


Рис. 10.7. Радиоактивный нейтрализатор с α -излучающими источниками: 1 — активный препарат; 2 — ручьятка; 3 — металлический контейнер; 4 — металлическая сетка

напряжение от постороннего источника напряжения. Наличие источника высокого напряжения обеспечивает устойчивую генерацию ионов независимо от наэлектризованности материала.

Радиоактивные нейтрализаторы статического электричества используют для ионизации воздуха α - или β -излучения.

На рис. 10.7 представлены нейтрализаторы с α -излучением, обладающим наибольшей ионизирующей способностью. Одна α -частица создает на пути в 1 см в среднем примерно 20 тыс. пар ионов. Глубина проникновения α -частиц в воздухе составляет в среднем 2,5 — 3,5 см, что делает безопасным применение этого вида излучения для обслуживающего персонала.

Наиболее распространенным способом защиты от статического электричества является заземление, которое объединяется с защитными заземляющими устройствами [6, 24, 28].

10.2.2. Радиационное излучение, загрязнение и защита биосферы

Радиозкология (на примере ядерной энергетики)

Среди опасностей, угрожающих человеку, особо необходимо выделить ионизирующую радиацию, в частности, техногенную составляющую. Главными источниками ионизирующих излучений и радиоактивного загрязнения (заражения) являются предприятия ядерного топливного цикла: атомные станции (реакторы, хранилища отработанного ядерного топлива, хранилища отходов); предприятия по изготовлению ядерного топлива (урановые рудники и гидрометаллургические заводы, предприятия по обогащению урана и изготовлению тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)); предприятия по переработке и захоронению радиоактивных отходов (радиохимические заводы, хранилища отходов); исследовательские ядерные реакторы, транспортные ядерно-химические установки и военные объекты. Сведений о влиянии радиоактивных осадков на биологические объекты пока недостаточно. Особенно много дискуссий и акций протеста возникает по поводу атомной

энергетики. Обеспокоенность населения резко обострилась после аварии на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.).

Приводятся аргументы в пользу замедления или приостановки развития ядерной энергетики на том основании, что на период до начала массового использования термоядерных реакторов хватит источников обычного топлива. Термоядерные реакторы относят при этом к более экологически чистым системам, чем ЯЭУ — ядерные энергетические установки [29].

Однако только атомная энергетика может дать реальный выход из энерго-экологического тупика, возникающего при использовании основных источников энергии (нефти, природного газа, угля), проявляющегося в парниковом эффекте, увеличении среднегодовой температуры на Земле и потреблении кислорода из атмосферы. При делении ядерного горючего 80 % образующейся энергии превращается в тепло, а 20 % выделяется в виде радиоактивных излучений. Это радиоактивные изотопы в воде (^{24}Na), продукты коррозии (^{54}Mn , ^{55}Fe), осколки деления урана от цинка до гадолиния (200 изотопов: ^{137}Cs , ^{133}Xe , ^{131}I , ^{99}Mo , ^{95}Zr , ^{235}U и др.).

Действительно, ядерное топливо при горении не потребляет кислород, а углекислый газ выделяется в небольших количествах при производстве урана. Следовательно, не происходит усиления парникового эффекта в атмосфере и заметных климатических изменений. Технология производства тепла и электроэнергии из ядерного топлива хорошо разработана и экономически конкурентоспособна по сравнению с технологиями, использующими ископаемое (природное) топливо. Уникальной особенностью ядерного топлива является возможность его воспроизводства, т. е. искусственная наработка в реакторе [30]. Ядерные электростанции в нормальном режиме производства электроэнергии обеспечивают наибольшую экологическую чистоту, но могут представлять огромную опасность для окружающей среды в случае тяжелых аварий. В отличие от других способов получения энергии в процессе работы ЯЭУ остаются экологически более опасные отходы в виде выгоревшего топлива с высокой долгоживущей радиоактивностью. Следовательно, необходима оптимизация топливного цикла ЯЭУ, способов переработки облученного топлива и обращения с полученными при этом радиоактивными отходами.

Механизм излучений

Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающиеся по числу нейтронов, относят к разновидностям одного и того же химического элемента и называют изотопами. Ядра всех изотопов образуют группу нуклидов. Большинство нуклидов нестабильны, все время превращаются в другие нуклиды. Самопроизвольный распад нуклидов является радиоактивным,

Основные свойства α -, β - и γ -излучений естественных радиоактивных веществ [31]

| Излучение | Природа | Заряд | Способность | |
|-----------|----------------------------|-------------|---------------|--|
| | | | ионизирующая | проникающая |
| α | Ион He^+ | + | Очень высокая | Низкая: слой воды 0,1 мм, толщина листа бумаги |
| β | Электрон | — | Высокая | Высокая: слой алюминия 0,5 мм |
| γ | Электромагнитное излучение | Нейтральное | Низкая | Очень высокая: слой свинца в несколько сантиметров |

а такие нуклиды называют радионуклидами. Ионизирующее излучение разделяют на корпускулярное (альфа-, бета-, нейтронное) и фотонное (рентгеновское, гамма-).

Испускание ядром двух протонов и двух нейтронов — α -излучение, испускание электронов (позитронов) — β -излучение, испускание квантов энергии перевозбужденными нестабильными нуклидами — γ -излучение. Иными словами, α -частицы — ядра гелия, их энергия 3—9 МэВ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), пробег такой частицы в воздухе 8—9 см, а в мягких биологических тканях — десятки микрометров; β -излучение возникает при радиоактивном распаде. Его энергия 0,0005—3,5 МэВ; ионизирующая способность β -частиц ниже, а проникающая — выше, чем α -частиц; максимальный пробег в воздухе — 1,8 м, в тканях — 2,5 см; γ -лучи — результат высокочастотного электромагнитного излучения, возникающего в процессе ядерного распада, — обладают большой проникающей способностью и малым ионизирующим действием; их энергия 0,01—3 МэВ.

Указанные излучения, таким образом, характеризуются ионизирующей и проникающей способностями. Эти свойства (табл. 10.10) и определяют их воздействие на биологические объекты.

Действие радиации на человека

Биологическое действие ионизирующего излучения заключается в том, что поглощенная энергия расходуется на разрыв химических связей и разрушение клеток живой ткани. Облучение кожи в зависимости от величины дозы вызывает ожоги разной степени, а также перерождение кровеносных сосудов, возникно-

вление хронических язв и раковых опухолей со смертельным исходом через 6—30 лет. Смертельная доза γ -излучения 600 ± 100 Р. Так называемая «смерть под лучом» наступает при дозе около 200 кР. Доказано, что облучение может иметь генетические последствия, вызывать мутации. При дозах внешнего облучения не более 25 бэр никаких изменений в организмах и тканях человека не наблюдаются (прил. 24).

Некоторые сведения об эффектах *внешнего* воздействия ионизирующих излучений приведены в табл. 10.11 [31].

При внутреннем облучении опасны все виды излучения, так как они действуют непрерывно и практически на все органы.

Внутреннее облучение, вызванное источниками, входящими в состав организма или попавшими в него с воздухом, водой или пищей, во много раз опаснее, чем внешнее, при тех же количествах радионуклидов по следующим причинам.

1. Время облучения увеличивается и совпадает со временем пребывания радиоактивного вещества в организме; такие веще-

Таблица 10.11

Некоторые эффекты внешнего воздействия неонизирующих излучений на человека

| Условия облучения | Доза (накопленная) или мощность дозы | Эффект |
|---|--------------------------------------|--|
| Однократное острое, пролонгированное, дробное, хроническое — все виды | Любая, $\neq 0$ | Увеличение риска отдаленных последствий и генетических нарушений |
| Хроническое в течение ряда лет | $\geq 0,1$ Зв (10 бэр)/год | Снижение неспецифической резистентности организма |
| | $\geq 0,5$ Зв (50 бэр)/год | Специфические проявления лучевого воздействия, снижение иммунореактивности, катаракта (при дозах > 30 бэр) |
| Острое однократное | $\geq 1,0$ Зв (100 бэр) | Острая лучевая болезнь разной степени тяжести |
| | $\geq 4,5$ Зв (450 бэр) | Острая лучевая болезнь со смертельным исходом для 50% облученных |
| Пролонгированное, 1—2 мес, на щитовидную железу | $\geq 10,0$ Зв (1000 бэр) | Гипофункция щитовидной железы, возрастание до 1% риска развития опухолей (аденом и раковых) |

ства, как ^{226}Ra или ^{239}Pu , из организма практически не выводятся, и облучение длится всю жизнь.

2. Доза облучения резко возрастает из-за бесконечно малого расстояния до ионизируемой ткани.

3. Отсутствует защитное действие кожного покрова; α -частицы из полностью безопасных при внешнем облучении становятся наиболее опасными.

4. Нельзя использовать методы защиты, разработанные для внешнего облучения.

При внешнем облучении α - и β -частицы из-за малой проникающей способности вызывают в основном поражения кожи, γ -излучение может вызвать гибель организма при отсутствии внешних изменений кожных покровов [17].

Оценка и нормирование радиоактивного излучения

Для количественной оценки облучения населения и производственного персонала существуют следующие величины: активность радиоактивного вещества, поглощенная доза, эквивалентная доза, эффективная ожидаемая доза, эффективная доза, коллективная эффективная доза.

Все население подразделяют на две категории [32—34]: 1 — персонал, непосредственно работающий с источниками излучения; 2 — население вне сферы производственной деятельности.

Персонал в свою очередь делят на две группы: А — работающие с источниками излучения; Б — по условиям работы находящиеся в сфере их воздействия.

Таблица 10.12

Основные дозовые пределы

| Нормируемые величины | Дозовые пределы, мЗв | |
|----------------------------|---|------------------------|
| | Персонал* ¹ | Население |
| Эффективная доза | 20 (\leq 50) мЗ в/год | 1 (\leq 1) мЗ в/год |
| | В среднем за любые последовательные 5 лет | |
| Эквивалентная доза за год: | | |
| для хрусталика глаза | 150 | 15 |
| кожи* ² | 500 | 50 |
| кисти и стопы | 500 | 50 |

*¹ Дозы облучения не должны превышать $\frac{1}{4}$ приведенных значений.

*² Средние значения в покровном слое 5 мг/см²; на ладонях 40 мг/см².

Уровни индивидуального радиационного риска, соответствующие установленным пределам доз

| Категория лиц, подвергающихся облучению | Уровень дозы | Риск соматостокхастических последствий в год, % | Риск в год, % | |
|---|--|---|--------------------------|----------------------|
| | | | генетических последствий | общий |
| Персонал | Предел дозы 0,05 Зв | $6,25 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $8,25 \cdot 10^{-4}$ |
| | Средняя доза при установленном пределе 0,005 Зв | $6,25 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $8,25 \cdot 10^{-5}$ |
| Отдельные лица из населения | Предел дозы 0,005 Зв | $6,25 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $8,25 \cdot 10^{-5}$ |
| | Средняя доза при установленном пределе 0,0005 Зв | $6,25 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $8,25 \cdot 10^{-6}$ |

Для каждой категории облучаемых лиц устанавливаются (администрацией учреждения по согласованию с органами Госкомсанэпиднадзора и Госкоматомнадзора) основные дозовые пределы, допустимые и контрольные уровни.

В табл. 10.12 представлены основные дозовые пределы в мирное время [32, 33].

Превышение допустимых и контрольных уровней является поводом ухудшения радиационной обстановки и сигналом к принятию соответствующих мер безопасности.

Расчетные уровни индивидуального радиационного риска, соответствующие установленным нормами радиационной безопасности пределам доз облучения, представлены в табл. 10.13 [35].

При сочетании внешнего, внутреннего облучений и поступления нескольких радионуклидов в организм должно выполняться условие безопасности

$$\sum(N_{э_i}/ПДД_i) + \sum(П_j/ПДП_j) \leq 1, \quad (10.8)$$

где $N_{э_i}$ — эквивалентная доза i -го излучения на данный орган; $ПДД_i$ — предельно допустимая доза; $П_j$ — поступление j -го радионуклида; $ПДП_j$ — предельно допустимое годовое поступление радиоактивных веществ через органы дыхания и пищеварения.

Для оценки состояния окружающей среды и сферы жизнедеятельности человека (инженерных объектов и др.) чаще используются плотность радиоактивного загрязнения почвы (запас) по отдельным радионуклидам ^{137}Cs , ^{90}Sr и Pu (по сумме изотопов плутония);

Критерии экологического состояния территорий [36]

| Параметры | Экологическое бедствие | Чрезвычайная экологическая ситуация | тельная ситуация |
|--|------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Мощность экспозиционной дозы на уровне 1 м от поверхности почвы, мкР/ч | > 400 | 200—400 | ≤ 20 |
| Радиоактивное загрязнение, Ки/км ² : | | | |
| ¹³⁷ Cs | > 40 | 15—40 | ≤ 1 |
| ⁹⁰ Sr | > 3 | 1—3 | ≤ 0,3 |
| Pu (сумма изотопов) | | > 0,1 | — |
| Эффективная доза облучения, мЗв/год | > 10 | 5—10 | < 1 |

мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от поверхности почвы;

эффективная (ожидаемая) эквивалентная годовая доза облучения населения (см. прил. 24) [38].

В табл. 10.14 представлены критерии экологического состояния радиоактивно загрязненной территории, определенные исходя из вышеуказанных параметров (см. также прил. 25—29) [38].

Для обнаружения ионизирующих излучений, измерения их энергии и других свойств применяются дозиметрические приборы (рентгенометры, радиометры и дозиметры).

Защита от излучения

В производственном цикле — расстоянием, временем, экранированием источника излучения и количеством (мощностью) источников. «Защита расстоянием» основана на том, что интенсивность облучения уменьшается пропорционально квадрату расстояния между источником излучения и работающим. «Защита временем» заключается в уменьшении продолжительности контакта человека с источником излучения. «Защита экранированием» — укрытие источника излучения конструкционными материалами, хорошо поглощающими излучение: свинцом, железом, бетоном,

алюминием, свинецсодержащим стеклом и др. «Защита количеством» заключается в уменьшении мощности источников до минимальных величин.

Безопасные ядерные ресурсосберегающие технологии

Для широкого внедрения атомной энергетики необходимо решить две технических проблемы: разработать реактор с повышенной безопасностью и технологию удаления опасных высокоактивных отходов, отвечающую требованиям промышленной экологии.

Для производства электроэнергии используются реакторы нескольких типов, которые можно подразделить на работающие на тепловых и на быстрых нейтронах (рис. 10.8).

В качестве топлива в атомной станции может использоваться ряд элементов, основным из которых в настоящее время является уран. Используются три способа разработки урановых месторождений: подземный, открытый и наиболее современный — подземного выщелачивания. В качестве выщелачивающего реагента применяют растворы серной кислоты и карбонат-бикарбонатных солей, насыщенных кислородом. Растворы закачивают в рудоносные пласты, растворяют там уран, и полученный раствор солей урана извлекают на поверхность. Далее руду (по первым двум способам) или растворы урана перерабатывают на специальных гидрометаллургических предприятиях в продукт, называемый «желтый кек» — концентрат урана желтого цвета, содержащий около 80 % U. Концентрат урана очищают и конвертируют в легколетучее соединение — гексафторид урана. Известно пять основных методов разделения (обогащения) изотопов урана: газодиффузионный, центрифужный, аэродинамический, химический и лазерный.

На рис. 10.9 показана схема ядерного топливного цикла, а на рис. 10.10 — общая схема образования и обезвреживания радиоактивных отходов (РАО). Радиоактивные отходы бывают твердыми, жидкими и газообразными. По содержанию в них радионуклидов и уровню тепловыделения их подразделяют на *низкоактивные* (НАО), *среднеактивные* (САО) и *высокоактивные* (ВАО).

Большее количество отходов относится к классу НАО, образующихся в основном при добыче и переработке урановых руд. Присутствующие продукты распада урана делают радиоактивными шахтные воды, рудные отвалы и отвалы горных пород. Пылеобразование устраняют распылением воды или пылевязких растворов. Во избежание загрязнения грунтовых вод все стоки собирают и перекачивают на участки обработки отходов. Наиболее интенсивно в окружающую среду проникают газообразный радон и легкорастворимые соединения радия. В связи с этим вокруг

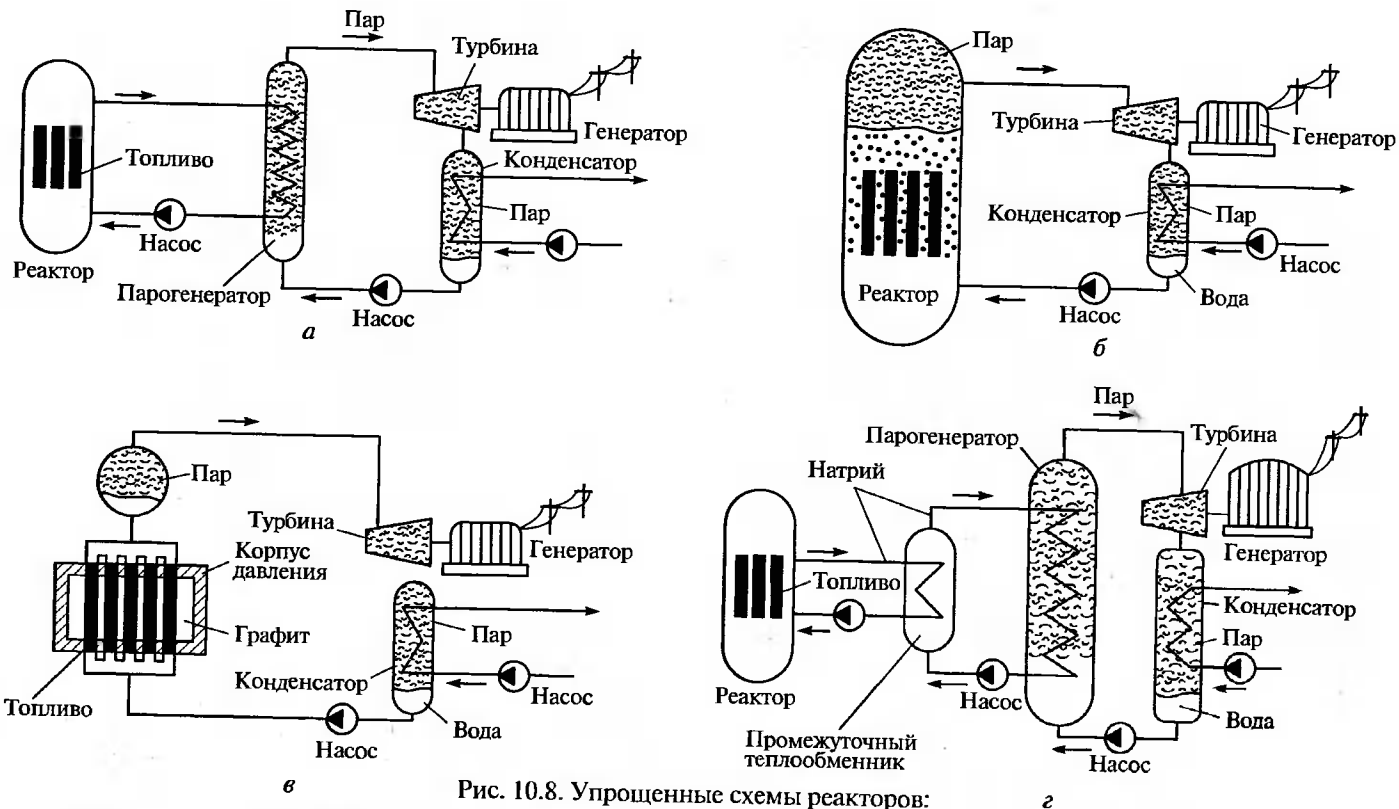


Рис. 10.8. Упрощенные схемы реакторов:

а — с водой под давлением (ВВЭР, PWR); б — охлаждаемого пароводяной смесью (кипящего) (ПВР, BWR); в — водо-графитового (ВГР, LWGR); г — на быстрых нейтронах петлевого типа (БН, LMFR)

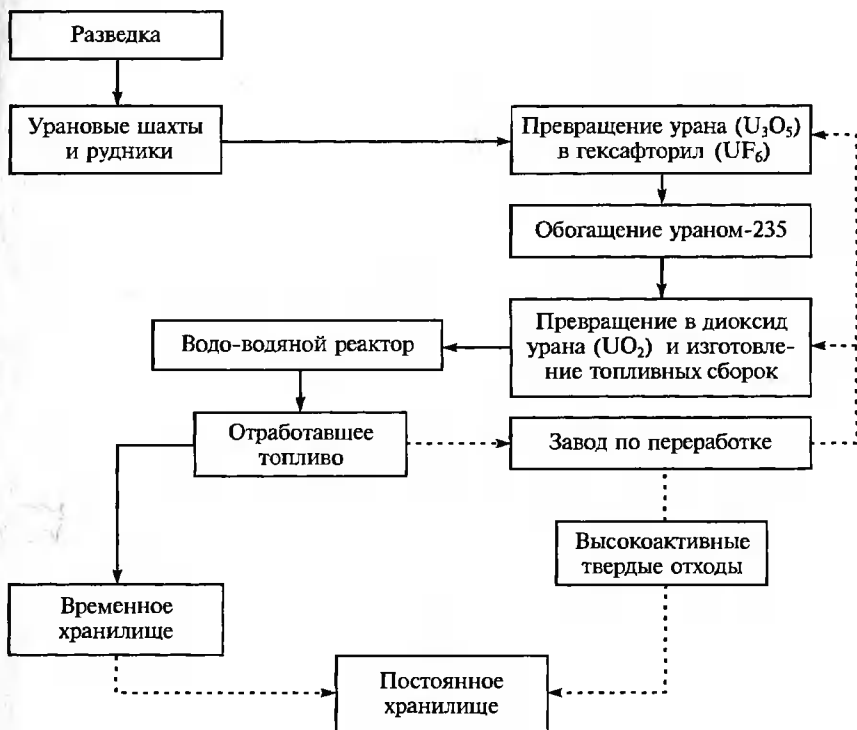


Рис. 10.9. Схема ядерного топливного цикла

площадок с отвалами создают СЗЗ. *Твердые* отходы прессуют. *Жидкие* — осаждают, концентрируют на ионообменных смолах или выпаривают. Загрязненные радионуклидами потоки воды пропускают через деминерализаторы (очистные колонны, заполненные сорбентами) для достижения уровня чистоты питьевой воды. *Газообразные* отходы пропускают через угольные или другие фильтры и удаляют под соответствующим контролем через высокую вентиляционную трубу. Горючие отходы сжигают с обязательным улавливанием радиоактивных газов и концентрации на сорбентах. Затем отходы (НАО и САО) кондиционируют (отверждают) цементированием и битумированием. Основной недостаток цементированья — низкая прочность готовых к захоронению или транспортировке блоков и невысокая устойчивость к влияниям погоды и к выщелачивающему действию воды. Битумирование — более дорогостоящий процесс по сравнению с цементированием. К ВАО относятся продукты деления урана, накапливающиеся в топливе. Их количество составляет < 1 %, а радиоактивность — 98 % всей радиоактивно-

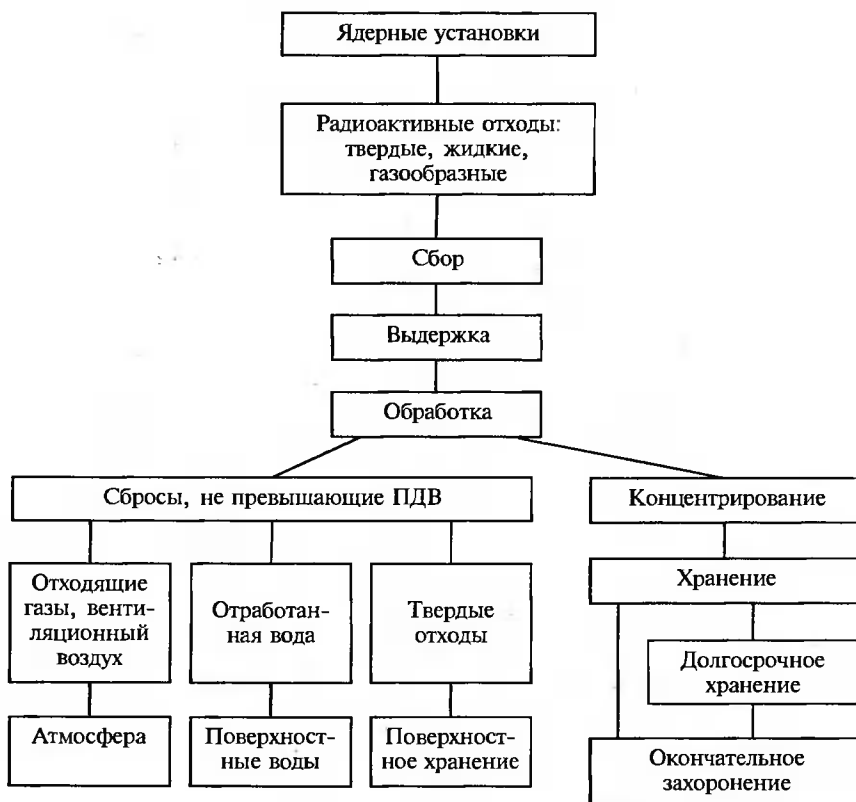


Рис. 10.10. Общая схема обращения с радиоактивными отходами

сти, образующейся в атомной промышленности. К ВАО относят выгруженное из реактора отработанное топливо и отходы, образующиеся на первых ступенях экстракции урана и плутония. Растворы последних упаривают и сливают в емкость для временного хранения. Топливо хранится на площадках АЭС. Для подготовки к долговременному хранению или окончательному удалению ВАО остекловывают (капсулируют): упаренные растворы прокаливают и обрабатывают расплавами фосфатных или борсиликатных стекол. Такая форма обезвреживания токсикантов обеспечивает полную безопасность, так как большая часть радионуклидов ВАО распадается 300 лет (справка: для растворения 1 мм поверхностного слоя стекломассы в воде требуется не менее 100 лет). Для окончательного удаления НАО и САО предполагают строительство подземных специальных хранилищ, разрабатывают методы хранения в пустотах горных пород или выработанных шахт.

Для окончательного удаления ВАО предложен метод трансмутации радионуклидов, заключающийся в переводе радионуклидов в стабильные нуклиды под действием β -излучения или потока нейтронов. Путь удаления ВАО в космос не является радикальным, так как существует опасность непредвиденного возвращения на Землю ракеты-носителя. Наиболее приемлемым способом является удаление ВАО в глубокие геологические формации. Такое хранилище должно состоять из наземной и подземной частей. Наземная часть имеет центральную зону со вспомогательными постройками. Подземная часть хранилища напоминает большую шахту, расположенную на глубине 600—1200 м. Для предотвращения миграции радионуклидов предполагается создание технических барьеров с целью обеспечения защиты в течение разных временных интервалов: начальный период (до помещения отходов в хранилище); тепловой период (до 300 лет); период геологического контроля — миллионы лет для обезвреживания актиноидов (от актиния до лоуренсия). Схема хранилища представлена на рис. 10.11 [30].

Особое внимание должно уделяться сбору, удалению и захоронению твердых и высокоактивных жидких отходов, которые могут вызвать загрязнение окружающей природной среды.

Вокруг АЭС устанавливают три зоны: контролируемую (3 км) — возможно облучение свыше 0,3 дозы, допустимой для персонала;

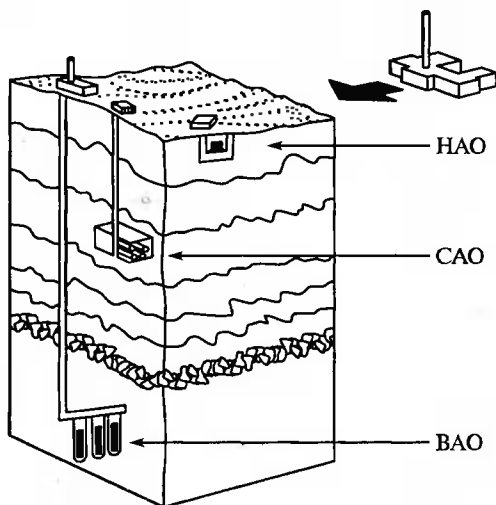


Рис. 10.11. Окончательное удаление радиоактивных отходов:

низкоактивных (НАО) — в приповерхностные хранилища; среднеактивных (САО) — в подземные хранилища; высокоактивных (ВАО) — в глубокие геологические формации

санитарно-защитную (13 км) — запрещено размещение производственных, жилых и культурно-бытовых объектов, не относящихся к АЭС; наблюдаемую (30 км) — дозы облучения населения, проживающего в ее пределах, могут несколько превышать допустимые нормативы [37].

Список литературы

1. Инженерная экология и экологический менеджмент / М. В. Буторина, П. В. Воробьев, А. П. Дмитриева и др. — М.: Логос, 2002. — 528 с.
2. Обеспечение безопасности жизнедеятельности в машиностроении / В. Г. Еремин, В. В. Сафронов, А. Г. Схиртладзе и др. — М.: Машиностроение, 2000. — 392 с.
3. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России. — М.: Фонд «Здоровье и окружающая среда»: Российская ассоциация общественного здоровья, 1997. — 91 с.
4. Охрана труда и экологическая безопасность в химической промышленности / А. С. Бобков, А. А. Блинов, И. А. Роздин и др. — М.: Химия, 1997. — 400 с.
5. Куклев Ю. И. Физическая экология. — М.: Высш. шк., 2001. — 357 с.
6. Инженерная экология / Под ред. В. Т. Медведева. — М.: Гардарика, 2002. — 687 с.
7. ГОСТ 12.1.0.01—84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
8. ГОСТ 12.1.0.02—84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряжения и требования к проведению контроля на рабочих местах.
9. ГОСТ 12.1.0.06—84. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
10. СанПиН 2.2.4. 723-98. Переменные магнитные поля промышленной частоты в производственных условиях.
11. СанПиН 2.2.4/2.1.8. 055-96. Электромагнитные излучения разночастотного диапазона (ЭМИ РЧ).
12. ГН 2.1.8/2.2.4. 019-94. Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемые системами сотовой радиосвязи.
13. СН 5802-91. Санитарные нормы и правила выполнения работ в условиях воздействия электрических полей промышленной частоты.
14. СН 2971-84. Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты.
15. СанПиН 2.2.2.542-96. Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ.
16. Справочная книга по охране труда в машиностроении / Г. В. Бектобеков, Н. Н. Борисова, В. И. Коротков и др. — Л.: Машиностроение, 1989. — 541 с.

17. *Нейман Л. А.* Безопасность жизнедеятельности: теория, вопросы и ответы. — М.: Вузовская книга, 1997. — 142 с.

18. ГОСТ Р 50723—94. Классификация лазеров, требования к конструкции и к технологическим процессам.

19. СН 5804-91. Санитарные нормы и правила при работе с лазерами.

20. СН 2392-81. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

21. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

22. *Медведева В. С.* Охрана труда и противопожарная защита в химической промышленности. — М.: Химия, 1989. — 288 с.

23. Безопасность жизнедеятельности / Под ред. Э. А. Арустамова. — М.: Издательский дом «Дашков и К°», 2000. — 678 с.

24. *Бондарь В. А.* Исследование опасности воспламенения горючих смесей разрядами статического электричества. — М.: Изд-во МГУИЭ, 1998. — 24 с.

25. ГОСТ 12.1.0.45—84. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

26. СН 1757-77. Санитарно-гигиенические нормы допустимой напряженности электростатического поля.

27. Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. — М.: Химия, 1973. — 45 с.

28. ГОСТ 12.4.1.24—83. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования.

29. *Иванов В. Б., Цыканов В. А.* Основные направления работ ГНЦ НИИАР для экспериментального обоснования разработок современных ЯЭУ. — Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. — 20 с.

30. *Преображенская Л. Б., Зарубин В. А., Никандрова А. В.* Популярно о ядерной энергетике. — М.: Изд-во АТ, 1993. — 48 с.

31. *Русак О. Н.* Радиационная безопасность. — СПб.: ЛТА, 1993. — 24 с.

32. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96). ГН 2.6.1.054-96. — М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. — 127 с.

33. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1.758-99. — М.: Минздрав России, 1999. — 60 с.

34. Нормы радиационной безопасности (НРБ-76/87). Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений. ОСП-72/87. — М.: Энергоиздат, 1988. — 60 с.

35. *Измалков В. И., Измалков А. В.* Безопасность и риск при техногенных воздействиях. — М., СПб.: Изд-во РАН, 1994. — 270 с.

36. *Сынзыныс Б. И., Козьмин Г. В.* Введение в радиоэкологию. Радиационные факторы в природной среде в сфере жизнедеятельности человека. — Обнинск: Изд-во ОИАТЭ, 1997. — 58 с.

37. *Владимиров В. В.* Урбоэкология. — М.: Изд-во МНЭПУ, 1999. — 204 с.

38. *Ильин Л. А., Кириллов В. Ф., Коренков И. П.* Радиационная безопасность и защита. — М.: Медицина, 1996. — 336 с.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается принципиальная разница между неонизирующими и ионизирующими загрязнителями (излучениями, полями)?
2. Назовите источники ЭМП техногенного происхождения. В чем заключается их основная опасность для человека и окружающей среды?
3. Воспроизведите по памяти шкалу электромагнитных волн. Дайте оценку той или иной зоне.
4. Что такое нормирование электромагнитных полей? Перечислите и охарактеризуйте основные методы защиты от электромагнитных излучений.
5. Назовите принципы безопасности ЭВМ (ПК), а также методы защиты от лазерного излучения.
6. Охарактеризуйте ЭСП в промышленных процессах. Назовите основные опасности ЭСП, способы защиты от них или снижения ЭСП.
7. Что такое радиоэкология? Расскажите об оценке и нормировании радиоактивного излучения. Укажите этапы безопасных радиоактивных технологий.

ГЛАВА 11

ПРОМЫШЛЕННЫЕ АВАРИИ И ТЕХНОГЕННЫЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ

11.1. Экологическая безопасность человека, биосферы и промышленных (инженерных) объектов в условиях ЧС и крупных аварий

11.1.1. Основные понятия

Чрезвычайная ситуация (ЧС) — это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [1].

Зона ЧС — это территория, на которой сложилась чрезвычайная ситуация.

Принята следующая комплексная классификация ЧС [2, 3]:
по причине возникновения (*преднамеренные и непреднамеренные*);
по структуре возникновения (*антропогенные, природные и комбинированные*);

по скорости развития (*взрывные, внезапные, скоротечные и плавные*);

по масштабам распространения последствий (*локальные или частные, объектовые, местные, региональные, национальные и глобальные*).

Для экологически опасных предприятий основными ЧС являются *локальные, объектовые и местные*.

Локальные ЧС — это ситуации, действие которых ограничено производственным помещением (зданием, сооружением). Такие ситуации могут возникнуть при авариях, связанных с нарушением герметизации отдельных узлов, технологических линий трубопроводов, при небольших *протечках* в хранилищах ВВ, в частности, сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ).

Объектовые ЧС — это ситуации, действие которых ограничено территорией промышленных объектов. Они могут возникать при авариях на складах, разрыве технологических линий и др.

Местные ЧС — это ситуации, распространение которых ограничено территорией города (района) или области. Последствия местных ЧС выходят за пределы СЗЗ предприятия и создают экологическую угрозу не только для производственного персонала предприятия, но и для населения и окружающей среды.

Основные количественные критерии, определяющие характер ЧС: *число пострадавших людей, материальный ущерб, кратность превышения ПДК, масса сбрасываемых вредных (ядовитых) веществ* (прил. 30, 31) [4].

Режимы работы оборудования подразделяют на *регламентный (расчетный)*, в котором опасные параметры процесса находятся в расчетном диапазоне, и *аварийный*, в котором опасные параметры процесса выходят за расчетный диапазон и системой регулирования не могут быть возвращены в исходное состояние.

Катастрофа — авария, сопровождающаяся гибелью людей.

Под *инженерным объектом* обычно понимают сложный инженерно-технический комплекс, включающий здания, сооружения, энергосистемы, оборудование, автоматизированные системы, электронную технику и т. п.

Под *устойчивостью работы* инженерного объекта понимают его способность выпускать установленные виды продукции в необходимых объемах и номенклатуре (для организаций, не производящих материальные ценности, — выполнять свои функции) в условиях ЧС, а также приспособленность этого объекта к восстановлению в случае повреждения [5].

Необходимо помнить, что восстановлению объект подлежит, если он получил *слабые или средние* разрушения (при сильных и полных разрушениях, когда избыточное давление ударной волны ΔP_{ϕ} на объект превышает 30 кПа, восстановление или ремонт его экономически нецелесообразны).

При взрывах химического оборудования (трубопроводов) воздействие ударной волны ее избыточного давления ΔP_{ϕ} на неза-

щищенных людей характеризуется *легкими, средними, тяжелыми* и *крайне тяжелыми* травмами (отравлениями).

Легкие поражения наступают при $\Delta P_{\phi} = 20 \dots 40$ кПа. Проявления: звон в ушах, головокружение, головная боль.

Поражения средней тяжести наступают при $\Delta P_{\phi} = 40 \dots 60$ кПа. Проявления: вывихи конечностей, контузия головы, повреждение органов слуха, кровотечение из носа и ушей.

Тяжелые травмы возникают при $\Delta P_{\phi} = 60 \dots 100$ кПа. Они характеризуются сильной контузией всего организма, потерей сознания, возможным повреждением внутренних органов и т. п.

Крайне тяжелые травмы возникают при $\Delta P_{\phi} > 100$ кПа. Могут быть получены разрывы внутренних органов, переломы костей, внутренние кровотечения и другие повреждения, которые обычно приводят к смертельному исходу.

Характерные условия возникновения экологических катастроф и аварий:

потенциальные источники риска (вредные и радиоактивные вещества и сырье, высокие давления, легковоспламеняющиеся и горючие материалы);

действие и последствия факторов риска (взрывы, выбросы газов, пожары);

нахождение в зоне аварии людей, продуктов питания, воды, сельхозугодий и т. п.

Современная промышленность отвергла концепцию абсолютной безопасности и пришла к концепции приемлемого (допустимого) риска, суть которой в стремлении к такой безопасности, которую приемлет общество в данный период [6]. Приемлемый риск сочетает технические, экономические, социальные, политические аспекты и представляет некоторый компромисс между безопасностью и возможностями ее достижения. Максимально приемлемым уровнем индивидуального риска обычно считают $1 \cdot 10^{-6}$ в год, пренебрежимо малым — индивидуальный риск поражающих воздействий $1 \cdot 10^{-8}$ в год [7]. *Риск* — это количественная оценка, характеризующая частоту опасностей за определенное время: $R_c = N_o/N_b$, где N_o и N_b — количество реализованных и возможных опасностей соответственно. В отечественной и мировой практике оборудование и процессы считают безопасными, если вероятность травмы человека для данной отрасли промышленности не превышает 10^{-6} (10^{-5} — по В. Маршаллу) в год. Например, реальный производственный риск ($R_{\text{пр}}$) в СНГ составляет примерно 10^{-4} (14 тыс. погибающих на 140 млн работающих), что на один-два порядка выше приемлемого риска [3]. В Российской Федерации в настоящее время нет жестких требований по установлению уровней риска. Согласно «Временным требованиям и критериям оценки риска при нормальной эксплуатации и авариях на промышленных объектах», приняты следующие нор-

мативные значения индивидуального риска в расчете на человека в год:

персонал предприятий — $1 \cdot 10^{-5}$;
население, находящееся в СЗЗ — $1 \cdot 10^{-6}$;
население региона — $1 \cdot 10^{-6}$.

Статистика показывает, что ~ 80 % аварий и катастроф на производстве носит антропогенный характер: 64 % аварий происходит за счет нарушения правил эксплуатации техники и 16 % — за счет некачественного строительства и монтажа оборудования (прил. 32).

11.1.2. Принципы обеспечения экологической безопасности производств

Экологическая безопасность промышленных (инженерных) объектов при авариях и ЧС определяется вероятностью возникновения поражающих факторов и уровнем воздействия вредных веществ, проявляющегося в процессе эксплуатации. Уровень опасности и принцип обеспечения безопасности во многом связаны со свойствами перерабатываемых веществ.

При работе с *нейтральными твердыми и жидкими веществами, парами и газами* оборудование должно обеспечивать [8]:

санитарные и гигиенические нормы в рабочей зоне помещения по температуре, запыленности, содержанию паров воды и других жидкостей за счет герметизации при загрузке и разгрузке веществ и при проведении технологического процесса, а при необходимости — за счет отвода пыли и паров общеобменной или местной вентиляцией;

защиту от разрушения под давлением сжатых нейтральных паров или газов (воздуха, азота, аргона и т. п.), внезапном нерегламентированном повышении давления в ходе выполнения технологических операций (например, за счет перегрева и вскипания жидкости), а также при нерегламентированном повышении давления от внешних источников — сжатого воздуха и т. п.

При эксплуатации оборудования с *горючими жидкостями* (маслами, дистиллятами, диэтиленгликолем), *легковоспламеняющимися жидкостями* (спиртами, бензинами, гексаном, гептаном, изопреном, ацетоном) и *горючими газами*, в том числе сжиженными (этаном, этиленом, пропаном, бутаном, бутиленом, метаном), наблюдается более высокий уровень опасности за счет возможности *пожара* или *взрыва*.

Оборудование при работе с этими веществами должно (в дополнение к указанным) исключить возможности:

образования пожаро- и взрывоопасных концентраций веществ за счет выбора соответствующих технологических режимных параметров, вентиляции, продувки или подачи флегматизаторов;

появления источников зажигания за счет применения соответствующего уровня и вида взрывозащиты электрооборудования, исключения искр трения или удара;

самовоспламенения окружающей взрывоопасной смеси от нагретых поверхностей;

нерегламентированного подъема температуры при нарушении условий проведения экзотермических реакций;

разрушения оборудования под давлением при выполнении технологических операций или при нарушении правил эксплуатации.

Повышенной является опасность и при использовании вредных веществ I и II классов опасности, а также веществ остронаправленного действия III класса* ввиду их токсичности. Поэтому оборудование *дополнительно* должно обеспечить: исключение химических ожогов и токсического поражения (респиративного или при попадании на кожный покров) при транспортных операциях, погрузке-разгрузке и т. п. за счет соответствующей герметизации и устройств, нейтрализующих и улавливающих пар вредных веществ [6].

11.2. Устойчивость работы промышленных объектов в ТЧС

11.2.1. Оценка устойчивости зданий (сооружений) к действию ударной волны

Предполагают, что разрушение здания цеха (офиса) происходит в результате воздействия ударной волны, возникшей в результате аварийного разрушения (взрыва) какого-либо аппарата на заводской площадке. Последствия взрыва определяются величиной давления разрушения инженерного объекта и массой выброса (слива) вредного вещества.

Оценка устойчивости зданий (сооружений) заключается в определении избыточного давления ударной волны ΔP_{Φ} , вызывающего разрушения разных степеней в зависимости от типа и сейсмостойкости конструкции, вида строительного материала, высоты здания и грузоподъемности кранового оборудования внутри промышленного здания.

Ориентировочно

$$\Delta P_{\Phi} = K_{зд} K_p K_k K_m K_b K_c K_{кр}, \quad (11.1)$$

* ГОСТ 12.1.0.07—76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»: I класс — вещества чрезвычайно опасные; II — высокоопасные; III — умеренно опасные; IV — малоопасные.

где $K_{зд}$ — коэффициент, учитывающий тип здания; K_p — коэффициент, учитывающий степень разрушения; K_k — коэффициент, учитывающий тип конструкции; K_m — коэффициент, учитывающий вид строительного материала; K_b — коэффициент, учитывающий высоту здания; K_c — коэффициент, учитывающий сейсмостойкость конструкции; $K_{кр}$ — коэффициент, учитывающий грузоподъемность кранового оборудования. (Значения коэффициентов K — см. прил. 33.)

В практической деятельности важно правильно определить возможную степень разрушения и ущерб при аварии.

Степени разрушения зданий и сооружений:

полная — разрушение и обрушение всех элементов зданий и сооружений (включая подвалы);

сильная — разрушение части стен и перекрытий верхних этажей, образование трещин в стенах, деформация перекрытий нижних этажей, возможно ограниченное использование сохранившихся подвалов после расчистки выходов;

Таблица 11.1

Влияние внешнего избыточного давления

| Элемент конструкции | Характеристика разрушения | Избыточное давление, кПа |
|---|--|--------------------------|
| Оконные стекла | 5 % разбито | 0,7—1 |
| | 50 % разбито | 1,4—3 |
| | 90 % разбито | 3—6 |
| Здания | Смещена кровля (черепица) | 3—5 |
| | Сломаны двери и оконные рамы | 6—9 |
| | Сдвинуты переборки и деревянные элементы | 3,6 |
| | Частичное и полное разрушение крыши, частично разрушены одна или две наружные стены, серьезно повреждены несущие стены | 14—18 |
| | Почти полное | 80—260 |
| Телеграфные столбы | Сломаны | 70—170 |
| Вагоны товарных железнодорожных поездов | Возможен сход с рельсов | 80—190 |

средняя — разрушение, главным образом, второстепенных элементов (крыш, перегородок, оконных и дверных проемов). Перекрытия, как правило, не обрушиваются, часть помещений пригодна для использования после расчистки от обломков и проведения ремонта;

слабая — разрушение оконных и дверных проемов и перегородок, подвалы и нижние этажи полностью сохраняются и пригодны для временного использования после уборки мусора и заделки (ремонта) проемов.

Влияние внешнего избыточного давления на некоторые строительные конструкции приведены в табл. 11.1.

Максимально безопасное избыточное давление в помещении при взрыве для строительных конструкций, кПа:

| | |
|--|-----|
| 1. Перегородок, кровли: | |
| деревянных каркасных зданий | 12 |
| кирпичных зданий | 15 |
| железобетонных каркасных зданий | 17 |
| 2. Перекрытий: | |
| промышленных кирпичных зданий | 28 |
| промышленных зданий со стальным и железобетонным каркасом | 30 |
| зданий с массивными стенами | 42 |
| 3. Стен: | |
| шлакоблочных | 22 |
| кирпичных в 1,5 кирпича | 40 |
| массивным | 100 |
| 4. Фундаментов: | |
| с замоноличенными колоннами каркаса | 215 |
| ленточных жилых домов | 400 |

11.2.2. Оценка устойчивости технологического оборудования к действию ударной волны

Промышленное оборудование (в первую очередь, дымовые трубы, ректификационные колонны, опоры линий электропередач, реакторы и др.) рассчитывают на действие скоростного напора воздуха, движущегося за фронтом ударной волны. Давление скоростного напора определяют по формуле [9, 12]

$$\Delta P_{\text{ск}} = 2,5 \Delta P_{\text{ф}}^2 / (\Delta P_{\text{ф}} + 7 P_0), \quad (11.2)$$

где $\Delta P_{\text{ф}}$ — избыточное давление во фронте ударной волны, кПа; P_0 — нормальное атмосферное давление, кПа.

При действии скоростного напора на объект возникает *смещающая сила*, которая может вызвать:

смещение оборудования относительно основания (фундамента) или его отбрасывание;

опрокидывание оборудования;
 мгновенное инерционное разрушение элементов оборудования
 (ударные перегрузки).

Смещение оборудования может привести к слабым, а в ряде случаев и средним разрушениям. Величина скоростного напора, вызывающего смещение оборудования (расчетная схема — рис. 11.1)

$$\Delta P_{\text{ск}} = fmg + Q_6/c_x lh, \quad (11.3)$$

где f — коэффициент трения (прил. 34); m — масса объекта (оборудования), кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; c_x — коэффициент аэродинамического сопротивления объекта (прил. 35); l — длина объекта, м (наиболее неблагоприятный случай воздействия ударной волны — перпендикулярно наибольшему размеру предмета); h — высота объекта, м.

$$Q_6 = \tau_{\text{ср}} \frac{\pi d_6^2}{4} n = 0,25 \sigma_{\text{T}} \frac{\pi d_6^2}{4} n, \quad (1.4)$$

Q_6 — суммарное усилие, Н, болтов крепления, работающих на срез; $\tau_{\text{ср}}$ — допустимое напряжение на срез, Н/м²; σ_{T} — предел текучести стали, Н/м², для стали 35 $\sigma_{\text{T}} = 6,33 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$; d_6 — диаметр болта, м; n — количество болтов.

При незакрепленном оборудовании ($Q_6 = 0$) вызывающий его смещение скоростной напор

$$\Delta P_{\text{ск}} = fmg/(c_x lh). \quad (11.5)$$

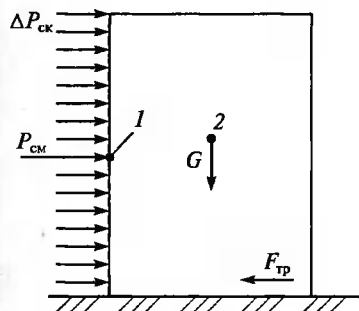


Рис. 11.1. Силы, действующие на объект при смещении:

$P_{\text{см}}$ — результирующее давление;
 1 — центр давления; 2 — центр тяжести

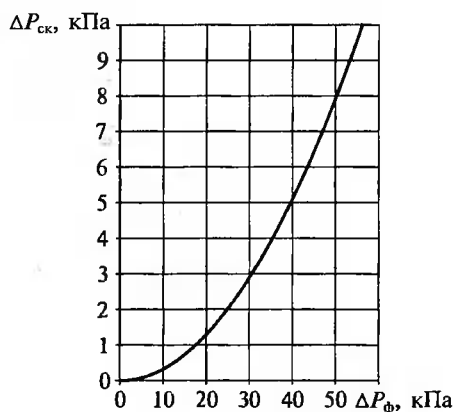


Рис. 11.2. Зависимость скоростного напора $\Delta P_{\text{ск}}$ от избыточного давления ударной волны $\Delta P_{\text{ф}}$

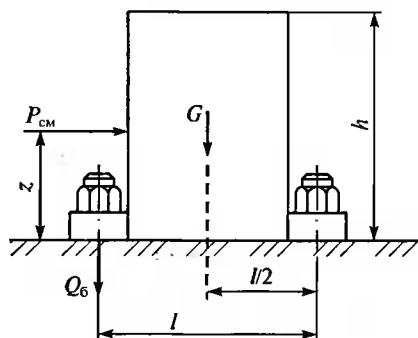


Рис. 11.3. Силы и реакции, действующие на предмет при опрокидывании

По величине скоростного напора $\Delta P_{\text{ск}}$, используя рис. 11.2, находят предельное избыточное давление $\Delta P_{\Phi}^{\text{lim}}$, при котором предмет не смещается.

Опрокидывание оборудования приводит к средним и сильным разрушениям. Смещающая сила $P_{\text{см}}$, действующая на плече $z = h/2$, будет создавать опрокидывающий момент, а вес (масса) оборудования на плече $l/2$ (или $d/2$) и реакция крепления Q на плече l (или d) — стабилизирующий момент (рис. 11.3).

$$\Delta P_{\text{ск}} = \frac{l}{c_x z S} \left(\frac{G}{2} + Q_6 \right), \quad (11.6)$$

где S — площадь объекта со стороны движения ударной волны, м^2 .

При $Q_6 = 0$

$$\Delta P_{\text{ск}} = mgl / (2c_x z S). \quad (11.7)$$

При $b = l = d$, где b — наименьший размер (ширина) объекта, м ,

$$\Delta P_{\text{ск}} = mg / (c_x h^2). \quad (11.8)$$

Суммарное усилие болтов крепления, работающих на разрыв,

$$Q_6 = \sigma_p (n/2), \quad (11.9)$$

где σ_p — допустимая нагрузка болта на разрыв, Н (прил. 36).

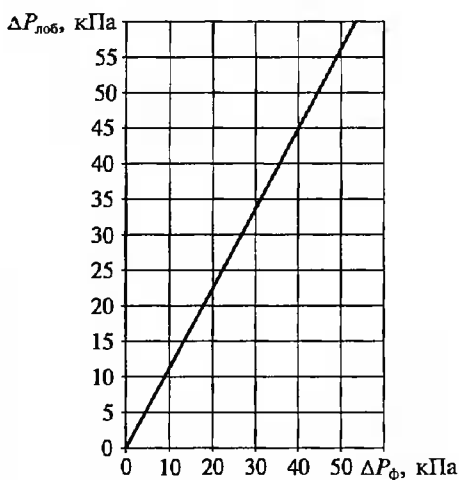
По величине скоростного напора $\Delta P_{\text{ск}}$, используя рис. 11.2, находят предельное избыточное давление $\Delta P_{\Phi}^{\text{lim}}$, при котором оборудование не опрокинется.

В данном случае для опрокидывания колонны требуется меньшее давление ударной волны, чем для ее смещения, что характерно для высоких элементов объекта (колонная аппаратура и др.); для низких, наоборот, требуется меньшее давление для смещения, чем для опрокидывания.

11.2.3. Оценка устойчивости электронной (офисной) аппаратуры и техники

Инерционные разрушения радиоэлектронной и оптической аппаратуры (разрыв соединительных проводов, мест пайки, хрупких деталей и т. п.) возникают от избыточного давления ударной

Рис. 11.4. Зависимость избыточного лобового давления $\Delta P_{\text{лоб}}$ от избыточного давления ударной волны ΔP_{ϕ}



волны и давления скоростного напора. Их приравнивают к сильной степени разрушения.

Предельное значение избыточного давления ударной волны, при котором оборудование не получит инерционных разрушений, $\Delta P_{\phi}^{\text{lim}}$, определяют с помощью рис. 11.4 по найденной величине избыточного предельного лобового давления:

$$\Delta P_{\text{лоб}} = P_{\text{лоб}}/S = ma_{\text{доп}}/S = mn_{\text{доп}}g/S, \quad (11.10)$$

где $P_{\text{лоб}}$ — лобовая сила (не приводящая к ударной перегрузке), Н; S — площадь воздействия ударной волны, м^2 ; m — масса прибора, кг; $a_{\text{доп}}$ — допустимое ускорение при ударе, $\text{м}/\text{с}^2$ (приведено в техническом паспорте на прибор или дано в прил. 37); $n_{\text{доп}} = a_{\text{доп}}/g$ — допустимая ударная перегрузка, не приводящая к инерционным разрушениям.

11.2.4. Оценка последствий аварий на потенциально опасных промышленных объектах

Для оценки технических и социальных последствий аварий на объектах по хранению, переработке и транспортировке сжиженных углеводородных газов (СУГ), сжатых углеводородных газов (СЖУГ), легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), конденсированных взрывчатых веществ (КВВ) разработана специальная методика (ВНИИ ГО ЧС, Москва, 1994).

Методика основывается на следующих предположениях и допущениях.

В качестве *поражающих факторов* в ней рассматриваются: воздушная ударная волна (ВУВ), образующаяся в результате взрывных превращений облаков топливо-воздушных смесей (ТВС) и конденсированных взрывчатых веществ (КВВ); тепловое излучение огневых шаров и горящих разлитий; осколки и обломки оборудования;

обломки зданий и сооружений, образующиеся в результате взрывных превращений обломков ТВС и взрывов КВВ;

осколки, образующиеся при взрывах сосудов под давлением.

В качестве *показателей последствий взрывных явлений* на промышленных объектах вследствие действия ВУВ, образующейся в результате взрыва облаков ТВС или КВВ, приняты:

для людей — количество человек, получивших смертельное поражение (без учета влияния мер экстренной медицинской помощи) при условии их нахождения на открытой местности, в зданиях и сооружениях;

для окружающей место аварии застройки — степени разрушения зданий и сооружений промышленной и селитебной зоны.

В качестве *показателя воздействия тепловых потоков на людей* принят процент людей, получивших ожоги первой и второй степени, а также смертельное поражение.

Воздействие тепловых потоков на *здания и сооружения* оценивается возможностью воспламенения горючих материалов.

В пределах огневого шара или горящего разлива люди получают смертельное поражение, все горящие материалы воспламеняются, а 60 % резервуаров со сжиженными углеводородными газами взрываются.

Масса вещества (СУГ, СЖУГ), переходящего в облако при разгерметизации оборудования, определяется из условий истечения вещества:

при мгновенной разгерметизации все вещество переходит в облако;

при длительном истечении это количество определяется по формуле:

$$\text{для СУГ} \quad M = 36\rho S \left(\frac{2(P - P_a)}{\rho} + 2gH \right)^{1/2}, \quad (11.11a)$$

$$\text{для СЖУГ} \quad M = 40S \sqrt{P_0 \rho_0 g}; \quad (11.12a)$$

при истечении из трубопровода количество определяется по формуле:

$$\text{для СУГ} \quad M = 60\rho S \left(\frac{2(P - P_0)}{\rho} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{4fl}{d} \right)^{-1/2}, \quad (11.11б)$$

$$\text{для СЖУГ} \quad M = 66S \sqrt{P_0 g}, \quad (11.12б)$$

где ρ — плотность, кг/м³; S — площадь сечения отверстия, м²; P — давление в резервуаре, Па; P_a — атмосферное давление, Па; g — ускорение свободного падения, 9,81 м/с²; H — высота слоя жидкости над отверстием, м; l — длина; d — диаметр; f — толщина стенки трубопровода, м.

При разрушении резервуара объем горючих жидкостей принимается равным 80 % от общего объема резервуара.

При разрушении трубопровода объем жидкости определяется по формуле

$$V = 0,79 d^2 l, \quad (11.13)$$

где d — диаметр трубопровода, м; l — длина отрезка между соседними отсекаателями, м.

Затем для СУГ и СЖУГ в зависимости от класса пространства (плотность сооружений в окружающем пространстве) и класса вещества определяется режим взрывного превращения облака ТВС.

В соответствии с выбранным режимом, а также в зависимости от массы топлива, содержащегося в облаке, определяются границы зон полных, сильных, средних и слабых степеней разрушения.

Для людей, находящихся на открытой местности, расстояние, на котором происходит поражение ВУВ при разных режимах взрывных превращений облаков ТВС, определяется по графикам.

Общее количество погибших людей, находящихся на открытой местности, определяется по формуле

$$N_M = \sum_{i=1}^6 \frac{n_i^M P_i^M}{100}, \quad (11.14)$$

где n_i^M — количество людей, находящихся в i -й зоне; P_i^M — число погибших в i -й зоне, %.

Количество погибших среди людей, находящихся в здании, определяется по формуле:

$$N_3 = \sum_{i=1}^4 \left[n_i^* \left(1 - \frac{P_i^*}{100} \right) + n_i^n \left(1 - \frac{P_i^n}{100} \right) \right], \quad (11.15)$$

где n_i^* — количество людей в жилых и административных зданиях, находящихся в i -й зоне; P_i^* — число людей, выживших в этих условиях, в процентах; n_i^n — количество людей, находящихся в промышленных зданиях, попавших в i -ю зону; P_i^n — количество людей, выживших в этих условиях, в процентах.

Число осколков, образующихся при разрыве сферического резервуара объемом V с СУГ, округлено до целого значения; величина

$$N = 3,77 + 0,0096V. \quad (11.16)$$

Средняя масса одного осколка определяется по формуле

$$m = M_p / N, \quad (11.17)$$

где M_p — масса оболочки резервуара, кг.

Затем определяется вероятная дальность полета осколка, зоны поражений зданий, сооружений и число людей, получивших смертельное поражение, в зависимости от объема резервуара и плотности размещения людей.

11.2.5. Основные пути повышения инженерной устойчивости промышленных объектов

Рекомендуются следующие варианты:

использование оптимальных конструкций и материалов зданий и сооружений;

надежное закрепление оборудования на фундаменте;

применение демпфирующих (деформируемых) опор оборудования;

создание специальных защитных упругих навесов, кожухов, зонтов, сеток и т. п.;

расположение массивной техники на нижних этажах и вне помещения;

возможность эксплуатации объекта на топливе разных видов (газе, угле, мазуте и т. п.);

обваловывание емкостей с вредными веществами, горючими и легковоспламеняющимися жидкостями;

закрепление высоких элементов объекта оттяжками (тросами), рассчитанными на воздействие скоростного напора ударной волны.

11.3. Прогнозирование экологической обстановки при авариях на химически опасных объектах

11.3.1. Масштабы реальной опасности химических объектов

Экологическая безопасность функционирования химически опасных предприятий зависит от многих факторов, например, физико-химических свойств сырья, полуфабрикатов и готового продукта, характеристик технологического процесса и др. Особенностью работы с ВВ (горючими, легковоспламеняющимися) веществами является возможность их потенциального взрыва, пожара и выброса (разлива) в биосферу в количествах, представляющих опасность массового поражения людей, животных и окружающей среды.

Исходя из оценки масштабов реальной опасности (токсичности веществ, их запасов и характера распространения в атмосфере), перечень ВВ, от воздействия которых в первую очередь необходима защита, можно ограничить девятью веществами, *токсикологические* характеристики которых приведены в табл. 11.2 [10].

Основной характеристикой зоны химического заражения является *глубина распространения облака* зараженного воздуха. Глу-

Ингаляционные токсодозы, мг/(л · мин)

| Наименование ВВ | Смертельные | Вызывающие | |
|--------------------------|-------------|------------------------------|-----------------------|
| | | поражения средней тяжести | начальные симптомы |
| Хлор | 6,0 | 0,6 | 0,01 |
| Аммиак | 100,0 | 15,0 | 0,25 |
| Фосген | 6,0 | 0,6 | 0,01 |
| Сернистый ангидрид | 70,0 | 20,0 | 0,40—0,50 |
| Фторид водорода | 7,5 | 4,0 | 0,40 |
| Цианид водорода | 1,5 | 0,75 | 0,02—0,04 |
| Сероводород | 30,0 | 5,0 | 0,30 |
| Сероуглерод | 900,0 | 135,0 | 1,50—1,60 |
| Нитрил акриловой кислоты | 7,0 | 0,7 | 0,03 |

бина зоны химического заражения для ВВ определяется глубиной распространения первичного или вторичного облака зараженного воздуха. Первичным называется облако газа (пара, аэрозоля) токсичного вещества, образовавшегося мгновенно (1—3 мин) в результате разрушения или разгерметизации емкости (резервуара). Вторичное облако — образовавшееся в результате испарения ВВ с площади его разлива. В табл. 11.3 [10] приведены глубины опасных зон распространения первичного облака ВВ, образующегося при разрушении емкостей для хранения. Они рассчитаны для средних метеоусловий (изотермия, скорость ветра 1 м/с). В условиях *инверсии* глубина распространения будет увеличиваться в зависимости от скорости ветра в 1,1—3,0 раза; при *конвекции* — уменьшаться.

Время воздействия опасных концентраций зависит от типа и количества выброшенного (вылитого) ВВ, а также метеоусловий в районе аварии (скорости ветра и температуры окружающей среды) и может колебаться от нескольких часов до нескольких суток. Например, при выбросе (выливе) 50 тыс. т ВВ при температуре окружающей среды 20 °С время действия хлора, аммиака, фосгена и сероводорода составляет 1,8; 3,2; 1,7 и 6,7 сут соответственно [10].

Масштабы заражения ВВ в зависимости от их физических свойств и агрегатного состояния рассчитывают:

для сжиженных газов — отдельно по первичному и вторичному облаку;

для сжатых газов — только по первичному облаку;

Глубина распространения первичного облака ВВ

| Наименование ВВ | Объем хранения в резервуарах, т | Глубина распространения первичного облака*, км |
|--------------------------|---------------------------------|--|
| Хлор | 30—2000 | 96/26 |
| Аммиак | 30—30 000 | 65/22 |
| Фосген | 1—300 | 33,5/17 |
| Цианид водорода | 1—300 | 30/19,5 |
| Сероуглерод | 1—300 | 1,5/0,5 |
| Сероводород | 1—300 | 9,8/3,5 |
| Нитрил акриловой кислоты | 1—500 | 39/11 |
| Сернистый ангидрид | 25—200 | 19/6,6 |

* Числитель — для поражающих концентраций, знаменатель — для смертельных при максимальном объеме.

для ядовитых жидкостей, кипящих выше температуры окружающей среды (20 °С), — только по вторичному облаку.

В большинстве случаев при обычных условиях СДЯВ находятся в газообразном или жидком состояниях. Однако при производстве, использовании, хранении и перевозке газообразные вещества, как правило, переводят в жидкое состояние. Это резко сокращает занимаемый ими объем. При аварии они испаряются, образуя зону заражения. Двигаясь по направлению приземного ветра, облако СДЯВ может сформировать зону заражения глубиной до десятков километров, вызывая поражение населения.

Крупными запасами СДЯВ располагают предприятия химической, целлюлозно-бумажной, оборонной, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, черной и цветной металлургии, производства удобрений, пищевой и текстильной отраслей.

Значительные их запасы сосредоточены на объектах пищевой, мясо-молочной промышленности, холодильниках торговых баз, в жилищно-коммунальном хозяйстве. Например, содержатся десятки тонн аммиака, используемого в качестве хладагента, — на крупных холодильниках, хлора — на водопроводных станциях. Причем эти объекты находятся, как правило, в непосредственной близости от жилых домов и районов.

При авариях на железнодорожном транспорте в окружающую среду попадают хлор, аммиак, бензол, бутadiен, формалин, разные кислоты, бензин, керосин, дизельное топливо, моторные масла и другие перевозимые опасные вещества [11, 12].

11.3.2. Сильнодействующие ядовитые вещества

Химически опасное вещество (ХОВ) — простое вещество или сложное химическое соединение, выброс которого в окружающую среду вследствие аварии на производстве, складе или при транспортировке может привести к образованию очага поражения, а также заражению почвы и открытых водоисточников.

Все химически вредные вещества по степени опасности для организма человека делятся на четыре класса: чрезвычайно, высоко, умеренно и мало опасные. Таким образом, ХОВ — это более широкое понятие, чем СДЯВ, к которым относят только вещества, относящиеся к первому и второму классам.

*Сильнодействующие ядовитые вещества*¹ — химические вещества, обладающие комплексом физико-химических, токсических и иных свойств, способствующих возникновению массовых поражений людей в ЧС природных, техногенных, биолого-социальных или военных.

В соответствии с ГОСТ Р 22.9.05—95 осуществляется постепенный переход от СДЯВ к АХОВ, хотя в действующих документах пока используются оба понятия.

Под аварийно химически опасным веществом (АХОВ) следует понимать опасное химическое вещество, применяемое в промышленности и сельском хозяйстве, при аварийном выбросе (разливе) которого может произойти заражение окружающей среды в поражающих живой организм концентрациях (токсодозах).

Количество АХОВ теперь уменьшилось и доведено до 21, тогда как СДЯВ было 34. Исключены вещества, редко встречающиеся или применяемые в малых количествах и при авариях, не представляющих серьезной опасности.

Химически опасный объект — предприятие, при аварии на котором могут произойти массовые поражения людей, животных и растений ядовитыми веществами.

Для характеристики токсичных свойств СДЯВ используются понятия: ПДК вредного вещества и токсическая доза (токсодоза). ПДК — концентрация, которая при ежедневном воздействии на человека в течение длительного времени не вызывает патологических изменений или заболеваний.

Предельно допустимые концентрации некоторых СДЯВ в атмосфере населенных мест (среднесуточная) ПДК_{сс} и в рабочем помещении промышленного предприятия ПДК_{п.п} приведены в табл. 11.4.

Наиболее распространенными из используемых СДЯВ являются хлор, аммиак, сероводород, диоксид серы (сернистый ангидрид), синильная кислота, фосген, метилмеркаптан, бензол, бромид водорода, фтор, фторид водорода.

¹ СДЯВ в соответствии с ГОСТ 12.10.07—76 относятся к I и II классам ВВ — чрезвычайно опасным веществам. В данном курсе СДЯВ и ВВ (I, II) — синонимы.

ПДК СДЯВ в атмосфере населенных мест и в воздухе предприятий

| СДЯВ | ПДК _{сс} , мг/м ³ | ПДК _{п.п.} , мг/м ³ |
|-------------------|---------------------------------------|---|
| Хлор | 0,030 | 1,0 |
| Аммиак | 0,200 | 20,0 |
| Акрилонитрил | 0,030 | 0,5 |
| Синильная кислота | 0,010 | 0,3 |
| Сероводород | 0,008 | 10,0 |
| Серный ангидрид | 0,050 | 10,0 |
| Фосген | — | 4,4 |
| Бензол | 0,800 | 5,0 |
| Монометиламин | — | 1,0 |
| Диметиламин | 0,005 | 1,0 |
| Триметиламин | — | 5,0 |
| Азотная кислота | 0,150 | 2,0 |
| Серная кислота | 0,100 | 1,0 |
| Соляная кислота | 0,200 | 5,0 |

Хлор — газ зеленовато-желтого цвета с резким удушающим запахом. При обычном давлении затвердевает при -101°C и сжижается при -34°C . Тяжелее воздуха в 2,5 раза. При испарении и соединении с водяными парами в воздухе стелется над землей в виде тумана зеленовато-белого цвета, может проникать в нижние этажи и подвальные помещения зданий. При выходе в атмосферу из неисправных емкостей дымит.

Ежегодное потребление хлора в России достигает 2 млн т. Используется хлор в производстве хлорорганических соединений (винилхлорида, хлоропренового каучука, дихлорэтана, хлорбензола и др.). В большинстве случаев применяется для отбеливания тканей и бумажной массы, обеззараживания питьевой воды, как дезинфицирующее средство и в других отраслях промышленности. Хранят и перевозят его в стальных баллонах, контейнерах и железнодорожных цистернах под давлением.

Пары хлора вызывают ожоги слизистой оболочки дыхательных путей, глаз, кожи. Первые признаки отравления — резкая загрудинная боль, резь в глазах, слезотделение, сухой кашель, рвота, нарушение координации, одышка. Воздействие в течение 30—60 мин при концентрации 100—200 мг/м³ опасно для жизни.

ПДК хлора в атмосферном воздухе: среднесуточная — 0,03 мг/м³; максимальная разовая — 0,1 мг/м³; в рабочем помещении промышленного предприятия — 1 мг/м³.

Пораженного хлором пострадавшего выносят на свежий воздух, тепло укрывают и дают дышать парами спирта или воды.

Наличие хлора в воздухе можно определить с помощью ВПХР (войскового прибора химической разведки), используя индикаторные трубки, обозначенными тремя зелеными кольцами, или УГ-2 (универсального газоанализатора).

При интенсивной утечке хлора, чтобы осадить газ, используют распыленный раствор кальцинированной соды или воду. Место разлива заливают аммиачной водой, известковым молоком, раствором кальцинированной соды или каустика с концентрацией 60—80 % и более (примерный расход — 2 л раствора на 1 кг хлора). Органы дыхания и глаза от хлора защищают фильтрующими и изолирующими противогазами.

Максимально допустимая концентрация при применении фильтрующих противогазов — 2500 мг/м³; при большей следует пользоваться изолирующими противогазами.

Аммиак — бесцветный газ с характерным резким запахом (нашатырного спирта), почти в два раза легче воздуха. При выходе в атмосферу дымит. При обычном давлении затвердевает при -78 °С и сжижается при -34 °С. С воздухом образует взрывоопасные смеси в пределах 15—28 об. %.

Растворимость его в воде больше, чем у всех других газов: один объем воды поглощает при 20 °С около 700 объемов аммиака, 10%-й раствор аммиака поступает в продажу под названием «нашатырный спирт». 18—20%-й раствор называется аммиачной водой и используется как удобрение. Жидкий аммиак — хороший растворитель большинства органических и неорганических соединений.

Мировое производство аммиака — около 90 млн т ежегодно. Его используют при получении азотной кислоты, азотсодержащих солей, соды, мочевины, синильной кислоты, удобрений, диазотипных светокопировальных материалов. Жидкий аммиак широко применяется в качестве рабочего вещества (хладагента) в холодильных машинах и установках.

Перевозится в сжиженном состоянии под давлением. ПДК в воздухе населенных мест: среднесуточная и максимально разовая — 0,2 мг/м³, в рабочем помещении промышленного предприятия — 20 мг/м³. Если же его содержание в воздухе достигает 500 мг/м³, он опасен для вдыхания (возможен смертельный исход).

Вызывает поражение дыхательных путей. Признаки: насморк, кашель, затрудненное дыхание, удушье, учащенный пульс. Пары сильно раздражают слизистые оболочки и кожный покров, вызывают жжение, покраснение и зуд кожи, резь в глазах, слезотечение. При соприкосновении жидкого аммиака и его растворов с кожей человека возникает обморожение, жжение, возможен ожог с пузырями и язвами.

Пораженного аммиаком следует немедленно вынести на свежий воздух. Транспортировку осуществляют в лежащем положении, не-

обходимо обеспечить тепло и покой, подачу увлажненного кислорода. При отеке легких искусственное дыхание делать нельзя.

Наличие и концентрацию аммиака в воздухе позволяет определить универсальный газоанализатор УГ-2.

В случае аварии необходимо изолировать опасную зону, удалить людей и не допускать их вновь без средств защиты органов дыхания и кожи. Около зоны следует находиться с наветренной стороны. Место разлива нейтрализуют слабым раствором кислоты, промывают большим количеством воды. Если произошла утечка газообразного аммиака, то с помощью поливмоечных машин, авторазливочных станций, пожарных машин распыляют воду для поглощения паров.

Фосген (COCl_2 — хлорангидрид угольной кислоты) — одно из распространенных СДЯВ. Бесцветный очень ядовитый газ с характерным сладковатым запахом гнилых фруктов, прелой листвы или мокрого сена. При обычном давлении затвердевает при -128°C и сжижается при $+8^\circ\text{C}$. В газообразном состоянии примерно в 3,5 раза тяжелее воздуха, в жидком — в 1,4 раза тяжелее воды. Даже при низких температурах обладает большой летучестью.

Из-за большой реакционной способности фосген широко используется при получении растворителей, красителей, лекарственных средств, поликарбонатов и других веществ.

При поражении парами наиболее выраженный признак — отек легких, в результате чего нарушается газообмен — содержание диоксида углерода в крови увеличивается, а кислорода — падает. Проявляется лишь после скрытого периода — от 4 до 8 ч. Пульс и сердцебиение учащаются, повышается температура, появляется головная боль, головокружение, боль в груди и горле, общая слабость, одышка, лицо, уши и кисти рук синеют.

ПДК в рабочих помещениях промышленного предприятия $0,5 \text{ мг/м}^3$.

Защиту органов дыхания обеспечивают фильтрующие промышленные марки В (коробка окрашена в желтый цвет), а также гражданские ГП-5, ГП-7, детские и изолирующие противогазы.

Максимально допустимая концентрация при применении фильтрующих промышленных противогазов $22\,000 \text{ мг/м}^3$ ($44\,000$ ПДК), выше которой должны использоваться только изолирующие противогазы. При ликвидации аварий на химически опасных объектах, когда концентрация фосгена неизвестна, работы проводятся только в изолирующих противогазах.

Чтобы защитить кожу человека от попадания жидкого фосгена, следует использовать защитные прорезиненные костюмы, резиновые сапоги и перчатки.

Наличие паров фосгена в воздухе определяют приборами УГ-2, ВПХР, ПХР-МВ, УПГК и «Колион-1».

Ртуть. Значительную опасность загрязнения окружающей среды и ухудшения экологической обстановки представляют тяжелые ме-

таллы и их химические соединения. Наиболее распространенными являются свинец, кадмий, мышьяк, ртуть, хром, никель, олово, цинк, сурьма. Чаще всего человек сталкивается с ртутью. Это жидкий серебристо-белый металл плотностью $13,52 \text{ г/см}^3$. Плавится при -39°C , кипит при $+357^\circ\text{C}$, поэтому применяется в термометрах (от -35 до $+350^\circ\text{C}$). Пары ртути при электрических разрядах излучают голубовато-зеленый цвет, богатый ультрафиолетовыми лучами. На этой основе созданы ртутные светильники и лампы дневного света. Ртуть используется в качестве катализатора при производстве хлора, едкого натра, широкое применение находит в измерительных приборах — термометрах, барометрах, манометрах и т. д. Ртуть очень токсична. Отравление парами ртути наиболее вероятно в непроветриваемом помещении, где возможна их повышенная концентрация.

Первые признаки отравления проявляются через 8—24 ч и выражаются в общей слабости, головных болях, болях при глотании, повышении температуры. Несколько позже наблюдается болезненность десен, боли в животе, желудочные расстройства, иногда воспаление легких. Известны даже смертельные исходы.

Опасность ртути состоит еще в том, что ее пары адсорбируются на оштукатуренных стенах и потолке, лакокрасочных покрытиях, оседают в швах кирпичной кладки, бетонных плит, чем усложняются работы по ликвидации последствий. Без средств защиты категорически запрещается находиться в помещении с выделениями паров ртути. Исключается и хранение там продуктов питания или прием пищи. Необходимо срочно удалить всех из помещения, немедленно поставить в известность о случившемся главного санитарного врача (СЭС) района (города), начальника территориального подразделения ГО и ЧС, органы здравоохранения и милицию.

При острых отравлениях немедленно обильно промыть желудок водой с 20—30 г активированного угля или белковой водой (взбитым с водой яичным белком), после чего дать молоко. Можно рекомендовать отвары риса или овсянки с последующим приемом слабительного. В случае сильного ингаляционного отравления после выхода из зоны поражения пострадавшему необходим покой в условиях медицинского стационара.

11.3.3. Прогнозирование химической обстановки при авариях со СДЯВ

Методика прогнозирования масштабов зон заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях на технологическом оборудовании и хранилищах, при транспортировке железнодорожным, трубопроводным и другими видами транспорта, а также в случае разрушения химически опасных объектов распространяется на случай выброса СДЯВ в атмосферу в газообразном, парообразном или аэрозольном состояниях [13].

Масштабы заражения СДЯВ в зависимости от их физических свойств и агрегатного состояния также рассчитывают по первичному и вторичному облаку (см. выше для ВВ).

Для прогнозирования масштабов заражения СДЯВ необходимо иметь данные по их физико-химическим свойствам, общему количеству на предприятии и размещению в технологическом оборудовании и складских емкостях, количеству СДЯВ, выброшенных в атмосферу и разлитых по подстилающей поверхности («свободно», в «поддон» или «обваловку»), высоте поддона или обваловки складских емкостей. Требуется также данные по метеорологическим условиям в районе аварий: температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м (высота флюгера), степень вертикальной устойчивости воздуха.

При заблаговременном прогнозировании масштабов заражения в случае производственной аварии в качестве исходных данных рекомендуется принимать за величину выброса СДЯВ (Q_0) его содержание в максимальной по объему единичной емкости (для сейсмических районов — общий запас СДЯВ), метеорологические условия — инверсию, скорость ветра — 1 м/с.

При расчете масштабов заражения непосредственно после аварии берут конкретные данные о количестве выброшенного (разлившегося) СДЯВ и реальные метеоусловия.

Ниже приведены данные для определения степени вертикальной устойчивости воздуха по прогнозу погоды:

| | | | |
|--|--|--|--------------------------------------|
| Скорость ветра ¹ , м/с | 2 | 2—3,9 | 4 |
| Вертикальная устойчивость воздуха ^{*1,*2} (числитель — «ясно, переменная облачность», знаменатель — «сплошная облачность»): | | | |
| ночь ^{*3} | <u>Инверсия</u> Изотермия | <u>Инверсия</u> Изотермия | <u>Изотермия</u> Изотермия |
| утро ^{*4} | <u>Изотермия</u> <u>(инверсия)</u> Изотермия | <u>Изотермия</u> <u>(инверсия)</u> Изотермия | <u>Изотермия</u> <u>Изотермия</u> |
| день ^{*5} | Конвекция <u>(изотермия)</u> Изотермия | <u>Изотермия</u> Изотермия | <u>Изотермия</u> Изотермия |
| вечер ^{*6} | Изотермия <u>Инверсия</u> Изотермия | <u>(инверсия)</u> Изотермия | <u>Изотермия</u> Изотермия |

*1 Принимают в расчетах на момент аварии. *2 В скобках — при снежном покрове. Периоды: *3 от захода до восхода солнца за вычетом двух вечерних часов; *4 два часа после восхода солнца, *5 от восхода до захода солнца за вычетом двух утренних часов, *6 два часа после захода солнца.

Границы зоны заражения СДЯВ рассчитывают по пороговой токсодозе при ингаляционном воздействии на организм человека.

Под пороговой понимают такую ингаляционную токсодозу, которая вызывает начальные симптомы поражения. Расчет глубины зоны заражения СДЯВ проводят с помощью данных, приведенных, в частности, в табл. 11.5—11.7 (см. далее). Табличные значения рассчитаны, исходя из следующих принятых условий:

емкости, содержащие СДЯВ, при авариях разрушаются полностью;

толщину слоя жидкости для СДЯВ (h), разлившихся свободно на подстилающей поверхности, принимают равной 0,05 м по всей площади разлива; для СДЯВ, разлившихся в поддон или обваловку, определяют из соотношения: $h = H - 0,2$, где H — высота поддона (обвалования);

при разливе из емкостей, расположенных группой и имеющих общий поддон (обвалование):

$$h = Q_0 / (Fd), \quad (11.18)$$

где Q_0 — количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т; F — реальная площадь разлива в поддон (обвалование), м²; d — плотность СДЯВ, т/м³.

предельное время пребывания людей в зоне заражения и продолжительность сохранения неизменными метеорологических условий (степень вертикальной устойчивости воздуха, направление и скорость ветра) составляют 4 ч. По истечении указанного времени прогноз обстановки должен уточняться;

при авариях на газо- и продуктопроводах величину выброса СДЯВ принимают равной ее максимальному количеству, содержащемуся в трубопроводе между автоматическими отсекающими, например, для аммиакопроводов 275—500 т [2, 12].

Определение количественных характеристик выброса СДЯВ

Количественные характеристики выброса СДЯВ для расчета масштабов заражения определяют по их эквивалентным значениям.

Под эквивалентным количеством сильнодействующего ядовитого вещества понимают такое количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии эквивалентен масштабу заражения при данной степени вертикальной устойчивости воздуха количеством данного вещества, перешедшим в первичное (вторичное) облако.

Эквивалентное количество вещества, т, по первичному облаку определяется по формуле

$$Q_{э1} = K_1 K_3 K_5 K_7 Q_0, \quad (11.19)$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от условий хранения СДЯВ (табл. 11.5), для сжатых газов $K_1 = 1$; K_3 — коэффициент, равный

отношению поражающей токсодозы хлора к поражающей токсодозе другого СДЯВ; K_5 — коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости воздуха (принимают для инверсии равным 1, для изотермии — 0,23, для конвекции — 0,08); K_7 — коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, для сжатых газов $K_7 = 1$; Q_0 — количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т.

При авариях на хранилищах сжатого газа величины Q_0 рассчитывают по формуле

$$Q_0 = dV_x, \quad (11.20)$$

где d — плотность газообразного СДЯВ, т/м³; V_x — объем хранилища, м³.

При авариях на газопроводах величину Q_0 определяют по формуле

$$Q_0 = (n d V_r)/100, \quad (11.21)$$

где n — процентное содержание СДЯВ в газе; V_r — объем секции газопровода между автоматическими отсекаателями, м³.

При определении Q_1^3 для сжиженных газов, не вошедших в табл. 11.5, принимают $K_7 = 1$, а K_1 рассчитывают по соотношению

$$K_1 = (C_p \Delta T)/\Delta H_{исп}, \quad (11.22)$$

где C_p — удельная теплоемкость жидкого СДЯВ; кДж/(кг·К); ΔT — разность температур жидкого СДЯВ до и после разрушения емкости, °С; $\Delta H_{исп}$ — удельная теплота испарения жидкого СДЯВ при температуре испарения, кДж/кг (1 ккал = 4,1865 кДж).

Эквивалентное количество вещества по вторичному облаку определяют по формуле

$$Q_2^3 = (1 - K_1) K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 Q_0 / (hd), \quad (11.23)$$

где K_2 — коэффициент, зависящий от физико-химических свойств СДЯВ (см. табл. 11.5); K_4 — коэффициент, учитывающий скорость ветра (табл. 11.6); K_6 — коэффициент, зависящий от времени τ , прошедшего после начала аварии.

| | | | | | |
|------------------|---|------|------|------|--------------|
| τ , ч | 1 | 2 | 3 | 4 | > 4 |
| K_6 | 1 | 1,74 | 2,41 | 3,03 | $\tau^{0,8}$ |

d — плотность жидкого СДЯВ, т/м³ (см. табл. 11.5); h — толщина слоя СДЯВ, м.

Время испарения СДЯВ с площади разлива, ч:

$$\tau_{и} = hd / (K_2 K_4 K_7). \quad (11.24)$$

При определении величины Q_2^3 для веществ, не вошедших в табл. 11.5, принимают $K_7 = 1$, а K_2 вычисляют по формуле

$$K_2 = 8,10 \cdot 10^{-6} P \sqrt{M}, \quad (11.25)$$

Характеристика СДЯВ и вспомогательных коэффициентов для определения глубин зон заражения

| СДЯВ | Плотность СДЯВ, т/м ³ | | $t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$ | Поражающая токсодоза, мин/л | K_1 | K_2 | K_3 | K_7^{*2} для | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|----------|----------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|----------------|--------|-------|-------|
| | газа*1 | жидкости | | | | | | -40 °C | -20 °C | 0 °C | 20 °C |
| Акролеин | — | 0,839 | 52,7 | 0,8*3 | 0 | 0,013 | 0,75 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 1 |
| Аммиак (под давлением) | 0,0008 | 0,681 | -33,42 | 15 | 0,18 | 0,025 | 0,4 | 0/0,9 | 0,3/1 | 0,6/1 | 1/1 |
| Ацетонитрил | — | 0,786 | 8,66 | 21,6*4 | 0 | 0,004 | 0,028 | 0,02 | 0,1 | 0,3 | 1 |
| Водорода арсенид | 0,0035 | — | -62,47 | 0,7*4 | 0,17 | 0,054 | 0,857 | 0,3/1 | 0,5/1 | 0,8/1 | 1/1 |
| Водорода фторид | — | 0,989 | 19,52 | 4 | 0 | 0,028 | 0,15 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 |
| Водорода хлорид | 0,0016 | 1,191 | -85,10 | 2 | 0,28 | 0,037 | 0,30 | 0,64/1 | 0,6/1 | 0,8/1 | 1/1 |
| Диметиламин | 0,0020 | 0,680 | 6,9 | 1,2*3 | 0,06 | 0,041 | 0,5 | 0/0,1 | 0/0,3 | 0/0,8 | 1/1 |
| Кислота бромистоводородная | 0,0036 | 1,490 | -66,77 | 0,1*3 | 0,13 | 0,055 | 6,0 | 0,2/1 | 0,5/1 | 0,8/1 | 1/1 |
| Метиламин | 0,0014 | 0,699 | -6,5 | 1,2*3 | 0,13 | 0,034 | 0,5 | 0/0,3 | 0/0,7 | 0,5/1 | 1/1 |
| Метилбромид | — | 1,732 | 3,6 | 1,2*3 | 0,04 | 0,039 | 0,5 | 0/0,2 | 0/0,4 | 0/0,9 | 1/1 |
| Метилхлорид | 0,0023 | 0,983 | -23,76 | 10,8*4 | 0,125 | — | 0,056 | 0/0,5 | 0,1/1 | 0,6/1 | 1/1 |
| Метилакрилат | — | 0,953 | 80,2 | 24*3 | 0 | 0,005 | 0,025 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 1 |
| Оксиды азота | — | 1,491 | 21,0 | 1,5 | 0 | 0,040 | 0,40 | 0 | 0 | 0,4 | 1 |

| СДЯВ | Плотность СДЯВ, т/м ³ | | $t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$ | Поражаю- щая токсоло- доза, мин/л | K_1 | K_2 | K_3 | K_7^{*2} для | | | |
|-------------------------|-------------------------------------|----------|----------------------------------|--|-------|-------|-------|----------------|--------|-------|-------|
| | газа* ¹ | жидкости | | | | | | -40 °С | -20 °С | 0 °С | 20 °С |
| Оксид этилена | — | 0,882 | 10,7 | 2,2* ⁴ | 0,05 | 0,041 | 0,27 | 0/0,1 | 0/0,3 | 0/0,7 | 1/1 |
| Диоксид серы | 0,0029 | 1,462 | -10,1 | 1,8 | 0,11 | 0,049 | 0,333 | 0/0,2 | 0/0,5 | 0,3/1 | 1/1 |
| Сероводород | 0,0015 | 0,964 | -60,35 | 16,1 | 0,27 | 0,042 | 0,036 | 0,3/1 | 0,5/1 | 0,8/1 | 1/1 |
| Сероуглерод | — | 1,263 | 46,2 | 45 | 0 | 0,021 | 0,013 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 1 |
| Соляная кислота (конц.) | — | 1,198 | — | 2 | 0 | 0,021 | 0,30 | 0 | 0,1 | 0,3 | 1 |
| Триметиламин | — | 0,671 | 2,9 | 6* ³ | 0,07 | 0,047 | 0,1 | 0/0,1 | 0/0,4 | 0/0,9 | 1/1 |
| Формальдегид | — | 0,815 | -19,0 | 0,6* ³ | 0,19 | 0,034 | 1,0 | 0/0,4 | 0/1 | 0,5/1 | 1/1 |
| Фосген | 0,0035 | 1,432 | 8,2 | 0,6 | 0,06 | 0,061 | 1,0 | 0/0,1 | 0/0,3 | 0/0,7 | 1/1 |
| Фтор | 0,0017 | 1,512 | -188,2 | 0,2* ³ | 0,95 | 0,038 | 3,0 | 0,7/1 | 0,8/1 | 0,9/1 | 1/1 |
| Фосфора трихлорид | — | 1,570 | 75,3 | 3 | 0 | 0,010 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 1 |
| Хлор | 0,0032 | 1,553 | -34,1 | 0,6 | 0,18 | 0,052 | 1,0 | 0/0,9 | 0,3/1 | 0,6/1 | 1/1 |
| Хлорциан | 0,0021 | 1,220 | 12,6 | 0,75 | 0,04 | 0,048 | 0,80 | 0/0 | 0/0 | 0/0,6 | 1/1 |
| Этиленсульфид | — | 1,005 | 55,0 | 0,1* ³ | 0 | 0,013 | 6,0 | 0,05 | 0,1 | 0,4 | 1 |
| Этилмеркаптан | — | 0,839 | 35,0 | 2,2* ⁴ | 0 | 0,028 | 0,27 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 |

*¹ Плотности приведены для атмосферного давления.

*² В числителе — для первичного облака, в знаменателе — для вторичного облака.

*³, *⁴ Значения токсолоз, мг·(мин/л), определены ориентировочно по соотношению: $D = 240K \cdot \text{ПДК}_{\text{P3}}$, где ПДК_{P3} — ПДК рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005—88, мг/л; $K = 5$ для раздражающих ядов (*³), $K = 9$ для прочих ядов (*⁴); $K = 1$ для остальных СДЯВ.

Глубины (Г) зон возможного заражения СДЯВ, км

| v, м/с | Эквивалентное количество вещества, т | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,5 | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 | 70 | 100 | 300 | 500 | 700 | 1000 | 2000 |
| 1 | 1,25 | 3,16 | 4,75 | 9,18 | 12,53 | 19,20 | 21,56 | 38,13 | 52,67 | 65,23 | 81,91 | 166 | 231 | 288 | 363 | 572 |
| 2 | 0,84 | 1,92 | 2,84 | 5,35 | 7,20 | 10,85 | 16,44 | 21,02 | 28,79 | 28,79 | 44,09 | 87,79 | 121 | 150 | 189 | 295 |
| 3 | 0,68 | 1,53 | 2,17 | 3,99 | 5,34 | 7,96 | 11,94 | 15,18 | 20,59 | 20,59 | 31,30 | 61,47 | 84,50 | 104 | 130 | 202 |
| 4 | 0,59 | 1,33 | 1,88 | 3,28 | 4,36 | 6,46 | 9,62 | 12,18 | 16,43 | 16,43 | 24,80 | 48,18 | 65,92 | 81,17 | 101 | 157 |
| 5 | 0,53 | 1,19 | 1,68 | 2,91 | 3,75 | 5,53 | 8,19 | 10,33 | 13,88 | 16,89 | 20,82 | 40,11 | 54,67 | 67,15 | 83,60 | 129 |
| 6 | 0,48 | 1,09 | 1,53 | 2,66 | 3,43 | 4,88 | 7,20 | 9,06 | 12,14 | 12,14 | 18,13 | 34,67 | 47,09 | 56,72 | 71,70 | 110 |
| 7 | 0,45 | 1,00 | 1,42 | 2,46 | 3,17 | 4,49 | 6,48 | 8,14 | 10,87 | 10,87 | 16,17 | 30,73 | 41,63 | 50,93 | 63,16 | 96,30 |
| 8 | 0,42 | 0,94 | 1,33 | 3,30 | 2,97 | 4,20 | 5,92 | 7,42 | 9,90 | 9,90 | 14,68 | 27,75 | 37,49 | 45,79 | 56,70 | 86,20 |
| 9 | 0,40 | 0,88 | 1,25 | 2,17 | 2,80 | 3,96 | 5,60 | 6,86 | 9,12 | 9,12 | 13,50 | 25,39 | 34,24 | 41,76 | 51,60 | 78,30 |
| 10 | 0,38 | 0,84 | 1,19 | 2,06 | 2,66 | 3,76 | 5,31 | 6,50 | 8,50 | 8,50 | 12,54 | 23,49 | 31,61 | 38,50 | 47,53 | 71,90 |
| 11 | 0,36 | 0,80 | 1,13 | 1,96 | 2,53 | 3,58 | 5,06 | 6,20 | 8,01 | 8,01 | 11,74 | 21,91 | 29,44 | 35,81 | 44,15 | 66,62 |
| 12 | 0,34 | 0,76 | 1,08 | 1,88 | 2,42 | 3,43 | 4,85 | 5,94 | 7,67 | 7,67 | 11,06 | 20,58 | 27,61 | 33,55 | 41,30 | 62,20 |
| 13 | 0,33 | 0,74 | 1,04 | 1,80 | 2,37 | 3,29 | 4,66 | 5,70 | 7,37 | 7,37 | 10,48 | 19,45 | 26,04 | 31,62 | 38,90 | 58,44 |
| 14 | 0,32 | 0,71 | 1,00 | 1,74 | 2,24 | 3,17 | 4,49 | 5,50 | 7,10 | 7,10 | 10,04 | 18,46 | 24,69 | 29,95 | 36,81 | 55,20 |
| 15 | 0,31 | 0,69 | 0,97 | 1,68 | 2,17 | 3,07 | 4,34 | 5,31 | 6,86 | 6,86 | 9,70 | 17,60 | 23,50 | 28,48 | 34,98 | 52,37 |

Примечание. При $v > 15$ м/с размеры зон заражения принимать как при 15 м/с; при $v < 1$ м/с размеры зон заражения принимать как при 1 м/с.

где P — давление насыщенного пара вещества при заданной температуре воздуха, мм рт. ст.; M — молекулярная масса вещества.

В случае разрушения всего химически опасного объекта при прогнозировании глубины заражения рекомендуется принимать данные на одновременный выброс суммарного запаса СДЯВ и следующие метеорологические условия: инверсия, скорость ветра — 1 м/с.

Эквивалентное количество СДЯВ в облаке зараженного воздуха определяют аналогично рассмотренному методу только для вторичного облака при свободном разливе.

При этом рассчитывают суммарное эквивалентное количество Q_3 по формуле

$$Q_2^3 = 20 K_4 K_5 \sum_{i=1}^n K_{2i} K_{3i} K_{6i} K_{7i} Q_i / d_i, \quad (11.26)$$

где K_{2i} — коэффициент, зависящий от физико-химических свойств i -го СДЯВ; K_{3i} — коэффициент, равный отношению поражающей токсодозы хлора к поражающей токсодозе i -го СДЯВ; K_{6i} — коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после разрушения объекта; K_{7i} — поправка на температуру для i -го СДЯВ; Q_i — запасы i -того СДЯВ на объекте, т; d_i — плотность i -го СДЯВ, г/м³.

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|
| Скорость ветра, м/с.... | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| K_4 | 1 | 1,33 | 1,67 | 2,0 | 2,34 | 2,67 | 3,0 | 3,34 | 3,67 | 4,0 |

Определение глубины зоны заражения

Основной задачей прогнозирования является расчет глубины распространения первичного и вторичного облака зараженного воздуха (рис. 11.5).

Первичное облако СДЯВ — образующееся в результате мгновенного (1—3 мин) перехода в атмосферу содержимого емкости со СДЯВ при ее разрушении.

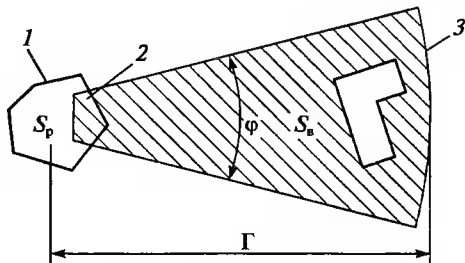


Рис. 11.5. Схема зоны химического заражения:

1 — производственная территория; 2 — объект заражения на производственной территории; 3 — объект заражения (населенный пункт); Г — глубина; φ — угловые размеры зоны заражения; $S_в$, $S_р$ — площади возможной зоны заражения и зоны разлива ВВ

Предельные глубины переноса воздушных масс за 4 ч при различной скорости ветра

| Состояние приземного слоя атмосферы | Скорость ветра, м/с | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Инверсия | 20 | 40 | 64 | 84 | — | — | — | — | — | — | — |
| Изотермия | 24 | 48 | 72 | 96 | 116 | 140 | 164 | 188 | 212 | 236 | 260 |
| Конвекция | 28 | 56 | 84 | 112 | — | — | — | — | — | — | — |

Примечание. При времени после начала аварии $\tau > 4$ ч полученную по табл. 11.6 глубину сравнивают с предельно возможным переносом воздушных масс $\Gamma_n = \tau v_n$, где v_n , км/ч, — скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха при данной скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха.

Вторичное облако — образующееся в результате испарения разлившегося вещества с подстилающей поверхности.

Максимальные значения глубин зон заражения первичным Γ_1 и вторичным Γ_2 облаком СДЯВ определяют по табл. 11.6 в зависимости от эквивалентного количества вещества и скорости ветра.

Полная глубина зоны заражения, км, от воздействия первичного и вторичного облаков СДЯВ

$$\Gamma = \Gamma_1^{\max} + 0,5 \Gamma_2^{\min}. \quad (11.27)$$

Полученное значение Γ сравнивают с приведенными в табл. 11.7 предельно возможными значениями глубин переноса воздушных масс, соответствующих разным скоростям ветра при 4-часовой продолжительности сохранения метеорологических условий. Окончательной расчетной глубиной зоны заражения при 4-часовой продолжительности сохранения метеорологических условий следует принимать меньшее из двух сравниваемых.

Определение площади зоны заражения

При прогнозировании химического заражения определяют площади зон возможного и фактического заражения.

Под зоной *возможного* заражения СДЯВ понимают территорию, в пределах которой под воздействием изменения направления ветра может перемещаться облако СДЯВ.

Площадь зоны возможного заражения первичным (вторичным) облаком ВВ (см. рис. 11.5) определяют по формуле

$$S_b = 8,72 \cdot 10^{-3} \Gamma^2 \varphi, \quad (11.28)$$

где S_b — площадь зоны возможного заражения СДЯВ, км²; Γ — глубина зоны заражения, км; φ — угловой размер зоны заражения, град.

Угловые размеры зон возможного заражения в зависимости от скорости ветра (v):

| | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-----|
| v , м/с..... | < 0,5 | 0,6—1 | 1,1—2 | > 2 |
| φ , град..... | 360 | 180 | 90 | 45 |

Зона *фактического* заражения СДЯВ — это территория, зараженная СДЯВ в опасных для жизни пределах. Площадь зоны *фактического* заражения

$$S_{\phi} = K_8 \Gamma^2 N^{0,2}, \quad (11.29)$$

где K_8 — коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха, равный 0,081 — при инверсии, 0,133 — при изотермии, 0,235 — при конвекции; N — время, прошедшее после начала аварии, ч.

Окончательной расчетной глубиной зоны заражения, под которой понимают оценку протяженности линии осевых (максимальных) концентраций в зоне, следует считать меньшее из двух сравниваемых значений.

Определение времени подхода зараженного воздуха к объекту

Время подхода облака зараженного воздуха к объекту (промышленному, жилому), расположенному на пути его движения, определяют по формуле

$$\tau_n = x/v_n, \quad (11.36)$$

где x — расстояние от источника заражения до объекта, км; v_n — скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха, км/ч.

Ниже приведены скорости переноса v_n переднего фронта облака зараженного воздуха, в зависимости от скорости ветра v и состояния вертикальной устойчивости воздуха:

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|----|----|----|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| v , м/с | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| | | | | | <i>Инверсия</i> | | | | | | | | |
| v_n , км/ч | 5 | 10 | 16 | 21 | | | | | | | | | |
| | | | | | <i>Изотермия</i> | | | | | | | | |
| v_n , км/ч | 6 | 12 | 18 | 24 | 29 | 35 | 41 | 47 | 53 | 59 | 65 | 71 | 76 |
| | | | | | <i>Конвекция</i> | | | | | | | | |
| v_n , км/ч | 7 | 14 | 21 | 28 | | | | | | | | | |

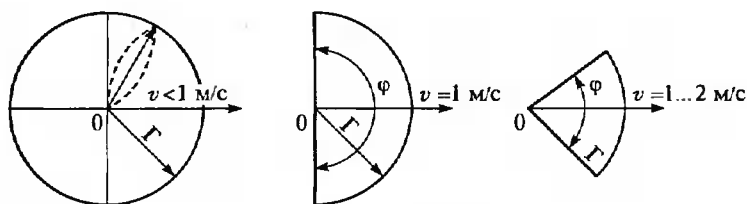


Рис. 11.6. Изображение зон возможного заражения ВВ:

Γ — полная глубина зоны заражения, км; φ — угловой размер зоны заражения, град; v — скорость ветра, м/с; 0 — источник заражения

Нанесение на карту (схему) зоны заражения

По рассчитанному значению глубины зоны возможного заражения и в зависимости от скорости на топографическую карту или схему наносят изображение зон возможного заражения (рис. 11.6).

При $v < 1$ м/с зона заражения имеет вид окружности с радиусом, равным глубине заражения с источником заражения в центре; при $v = 1$ м/с зона заражения имеет вид полукруга, $j = 180^\circ$; при $v = 1 \dots 2$ м/с зона заражения имеет вид сектора с центральным углом $\varphi = 90^\circ$;

при $v > 2$ м/с $\varphi = 45^\circ$.

Зона фактического заражения имеет форму эллипса и находится внутри зоны возможного заражения. Ввиду возможных перемещений облака СДЯВ под действием локальных изменений направления ветра фиксировать ее изображение на карте (схеме) нецелесообразно.

Вопросы жизнеобеспечения при чрезвычайных ситуациях должны решаться разными организационно-техническими способами, охватывающими согласованное взаимодействие нескольких региональных, местных и объектных органов. В большинстве развитых стран мира для первичного жизнеобеспечения пострадавших граждан созданы специальные службы (подразделения). В нашей стране для решения этой задачи при МЧС России создают мобильные комплексы жизнеобеспечения (МКЖ) пострадавшего населения в районах чрезвычайных ситуаций.

Список литературы

1. Федеральный закон «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 21.12.94 № 68-ФЗ.
2. Зюзин А. В., Семенов В. И. Защита производственного персонала и населения от сильнодействующих ядовитых веществ на химически опасных объектах. — М.: Мединор, 1994. — 240 с.

3. *Корсаков Г. А.* Комплексная оценка обстановки и управление предприятием в чрезвычайных ситуациях. — СПб.: ИПКРС, 1993. — 130 с.
4. *Протасов В. Ф., Молчанов А. В.* Экология, здоровье и природопользование в России. — М.: Финансы и статистика, 1995. — 528 с.
5. Защита населения и объектов народного хозяйства в чрезвычайных ситуациях / Под ред. М. И. Постника. — Минск: Універсітэцкае, 1997. — 278 с.
6. Постановление Правительства РФ «О декларации безопасности промышленного объекта Российской Федерации» от 1.07.95 № 675.
7. *Бондарь В. А., Попов Ю. П.* Риск, надежность и безопасность. Система понятий и обозначений // Безопасность труда в промышленности. — 1997. — № 10. — С. 39.
8. *Бондарь В. А., Попов Ю. П., Нишпал Г. А.* Классификация веществ по опасным свойствам. — М.: Изд-во МГАХМ, 1997. — 100 с.
9. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения / Под ред. Г. П. Демиденко. — Киев: Выща школа, 1989. — 287 с.
10. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. В 4-х кн. Кн. 1 / Под ред. К. Е. Кочеткова, В. А. Котляревского, А. В. Забегаева. — М.: АСВ, 1995. — 320 с.
11. *Архипова Н. И., Кульба В. В.* Управление в чрезвычайных ситуациях. — М.: Изд-во РГГУ, 1998. — 316 с.
12. *Журавлев В. П., Пушенко С. Л., Яковлев А. М.* Защита населения и территории в чрезвычайных ситуациях. — М.: АСВ, 1999. — 376 с.
13. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. — М.: Штаб ГО СССР: ГК СССР по гидрометеорологии, 1990. — 33 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение чрезвычайным ситуациям (ЧС). Какие классификации ЧС вы знаете?
2. В чем заключается оценка устойчивости инженерного объекта к воздействию ударной волны:
 - здания (сооружения);
 - технологического оборудования;
 - офисной техники и аппаратуры?
3. Какие пути повышения инженерной устойчивости промышленных объектов вам известны?
4. В каком случае разрушенный объект подлежит восстановлению?
5. Какие травмы (отравления) у человека возможны при взрывах оборудования на химических производствах?
6. Какие СДЯВ вы знаете? К каким классам ВВ они относятся?
7. Что такое ХОВ и АХОВ?
8. В чем заключается прогнозирование экологической обстановки при авариях на химически опасных объектах?
9. Назовите основные расчетные характеристики, используемые при анализе аварий со СДЯВ.

ПРИОРИТЕТНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОТВЕЧАЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

Рассмотрим результаты практического использования технологических и конструкторских разработок, приведенных в предыдущем материале. Реализация разработок представлена на основе блочно-модульного метода, позволяющего с минимальными затратами объединить в единый высокоэффективный комплекс с минимальными энерго- и ресурсозатратами.

Вновь созданные конструкции аппаратов, устройств для осуществления новых способов дозирования, смешения, смешения-измельчения, компактирования, стекловарения, газо- и водоочистки, переработки отходов, а также новые решения по защите от акустических, электромагнитных и радиоактивных излучений базируются на теоретических предпосылках и экспериментальных исследованиях. Основным подходом при изложении по-прежнему является *принцип системности*. В соответствии с ним каждый отдельный аппарат или технология рассматриваются как элемент динамической системы (см. гл. 2). Используя пример операторной модели производства стеклянного волокна (см. рис. 2.5), которую можно рассматривать как базовую схему для реализации в промышленности комплекса новых малоотходных и экологически чистых производств, а также выбора оптимальных режимов их функционирования, рассмотрим принципиально новые производственные технологии, отвечающие требованиям промышленной экологии.

12.1. Ресурсосберегающая техника силикатных производств

12.1.1. Новые способы обеспечения экологической безопасности промышленных отходов

В производстве стекла твердые отходы (стеклобой) могут достигать 50—70 %, а в производстве стеклянного волокна отходы составляют не менее 15—30 % от выпуска годной продукции. Задачи промышленной экологии, требования к малоотходным производствам и технологии стекловарения предопределили основные варианты рационального использования получаемых отходов, их специфические свойства (твердость, абразивность и др.) создают основные трудности повторного их использования в процессах стекловарения. Комплекс исследований позволил разработать оригинальные термические и механические варианты рекуперации отходов (рис. 12.1—12.4).

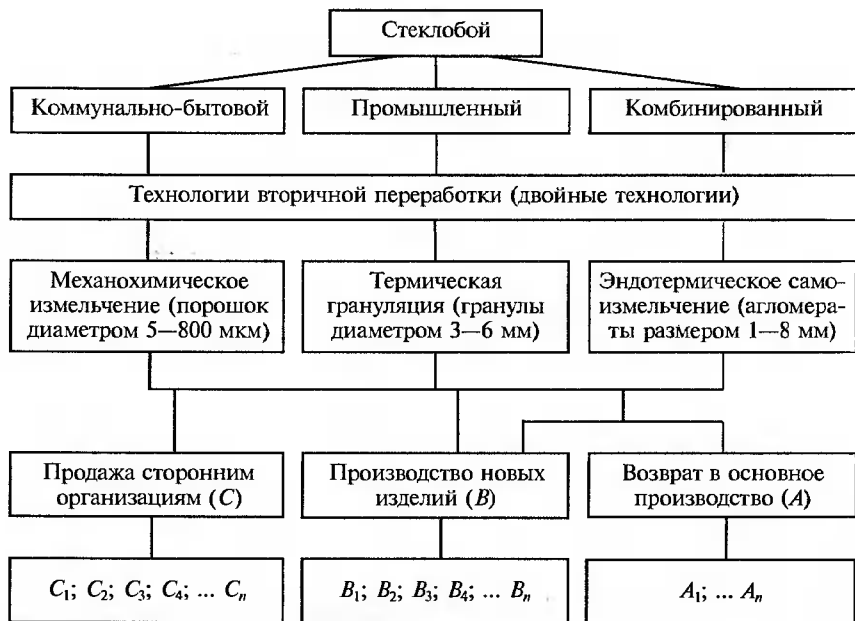


Рис. 12.1. Классификация способов и продуктов вторичной переработки стеклобоя (бытового, промышленного, комбинированного) в ХТС по принципу двойных технологий:

A_1 — сырье для стекловарения (подшихтовка); B_1 — микроизделия (микрошарики, микросферы, бисерные шарики); B_2 — декоративно-облицовочные материалы; B_3 — лакокрасочные и антикоррозионные композиции и мастики; B_4 — светоотражающие дорожные знаки и разметка щитов; C_1 — сырье для стекловарения; C_2 — сырье в качестве наполнителя противопожарных и противоожоговых кроватей, пластмасс, цементных растворов, дорожных материалов, аэродромных покрытий; C_3 — смазка для буровых установок; C_4 — абразив для струйной обработки (шлифовка, полировка, заточка металлических поверхностей); A_n, B_n, C_n — другое назначение

Способ рекуперации отходов стекловолокна *путем переплавки* при 1300°C в печи с двойным сводом (в нем теплообменник) в сочетании с эндотермической грануляцией позволяет получать гранулы стекла диаметром $2\text{--}4\text{ мм}$ (см. рис. 12.2). Оптимальные условия в объеме отходов и получаемом расплаве, минимальные потери при сгорании топлива и стабилизация химического состава стеклогранул позволили по сравнению с имеющимися решениями снизить расход топлива на $20\text{--}30\%$, повысить производительность в $2,5\text{--}3$ раза и значительно (с $3,5\text{--}4$ до $0,2\text{--}0,3\%$) снизить выбросы в окружающую среду соединений бора.

Способ рекуперации отходов стекловолокна *путем их механического измельчения* в сочетании с термообработкой при $450\text{--}830^\circ\text{C}$ в туннельной или барабанной печи и последующим резким охлаж-

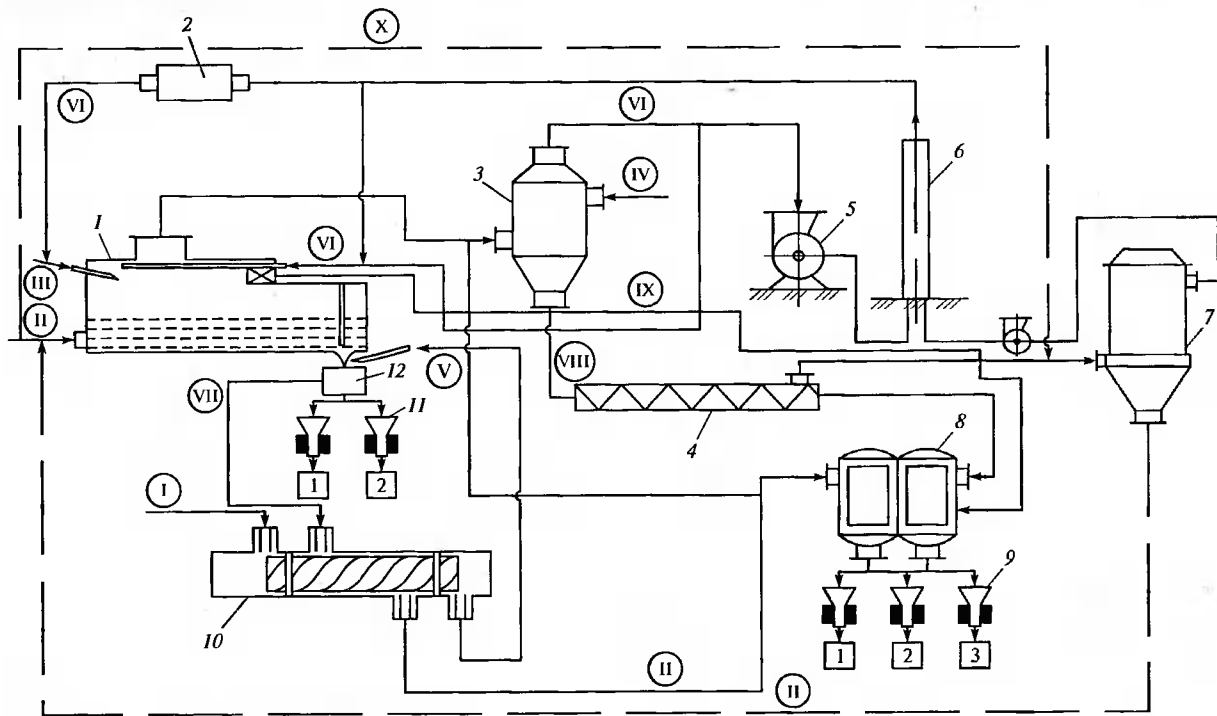


Рис. 12.2. Химико-технологическая схема переплавки и термогрануляции стеклового боя:

1 — термический реактор; 2 — ресивер; 3 — абсорбер; 4 — винтовой питатель; 5 — вентилятор; 6 — выхлопная труба; 7 — рукавный фильтр; 8 — распылительная сушилка; 9, 11 — вибрационные питатели; 10 — мембранный аппарат; 12 — гранулятор. Расходные потоки: вода промывочная (I); осветленная (V); сточная (VI); отходы стекла (II); топливо (III); известковое молоко (IV); воздух (VII); шлам (VIII); горячие газы (X); пыль стеклянная (XI)

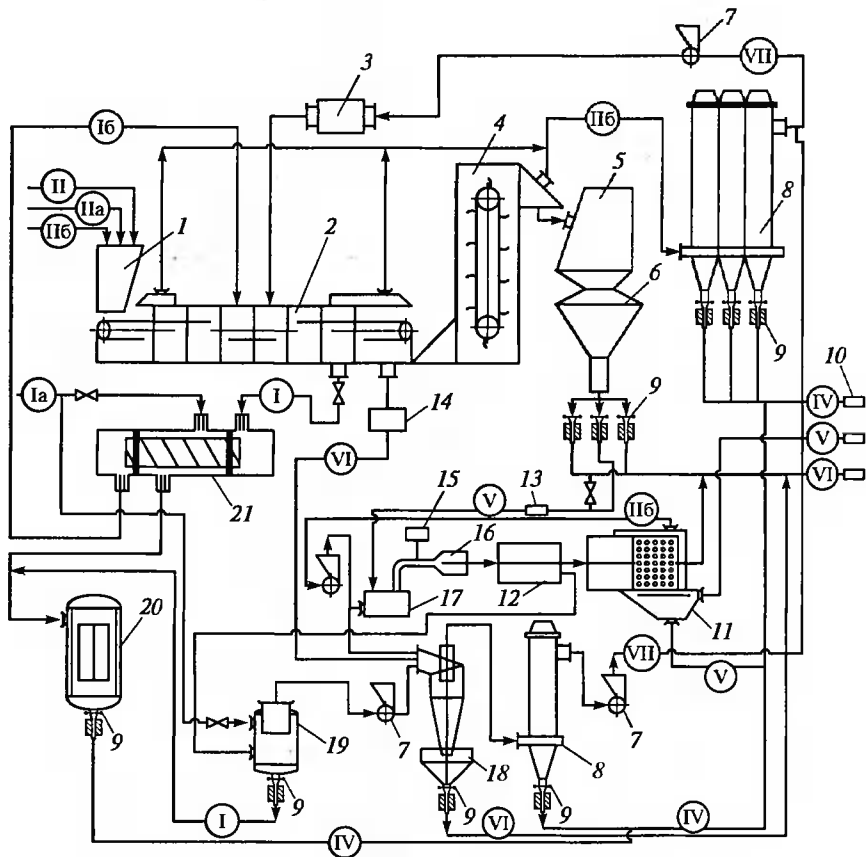


Рис. 12.3. Химико-технологическая схема эндотермического измельчения стеклового боя (с получением бисерных шариков):

1 — расходный бункер загрузчик; 2 — печь-транспортер; 3 — ресивер; 4 — элеватор; 5 — бункер-накопитель; 6 — бункер-разгрузитель; 7 — вентилятор; 8 — рукавный фильтр; 9 — вибрационный питатель; 10 — сборник продукции; 11 — классификатор; 12 — камера формования; 13 — сфероллизатор; 14 — конвективная сушка; 15 — газораспределительное устройство; 16 — горелка; 17 — бункер-распределитель; 18 — циклон-сепаратор; 19 — скруббер; 20 — распылительная сушилка; 21 — мембранный аппарат. Потoki: вода с частицами стекла (I); техническая (Ia); обратная (I6); бой белый (II); коричневый (IIa); зеленый (IIб); стеклянная пыль (III); порошок (IV); гранулы (V); агломераты (VI)

дением позволяет получить стеклопорошок с максимальным размером 0,8 — 1,0 мм (см. рис. 12.3). Процесс предусматривает также использование ВМР в виде стеклобоя, оказывающего эффект дополнительного измельчения отходов (см. рис. 12.4).

С учетом приблизительно одинаковой себестоимости ВМР за критерий применимости в промышленности того или иного спо-

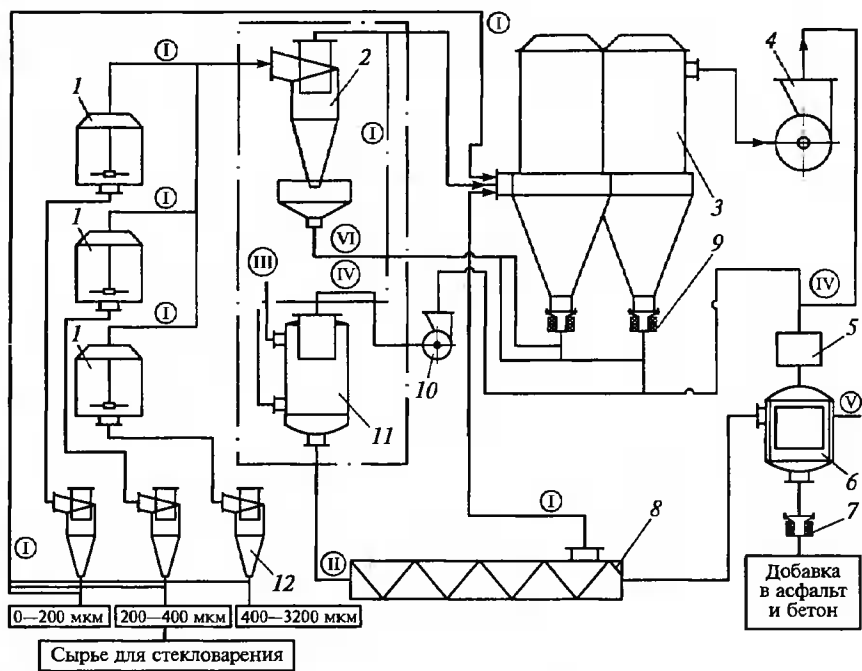


Рис. 12.4. Химико-технологическая схема механического измельчения стеклового боя:

1 — дробилки; 2 — циклон; 3 — рукавный фильтр; 4, 10 — вентилятор; 5 — ресивер; 6 — сушилка; 7, 9 — вибрационные питатели; 8 — винтовой питатели; 11 — скруббер; 12 — циклоны-дозаторы. Расходные потоки: стеклянная пыль (I); шлам (II); вода (III); воздух (IV); тепло (V); отходы стекла (VI)

соба рекуперации параллельно с эколого-экономическим критерием принят показатель стабильности (иногда целенаправленного изменения) энергетического состояния поверхности (структурных превращений) переработанных отходов. Показано, что переплавка отходов, кроме технических преимуществ, позволяет переводить структуру ВМР в состояние, легко сочетающееся с итоговой структурой расплава в ванне основной стекловаренной печи. Экономия минерального сырья (шихты) при использовании в стекловарении специально подготовленных отходов ВМР составляет 30 — 45 % [1 — 3].

Выявление и систематизация особенностей разных отраслей промышленности позволили разработать комплекс технологических мероприятий, направленных на повышение эффективности и создание экологически чистых технологий.

Задача состояла в замене рядовых (традиционных) технологий с коэффициентом экологического действия безотходности —

$K_{э.д.} < 0,80 - 0,90$ на малоотходные ресурсосберегающие (0,80 ... 0,90 $\leq K_{э.д.} \leq 0,90$... 0,97). Метод решения заключался в создании замкнутых химико-технологических систем (ХТС) на базе технико-экономического обоснования рециклинга получаемых отходов, полуфабрикатов и готовых изделий.

В соответствии с этим все исследования системы рециклинга включают двойные технологии, разбитые на отдельные подсистемы.

На примере типового завода по производству стеклянного волокна (по полной схеме) предложена принципиально новая ресурсо- и энергосберегающая ХТС, основанная на базе двойных технологий.

На *первом этапе* — «Возврат в основное производство» — приоритетное место отдано 100%-му повторному использованию твердых и мягких отходов стеклянного волокна (нитей) в качестве исходного компонента шихты: а) предварительно измельченные в порошок твердые отходы добавляются непосредственно в смеситель многокомпонентных полидисперсных стекольных шихт (МПСШ); б) мягкие отходы (нити) добавляются в шихту в процессе ее компактирования.

На *втором этапе* — «Производство новых изделий» — стеклянные нити или их ингредиенты используются как наполнители (часто являются заменителями дорогого сырья) высоконаполненных лакокрасочных, строительных и других композиций и материалов.

На *третьем этапе* — «Продажа сторонним организациям» — осуществляется маркетинг готовых изделий, товаров (материалов) из отходов, специально подготовленных отходов (для других стекольных заводов, смежных отраслей и т.п.), ведется поиск инвестиций. В качестве конкретного примера частного решения, например, второго этапа поставленной задачи приведены физико-химические характеристики полученных новых лакокрасочных материалов на основе отходов стеклянного волокна (табл. 12.1). Ниже приведены некоторые результаты исследований по определению возможности использования отходов содового производства, обогащения фосфоритов и получения электродного кокса, производства и потребления серной кислоты, формовочных (горелых) песков, зол, эмульсионного замазливателя и сточных вод установок пылегазоочистки в качестве вторичных материальных ресурсов — новых видов комплексного сырья для стекловарения.

В производстве кальцинированной соды по аммиачному способу на 1 т продукта приходится: шлам от очистки рассола — 0,1 м³; недопал при обжиге известняка или мела, отделяемый в процессе получения известковой суспензии, — 0,1 м³; дистиллерная жидкость — 9,1 м³. В производстве каустической соды известковым способом на 1 т продукта с отбросами теряется около 60 кг 85%-й извести, 101 кг известняка и 6 кг соды.

Показательная рецептура отечественной латексной воднодисперсионной краски

| Основные ингредиенты (компоненты) | Состав | |
|---|----------------------|--|
| | обычный (рядовой) | ресурсосберегающий экологически чистый (МГУИЭ) |
| Карбоксилметилцеллюлоза | + | + |
| Титановые белила | + | - |
| Известковая мука или мел | + | - |
| Каолин | + | + |
| Антивспениватель | + | - |
| Стабилизатор | + | - |
| Сурик | + | + |
| Пигмент красящий | + | - |
| Наполнитель стекловидный комплексный | - | + |

Исследования по использованию осветленной дистиллерной жидкости и шлама дистиллерной жидкости в качестве связующего (модификатора) проводились при подготовке шихты для щелочного тарного стекла. В шихту вводили 14—29 масс. %, дистиллерной жидкости или шлама. Лабораторная варка стекол показала, что температура варки стекла при введении в шихту дистиллерной жидкости снижается на 50—70 °С. При этом экономия сырьевых материалов шихты составляет 22—35 %.

Шлам отделения получения известковой суспензии и шлам производства каустической соды использованы в качестве кальцийсодержащего сырья (17 масс. %) шихты для выработки строительного стекла. При температуре варки 1460 °С получено однородное прозрачное стекло без непроваров и свилей [3].

Формовочные (горелые) пески представляют крупнотоннажный отход литейного производства, основные компоненты которого: SiO₂ (80—85 масс. %), CaO (5—7 %), Al₂O₃ (4—6 %), традиционно используются в стекловарении. Формовочные пески в литейном производстве подвергаются тщательному химическому и гранулометрическому контролю. За счет этого отработанные (горелые) пески также характеризуются стабильностью состава. Данные обстоятельства позволяют рекомендовать горелые пески в качестве основного компонента стекольных шихт.

В лабораторных условиях проведены опытные варки стекольной шихты следующего состава: 76 % горелого песка и 24 % кальцинированной соды. При этом расчетный состав получаемого тарного стекла был следующим, масс. %: 69,8 SiO_2 ; 16,4 Na_2O ; 5,6 CaO ; 4,3 Al_2O_3 ; 2,8 Fe_2O_3 ; 0,8 MgO ; 0,3 TiO_2 . Температура варки стекла 1450 °С, время — 1,5 ч. В результате получено прозрачное зеленое из-за наличия в исходной шихте соединений железа однородное стекло без видимых пузырей и свилей [3, 4].

Использование горелых песков позволит сэкономить 70—80 % сырья, используемого при приготовлении стекольных шихт, снизить затраты на захоронение неиспользуемых отработанных формовочных смесей, а при их стабильном составе — и упростить процесс подготовки шихты за счет исключения сушки, помола, усреднения и смешения компонентов шихты.

Разработан способ подготовки и состав стекольной шихты, рецептура которой базируется на безвозвратных отходах производств основной химии и ТЭК — топливо-энергетического комплекса, масс. %: зола 42,86—60,83; отход обогащения фосфоритов 32,13—46,02; отход производства электродного кокса 1,77—3,05; кальцинированная сода (или отходы ее производства) 4,18—7,58; оксид цинка 0,01—1,77. Исходные компоненты увлажняют до 5,9—10 масс. %, технической водой, подогретой до 60—70 °С, перемешивают до получения однородной массы и компактируют при 20—150 МПа. Высокая плотность и прочность получаемых плиток шихты позволяют резко снизить пыление при транспортных операциях, обеспечивают длительное хранение без расслоения и снижение расхода топлива на ее плавление [5].

Необходимо отметить и другие новые ресурсосберегающие технологии по использованию новых видов комплексного сырья для стекловарения на базе отходов основного производства в качестве вторичных материальных ресурсов: 0,3—10%-я водная эмульсия замасливателя для стекловолокна в количестве 5—20 %; сточные воды установок пылеочистки с жесткостью более 11—480 (мг-экв.)/л и $\text{pH} > 4,3$ (для щелочных стекол); водные растворы H_2SO_4 концентрации 10—70 % в количестве 1—20 %. Образующийся при получении криолита отход кремнегеля, содержащий в сухом веществе до 90 % оксида кремния, при добавлении соды может быть применен для варки прозрачных стекол при 1350 °С с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. Наряду с этим была доказана возможность использования для варки (1,5 ч при 1500 °С) молочных стекол смеси фосфоритов — отхода производства экстракционной фосфорной кислоты с кварцевым песком и содой.

Таким образом, приоритетность рассмотренных трех этапов определяется их экологической и экономической оценкой в рамках созданной замкнутой ХТС-основного производства и его подсистем: смежных отраслей, коммунально-бытового хозяйства, сер-

виса и др. Например, только экономия минерального сырья (борной кислоты, плавикового шпата и др.) в процессе стекловарения при использовании специально подготовленных отходов достигает 45 %, а выбросы (сбросы) вредных веществ в биосферу снижаются в 10—20 раз, твердые отходы отсутствуют полностью, конструкторско-технологические варианты оформления экологически безопасных и ресурсосберегающих производств прошли всестороннюю апробацию, реализованы на ряде предприятий и рекомендуются для широкого использования в производстве стекла и других отраслях.

Например, в составе бытовых твердых отходов, городского мусора, стекло по объему занимает третье место (12 %) после бумаги и пищевых отходов.

Проблемой массового повторного использования стеклобоя (промышленного и бытового) является его твердость, прочность, необходимость сортировки по цвету и химическому составу, а также высокая энергоемкость вторичной переработки. Кроме того, стекло практически не разлагается, поэтому рассчитывать на его естественную утилизацию нельзя.

Массовый переход изготовителей пищевых продуктов и напитков на оригинальную одноразовую стеклянную тару еще больше обостряет экологические проблемы крупных городов (в 1998 г. общий объем отходов стекла по Москве составил ~ 160 тыс. т, лишь треть была переработана) [7, 8].

В качестве потребителя ВМР может рассматриваться любая технология, представленная на рис. 12.1. Образующая на стадии эндоизмельчения смесь (в случае воды как хладагента), состоящая из воды и частиц стекла, направляется для очистки на мембранную установку, где происходит разделение стеклянной пыли и воды. Выделенные таким образом частицы стекла направляются в сушилку и распределяются по потребителям, а очищенная вода вновь может использоваться в печи для охлаждения боя. Запыленные пылегазовые потоки проходят через очистную систему, основным в которой является рукавный фильтр, обеспечивающий требуемую степень очистки выбросов по стеклянной пыли. Таким образом, достигается полная замкнутость материальных потоков (товарная продукция, вторичные отходы в жидком, твердом и газообразном состояниях), а предложенная ХТС отвечает всем требованиям экологической безопасности.

Следовательно, предлагаемые технологии и оборудование для утилизации стеклобоя перспективны как для силикатных производств, так и для предприятий, перерабатывающих и использующих ВМР. Применение того или иного способа переработки, в первую очередь, определяется целью утилизации, экологической и экономической целесообразностью и возможностью создания замкнутых ХТС-модулей [9].

Основные технические характеристики микроизделий

| Шарики | Полые сферы |
|---|---|
| Плотность 2,50—2,55 г/см ³ | Плотность 0,24—0,40 г/см ³ |
| Состав стекла: натрий-кальцийсиликатный, боросиликатный и др. | Кажущаяся плотность 0,11—0,35 г/см ³ |
| Показатель преломления 1,52—1,54 | Коэффициенты заполнения объема (КЗО) 55—64 |
| Твердость (по Моосу) 5—6 ед. | Плавуемость > 92 % |
| Температура размягчения 650—730 °С | Изостатическая прочность 5—10 МПа |

Например, полученные по первым трем технологиям порошки и гранулы перерабатывают в камере-формователе в уникальные микроизделия с низкой себестоимостью по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами, так как не требуется подготовки специальных компонентов и стекломассы: светоотражающих шариков диаметром до 650 мкм и пустотелых сфер — до 200 мкм (табл. 12.2). На базе полученных микроизделий разработаны лакокрасочные и антикоррозионные покрытия, светоотражающие мастики и специальная термоизоляция, выпуск которых налажен на российских предприятиях. Перспективно использование микроизделий в качестве абразивного материала для автомобилестроения и наполнителя лечебно-ожоговых и противопролежневых кроватей.

На рис. 12.5 изображена схема аппаратурного оформления технологической линии получения стеклянных микрошариков [9—11].

В состав основного оборудования для получения микрошариков входят измельчитель стеклогранулята со встроенным воздушно-механическим классификатором 1, сепаратор-циклон 2 для отделения от потока воздуха измельченных частиц стекла, направляемых на формование микрошариков, рукавный фильтр 3 для отделения стеклянной пыли и очистки сбрасываемого воздуха в атмосферу, вентилятор 4, обеспечивающий газодинамический режим работы измельчителя и сепараторов, питатель 15, печь формования микрошариков 11, сепаратор-циклон 7 для отделения основной массы сферических частиц от газовоздушного потока, сепаратор 6 для выделения микрошариков маленького размера (менее 30 мкм), классификатор виброкипящего слоя 8 с тремя сепараторами 9, вентиляторы 5, 10 и 13, обеспечивающие газодинамические режимы работы соответственно печи формования и классификатора виброкипящего слоя.

Процесс изготовления стеклянных микрошариков осуществляется следующим образом. Исходный стеклогранулят (стеклобой) загружается в измельчитель с встроенным классификатором 1, в котором происходит его измельчение и предварительная классификация частиц стекла по размерам. Из классификатора порошок стекла потоком воздуха уносится в первый сепаратор 2, в бункере которого осуществляется сбор стеклопорошка, направляемого далее в печь формования. Поток воздуха после отделения основной массы частиц стекла в сепараторе 2 направляется в рукавный фильтр 3, в котором осуществляется эффективная очистка газозвудушного потока перед выбросом в атмосферу. Стеклянный порошок из бункера сепаратора 2 транспортируется в бункер питателя 15, из которого с помощью воздушного эжектора 14 поступает в пневмотранспортную систему 12. Транспортирование порошка в печь формования 11 осуществляется потоком сжатого воздуха, нагреваемого отходящими газами в спиральном теплообменнике, установленном в нижней части печи формования. Отформованные микрошарики охлаждаются в потоке газов за счет подсоса холодного атмосферного воздуха в верхней части печи формования. Отделение отформованных микрошариков от газо-

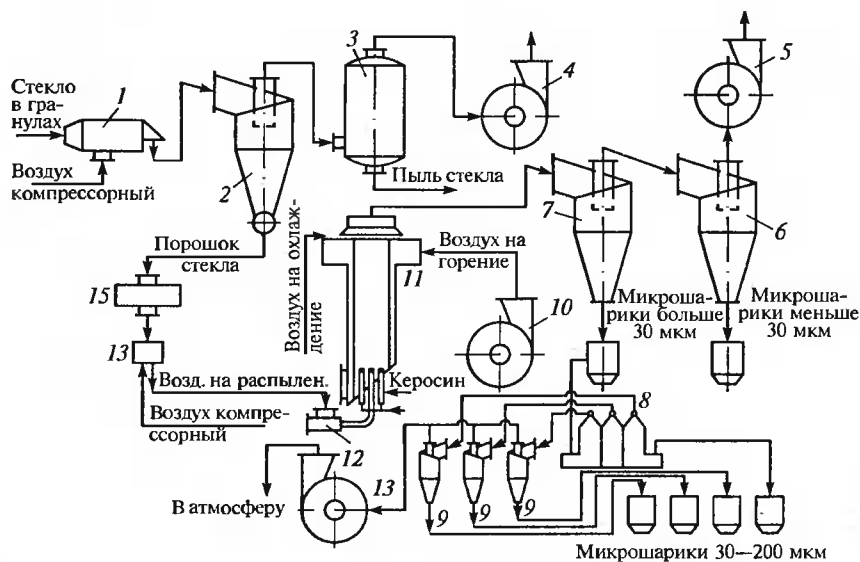


Рис. 12.5. Схема технологической линии получения стеклянных микрошариков:

1 — воздушно-механический классификатор; 2, 6, 7 — сепараторы-циклоны; 3 — фильтр; 4, 5, 10, 13 — вентиляторы; 8 — классификатор виброкипящего слоя; 9 — сепараторы; 11 — печь формования микрошариков; 12 — пневмотранспортная система; 14 — эжектор воздуха; 15 — питатель

Сравнительные показатели микроизделий — стеклошариков (СШ) и микросфер (МС)

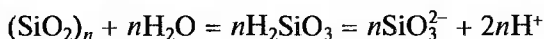
| Показатель | Предлагаемый вариант [3, 11] | | АО «Пульс» («Хим- лабприбор»), г. Клин | АО «Новгородский завод стекловолокна» | Potters Industries Inc. (США) |
|---------------------------------------|---|-----------|---|--|----------------------------------|
| | СШ | МС | | | |
| Размеры частиц, мкм | СШ | МС | СШ | МС | СШ |
| Плотность, г/см ³ | 40—600 | 10—200 | 300—700 | 50—120 | 40—150 |
| Прочность, МПа | 2,5—2,55 | 0,24—0,40 | 2,5 | 0,35—0,52 | 2,5 |
| Плавучесть, % | — | > (5—10) | — | > (3—7) | — |
| Светоотражение, % | 78—82 | 80—83 | 67—69 | — | 87—91 |
| Твердость, ед. (по Моосу) | 5—6 | — | 4—5 | — | — |
| Температура размягчения, °С | 650—730 | 650—730 | 530—580 | | 660—680 |
| Стекло | Алюмоборосиликатное | | Боросиликатное | Натрийкальций силикатное | — |
| Исходное сырье | Промышленные и бы- товые отходы стекла | | ленная стекломасса | Специально подго- товленный раствор | — |
| Разброс по размерам, % | ± 4—6 | ± 7—9 | ± 30—35 | ± 40—50 | 7—9 |
| Стоимость, долл./кг | 4 | 5 | 7,2—8,5 | 12—15 | 6—7,5 |
| Производительность установки, кг/ч | 100 | 75 | 30 | 40—45 | — |

воздушного потока осуществляется последовательно в первом сепараторе 7 и втором сепараторе 6, причем во втором сепараторе происходит выделение наиболее мелких частиц. Стекланные микрошарики, собранные в бункере сепаратора 7, транспортируются в классификатор виброкипящего слоя 8, где происходит разделение всей массы частиц по размерам на отдельные фракции, улавливаемые в сепараторах 9. Газодинамический режим работы установки формования и классификатора микрошариков по размерам обеспечивается работой хвостовых вентиляторов 5 и 13.

Таким образом, рекуперация отходов стекла и стеклянного волокна имеет большое значение для окружающей среды, экономии сырьевых материалов и энергии (табл. 12.3). Целесообразность применения того или иного способа рекуперации определяется в первую очередь возможностью направленной их переработки в качестве сырья для основного производства и создания замкнутых химико-технологических систем (модулей) с использованием вторичных материальных ресурсов.

12.1.2. Компактирование стекольной шихты

Процесс компактирования стекольных шихт по универсальной технологической схеме (см. рис. 3.6) сопровождается механическим измельчением отдельных ее компонентов. Образуются новые поверхности со специфическими центрами с преобладанием ионов O^{2-} . Вследствие гидролиза на поверхности таких компонентов, например у кварцевого песка, также появляются отрицательные заряды по схеме



Этот механизм обуславливает протекание на поверхности частиц шихты обменных химических и твердофазных реакций (ОХР и ТФР) с присоединением положительно заряженных остальных компонентов. Растет плотность и прочность плиток, а следовательно, и производительность процессов компактирования и стекловарения.

Характеристика компактированной плиток шихты

| | |
|--|---------|
| 1. Свежеприготовленных в зимних условиях (при $-20^\circ C$): | |
| плотность, кг/м ³ | 1920 |
| насыпная масса, кг/м ³ | 860 |
| прочность, МПа: | |
| на растяжение | 0,5—0,8 |
| на сжатие | 1,0—1,5 |
| влажность, % | 6—8 |
| 2. После 5 сут хранения (при $+20^\circ C$): | |
| прочность, МПа: | |
| на растяжение | 2,5 |
| на сжатие | 4,8 |

| | |
|---|-------|
| влажность, % | 5—7 |
| 3. Распределение плиток шихты по размерам, %: | |
| 50×80×(4...6) мм | 6—10 |
| 32×25×(4...6) мм | 60—75 |
| менее 35×25×(4...6) мм | 18—34 |

*Технологические варианты способа компактирования
(на примере шихт для стекол медицинского
и светотехнического назначения)*

| Шихта | АБ-1 | НС-3 | ХТ-1 | НС-2 | ОС | НС-2А |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| Влажность, %: | | | | | | |
| начальная | 3,4 | 3,3 | 4,3 | 3,6 | 2,1 | 2,6 |
| перед компактированием | 6,3 | 5,2 | 6,8 | 8,4 | 4,1 | 5,6 |
| Количество просыпи, % | 35 | 3 | 15 | 20 | 20 | 23 |
| Плитки: | | | | | | |
| толщина, мм | 2,3 | 2,0 | 2,0 | 2,4 | 2,1 | 2,5 |
| характерный размер, мм | 19 | 14 | 28 | 20 | 22 | 33 |
| влажность, % | 4,0 | 3,4 | 6,3 | 5,9 | 3,6 | 4,8 |
| Прочность на сжатие, МПа | 0,7 | 1,6 | 2,9 | 1,7 | 1,4 | 2,6 |
| Плотность, кг/м ³ | 1450 | 1570 | 1727 | 1870 | 1900 | 1770 |
| Давление компактирования, МПа | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 |
| Ускорение процесса варки, % | 30 | 30 | 20 | 10 | 15 | 20 |

Отсутствие стадий увлажнения шихты специальным связующим, ввода пара для подогрева и сушки плиток или ленты, а также простота конструкции пресса в сравнении с другими методами уплотнения ПМ значительно повышают плотность плиток и снижают разброс по плотности при повышении качества стекла.

Технико-экономический эффект от использования разработанного способа подготовки шихт — увеличение производительности компактирования в 1,2—1,5 раза, а стекловарения — на 23—40 %. Летучесть (безвозвратные потери) щелочных соединений и варке шихты уменьшилась на 1,6—5,3 %, запыленность атмосферы снизилась в 2,4—7,5 раза. Одновременно снижился расход топлива в среднем на 20 %. Выход годной продукции увеличился на 5—7 %. Неоднородность стекломассы уменьшилась с 15—18 до 12 нм.

12.2. Фильтровальная техника защиты биосферы от промышленных выбросов

В технических решениях по интенсификации малоотходных процессов порошковых технологий, как правило, предусматриваются аспирационные устройства, снижающие остаточное количество вредных выбросов до ПДК. С учетом планируемого роста объемов производства и соответствующего увеличения безвозвратных потерь ценных компонентов со шламом и сточными водами за основу производства принят *сухой способ очистки пылегазовых потоков* технологического оборудования.

Стекольное производство

По результатам промышленных исследований режимов фильтрования пылегазовых потоков в линиях измельчения карбонатного сырья и кварцевого песка разработан способ очистки и устройства для его реализации — фильтры рукавные низкотемпературного — до 100 °С: ФРИ-30 (60, 90) и высокотемпературного — до 350 °С: ФРИТ-30 (60, 90) исполнений, обеспечивающие снижение запыленности газов на выходе из аппарата до 0,20 мг/м³ при гидравлическом сопротивлении $\Delta P \leq 550$ Па. Конструкция бункерного фильтра ФРИД-15 (25, 40) для газовых потоков с входной запыленностью 500 г/м³ также обеспечивает выполнение требований промышленной экологии [3, 6, 9].

Технические показатели фильтра ФРИ-30Л растворимые (числитель) и по результатам испытаний (знаменатель)

| | |
|--|---------------------|
| Производительность (пропускная способность) по очищаемому газу, м ³ /ч, более | 3700/3770 |
| Степень очистки, %, более | 99,99/99,97 |
| Массовая концентрация веществ в газовых выбросах, г/м ³ , менее: | |
| на входе | 500/65 |
| на выходе | 0,02/0,018 |
| Гидравлическое сопротивление, кПа, менее | 3,0/1,06 |
| Разрежение очищаемого газа, кПа, менее | 8,0/1,76 |
| Температура очищаемого газа, °С, менее | 130/90 |
| Габаритные размеры, мм, менее | 2328×4770× ×1985 |
| Энергетические затраты на очистку 1000 м ³ /ч, кВт · ч, менее | 1,16/0,723 |
| Показатели надежности: | |
| установленная безотказная наработка, ч | 5000/5760 |
| показатель ремонтпригодности, ч | 36/8 |
| назначенный ресурс до капитального ремонта, г | 5/— |

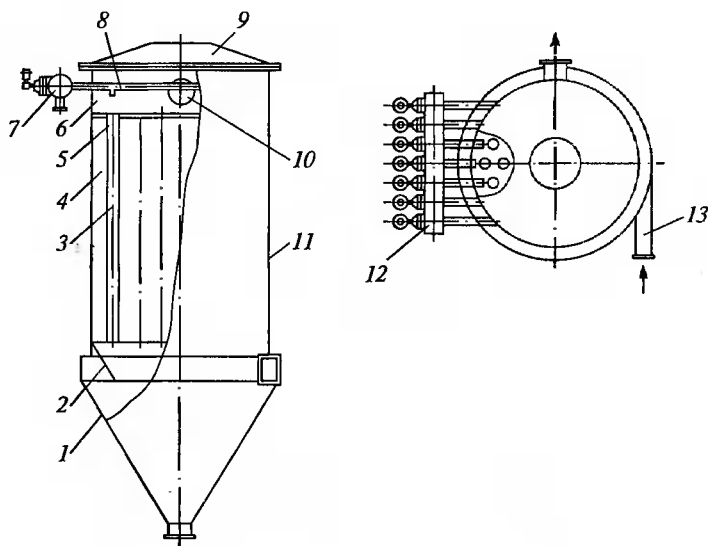


Рис. 12.6. Фильтр рукавный ФРИ-30:

1 — бункер; 2 — отражатель пыли; 3 — фильтровальный элемент; 4 — камера запыленного газа; 5 — рукавная решетка; 6 — камера очищенного газа; 7 — узел регенерации; 8 — раздающая труба; 9 — крышка; 10 — патрубок выхода газа; 11 — корпус; 12 — клапанная секция; 13 — патрубок ввода газа

Данные технические решения внедрены на ряде промышленных предприятий. На рис. 12.6 показан фильтр серии ФРИ конструкции НИИОГАЗ-МГУИЭ. Модульное исполнение устройства обеспечивает его применимость как в технологических линиях, так и в системе общей аспирации производственных помещений. Конструкция отличается высокой эффективностью и обеспечивает достижение ПДВ перерабатываемых ПМ.

Фильтр ФРИ-30Л работает в линии роторных (аэробильных) измельчителей карбонатного сырья. Способ промышленной реализации очистки пылегазовых выбросов в зависимости от режимов работы рукавных фильтров, химического и гранулометрического составов шихт и их ингредиентов заключается в следующем. Запыленный поток газа поступает в корпус фильтра, проходит через фильтрующие рукава, очищается от пыли и выбрасывается в атмосферу. Время работы одного ряда рукавов в режиме фильтрации за один цикл (2—5 мин) определяется продолжительностью продувки соседних рукавов и временем между продувками. Регенерируют рукава фильтра импульсной продувкой сжатым воздухом. По достижении гидравлического сопротивления 0,6—1,5 кПа и создания дополнительного фильтрующего пылевого слоя с относительной толщиной $h_{ф,с}/h_{тк} = 0,5 \dots 1,2$ проводят последовательно

импульсную продувку при отношении времени между регенерациями одного и того же ряда к времени между регенерациями соседних рядов $\tau_{м.р}/\tau_{с.р} = 20 \dots 50$. Период фильтрации должен составлять 1,5—6 мин, а удельная нагрузка по газу — 0,5—2,5 м³/(м²·мин). Из результатов заводских испытаний (на шихте для стекла *E* до (А) и после (Б) усовершенствования:

| | А | | Б | |
|---|------|------|------|------|
| Толщина ткани $h_{тк}$, мм | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Толщина фильтрующего (пылевого) слоя $h_{ф.с}$, мм | 1,8 | 1,8 | 2,4 | 2,8 |
| Относительная толщина слоя $h_{ф.с}/h_{тк}$ | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 1,4 |
| Гидравлическое сопротивление ΔP , кПа | 1,2 | 1,2 | 1,5 | 1,7 |
| Продолжительность фильтрации (межрегенерационный период) $\tau_{м.р}$, с | 2 | 3 | 5 | 6 |
| Продолжительность регенерации (средняя) одного ряда $\tau_{р.ср}$, с | 0,11 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
| $\tau_{м.р}/\tau_{р.ср}$ | 20 | 30 | 35 | 50 |
| Срок службы рукавов, мес | 5 | 8 | 8 | 7 |
| Эффективность очистки, % | 99,4 | 99,8 | 99,9 | 99,9 |

следует, что рекомендуемые режимы фильтрации способствуют увеличению срока службы рукавов на 30 %, а эффективность очистки растет с 99,4 до 99,9 %.

Гальваническое и травильное производства

Фильтр предназначен для санитарной очистки аспирационного воздуха от растворимых в воде аэрозольных частиц примесей в гальванических и травильных производствах машиностроительных предприятий.

Волокнистый фильтр ФВГ-М (рис. 12.7) в отличие от аналога ФВГГ имеет меньшие габариты, может очищать воздух как от аэрозолей кислот, так и от щелочей, прост в обслуживании (переснаряжается фильтрующей кассетой) [12].

Характеристики фильтров ФВГ

| | | | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Фильтр | М-0,37 | М-0,56 | М-0,74 | М-1,6 | М-3,2 |
| П, м ³ /ч | 5000 | 7000 | 10 000 | 20 000 | 40 000 |
| М, кг, ≤ | 30 | 50 | 56 | 70 | 105 |
| В×Н*, мм | 462×730 | 542×910 | 542×910 | 782×987 | 782×1485 |

Эффективность очистки 90—95 %, гидравлическое сопротивление фильтра 500—700 Па. Применение фильтров позволяет снизить выбросы в атмосферу токсичных веществ до норм ПДВ.

* У всех фильтров $L = 570$ мм.

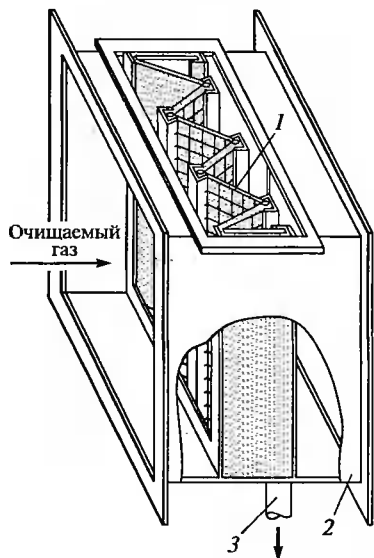


Рис. 12.7. Волокнистый фильтр ФВГ-М:

1 — фильтрующая кассета; 2 — корпус; 3 — штуцер гидрозатвора

Принцип работы фильтра заключается в следующем. Жидкие и твердые растворимые в воде аэрозольные частицы, содержащиеся в очищаемом газе, улавливаются волокнистой фильтрующей перегородкой. Уловленная жидкость стекает в нижнюю часть перегородки и выводится из аппарата через сливные штуцеры. Твердые частицы образуют осадок на фильтровальной перегородке, что приводит к возрастанию гидравлического сопротивления фильтра. При достижении определенной величины сопротивления производится промывка фильтрующего материала водой с обеих сторон. Промывные воды через сливные штуцеры выводятся на станцию нейтрализации. Возможна промывка фильтрующего элемента вне корпуса.

Фильтры изготавливаются в двух исполнениях. Одно применяется, когда в очищаемом воздухе содержатся жидкие частицы и требуется непрерывный вывод уловленной жидкости из корпуса аппарата, например, для таких операций, как хромирование, травление нержавеющей стали в серной кислоте и др. В случаях, когда улавливаемые частицы кристаллизуются в газоходе до фильтра или непосредственно на фильтрующей перегородке, возможно и применение фильтра в другом исполнении. В этом случае кассета промывается только вне корпуса, например, при серноокислотном никелировании, электрохимическом обезжиривании и др. Периодичность промывки зависит от концентрации улавливаемого продукта и составляет 15—30 сут.

Механосборочное, металлообрабатывающее и электродное производства

Фильтры ФРМ-1500 — ротационный масляный, ФВМ-10 — волокнистый масляный, ФВА-М-2000 — фильтровентиляционный агрегаты предназначены для очистки воздуха от жидких аэрозолей (СОЖ, масляного тумана и т.п.); могут использоваться в комплекте с холодновысадочными автоматами, фрезерными, токарными и другими металлообрабатывающими станками, а также в других производствах, где образуются жидкие аэрозоли; позволяют возвращать уловленные СОЖ и масла в технологический процесс.

Характеристики фильтров

| Фильтр | ФРМ-1500 | ФВА-М-2000 | ФВМ-10 |
|---|-------------------------|----------------|---------------------------|
| П (по очищаемому воздуху), м ³ /ч | 1500 | 2000 | 10000 |
| С (жидкого аэрозоля на входе в фильтр), мг/м ³ | 50 | 100 | 1000 |
| М, кг | ≤ 65 | ≤ 260 | ≤ 175 |
| Габаритные размеры, мм | $d = 700,$ $h = 700$ | 1065×1020×2000 | $d = 1100,$ $h = 1940$ |

Основные преимущества ФРМ-1500 — малые габариты и простота обслуживания; ФВА-М-2000 — высокая степень очистки; ФВМ — эффективное использование в вентиляционных системах для централизованной очистки воздуха при насыщенности оборудованием.

Агрегат для отсоса и улавливания пыли АОУМ-1000 предназначен для отсоса и очистки воздуха от абразивной пыли и других аэрозольных частиц сухих пылей в механосборочных, металлообрабатывающих, электродных и других производствах при концентрации пыли до 3 г/м³ и размере частиц более 3 мкм; позволяет возвращать очищенный воздух в цех с соблюдением санитарных норм.

Агрегат включает:

две ступени очистки: инерционный осадитель грубых частиц и ступень тонкой очистки от сухой пыли на рукавном фильтре с механическим отряхиванием;

бункер для сброса уловленной пыли с выгрузкой в контейнер; центробежный вентилятор типа ВЦ-14-46 с камерой шумоглушения.

Техническая характеристика АОУМ-1000

| | |
|---|----------------|
| Производительность, м ³ /г | 1000 |
| Разрежение во всасывающей патрубке, Па ... | 300 |
| Мощность электродвигателя, кВт | 1,5 |
| Число рукавов | 16 |
| Размеры рукавов, мм: | |
| диаметр | 120 |
| высота | 1000 |
| Степень очистки воздуха, % | 95 |
| Габаритные размеры, мм | 1000×1070×2100 |
| Масса, кг | 170 |

Преимущества агрегата АОУМ-1000 по сравнению с аналогичными аппаратами ЗИЛ-900 и ПА-218: более высокая степень очистки;

высокоэффективный механизм регенерации запыленных рукавов;

наличие приборов контроля за насыщением фильтра;

экономия тепла и электроэнергии за счет рециркуляции воздуха.

Лазерная и плазменная обработка металлов

Рекомендуется использовать фильтр складчатый кассетный ФСК для улавливания тонкодисперсных пылей, воздуха и газов от аэрозольных частиц сухих (в том числе свинцовых, селено-кадмиевых и табачных) при концентрации их в объеме до 50 мг/м^3 и размере частиц от $0,3 \text{ мкм}$.

Фильтры могут использоваться для очистки воздуха и газов при электро- и газосварке, лазерной и плазменной обработке металлов; при расसेве и упаковке порошков тонкого помола, их обжиге и спекании, а также в радиоэлектронной, медицинской, микробиологической и других отраслях промышленности.

ФСК характеризуются высокой (до 99,9 %) степенью очистки воздуха от вредных компонентов и обеспечивают возврат очищенного воздуха в цех при соблюдении санитарных норм; выпускаются производительностью $1000—2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ по очищаемым газам в стационарном (ФСК_{ст}) и передвижном (ФСК_{пв}) исполнении; по желанию заказчика оснащаются предфильтром большой пылеемкости и постфильтром (химкассетой) для очистки воздуха от вредных газовых компонентов.

В фильтрующей кассете пылеемкостью 250 г/м^3 может накапливаться до 5 кг пыли, после чего ее заменяют.

Производства с отходами в виде высокодисперсных твердых и жидких аэрозолей

Для очистки воздуха от сварочных, масляных и других высокодисперсных электронепроводящих аэрозолей при их концентрации до 200 мг/м^3 и размере частиц $\geq 0,001 \text{ мкм}$ рекомендуется использовать универсальные электростатические фильтры ЭФВА — передвижные автономные с вентиляторами и полноповоротными воздуховытяжными устройствами и стационарные производительностью от 1 до 40 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ очищаемого воздуха. Степень очистки воздуха от аэрозолей 93—99 %. Фильтрующие кассеты из алюминия легко регенерируются промывкой.

Технические характеристики фильтров ЭФВА

| | | | | | | |
|---|------|------|------|-------|-------|-------|
| Основные модификации | 1—02 | 2—03 | 4—05 | 10—07 | 20—09 | 40—11 |
| Производительность, тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, \leq | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 10,0 | 20,0 | 40,0 |

Габаритные размеры, мм:

| | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| длина | 1200 | 600 | 600 | 750 | 750 | 750 |
| высота | 1170 | 520 | 1000 | 1500 | 3000 | 3000 |
| ширина | 600 | 1000 | 1000 | 1500 | 1500 | 3000 |
| Масса, кг, ≤ | 115 | 75 | 150 | 325 | 650 | 1300 |

Основные преимущества: низкие эксплуатационные затраты, малые габариты и аэродинамическое сопротивление, способность улавливать высокодисперсные твердые и жидкие аэрозоли.

12.3. Получение газообразного топлива (пирогаза) из твердых отходов

Получение газообразного топлива из углей, а также из твердых веществ, включающих как органическую, так и неорганическую составляющую (в том числе из промышленных, радиоактивных и бытовых отходов) — в настоящее время актуальная задача. Получаемые горючие газы (пирогаз) могут быть использованы в энергетических (для газовых турбин и котельных установок) и в технологических (производство целевых продуктов) целях.

Одним из возможных путей газификации твердых органических веществ является использование шахтных реакторов. При этом в некоторых случаях представляет интерес жидкое шлакоудаление, позволяющее использовать получаемый экологически чистый шлак для производства строительных материалов.

Такой процесс требует газообразного окислителя, в качестве которого могут выступать кислород, воздух и водяной пар. Причем для получения высококалорийного газа количество воздуха должно быть минимальным ввиду значительной концентрации в нем азота. Для обеспечения жидкого шлакоудаления и поддержания температурного уровня процесса, целесообразно иметь повышенную температуру в окислительном дутье.

В этой связи возможным вариантом такого процесса является использование *электродугового плазмотрона* для нагрева воздуха. Это позволяет, с одной стороны, обеспечить необходимую энергию для плавления неорганической части сырья, а с другой — поддерживать требуемый температурный уровень процесса при не очень больших расходах воздуха. Наиболее перспективно использовать этот процесс для газификации остекловывания бытовых и промышленных отходов. В этом случае использование плазмотрона позволяет поддерживать жидкое шлакоудаление при наличии практически любых органических включений (и получать экологически чистый шлак, пригодный для изготовления стройматериалов). Кроме того, при наличии в отходах хлора восстановительная среда, образующаяся в процессе газификации, предотв-

ращает образование диоксинов. Преимуществом этого процесса является также существенно меньшее количество подлежащих очистке газов (по сравнению с процессом сжигания отходов). При этом теплотворная способность получаемых горючих газов позво-

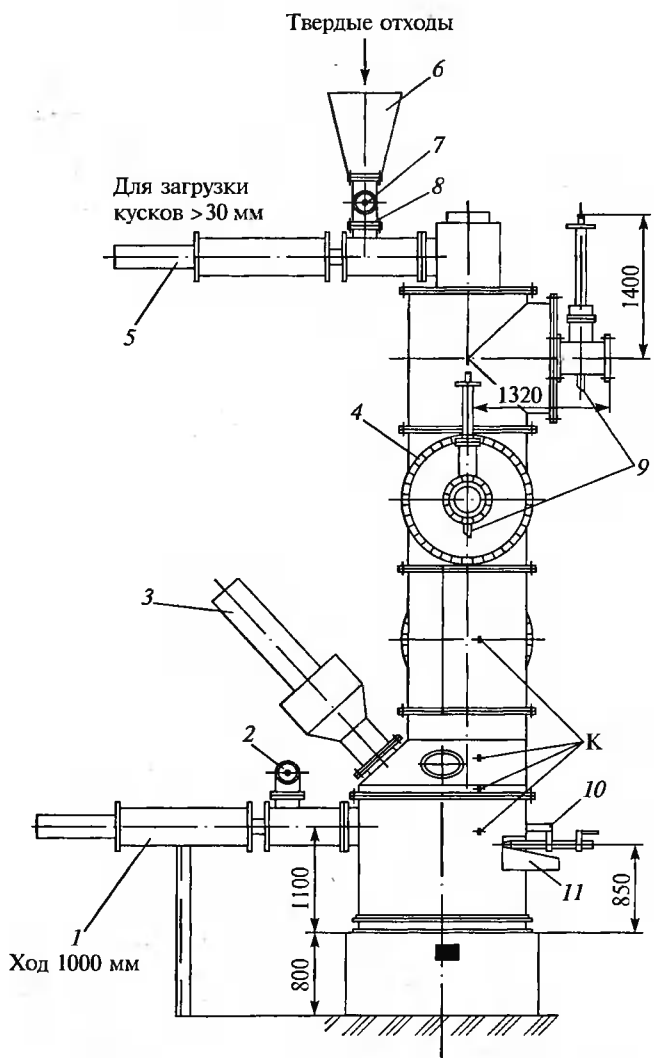


Рис. 12.8. Установка термического обезвреживания (пиролиз — газификация):

- 1, 5 — гидроцилиндры; 2 — загрузчик; 3 — плазматрон; 4 — задвижка; 6 — бункер; 7 — питатель; 8 — взрывной клапан; 9 — подвод сжатого воздуха для охлаждения ($D_y = 20$); 10 — запорные устройства; 11 — выпускной лоток; К — контрольные точки

ляет во многих случаях получать такое количество энергии, которое не только компенсирует затраты энергии в плазмотроне, но может отпускаться внешним потребителям (особенно при использовании современных газотурбинных установок с высоким КПД).

Технологическая схема комплекса может быть организована по двум принципиально различным вариантам. *Первый* предусматривает сжигание пирогаза (а также содержащихся в нем смол и пыли) непосредственно после шахтной печи. *Второй*, необходимый для использования горючих газов в газовой турбине, требует предварительной очистки пирогаза с использованием скрубберов («мокрая» очистка). В этом случае смола и шламы, отделяемые в системе очистки, должны быть возвращены в печь пиролиза.

Предлагаемый плазмохимический реактор (рис. 12.8) пиролиза — газификации твердых отходов производительностью 60 кг/ч является частью технологической схемы (рис. 12.9), предусматривающей не только утилизацию твердых отходов, но и получение электроэнергии, необходимой для процесса пиролиза, а также дополнительной электроэнергии (разработчик — МГУИЭ).

Твердые отходы — неуплотненная масса из бумаги, дерева, текстиля, стекла, металла, пластиков, резины и материалов органического происхождения.

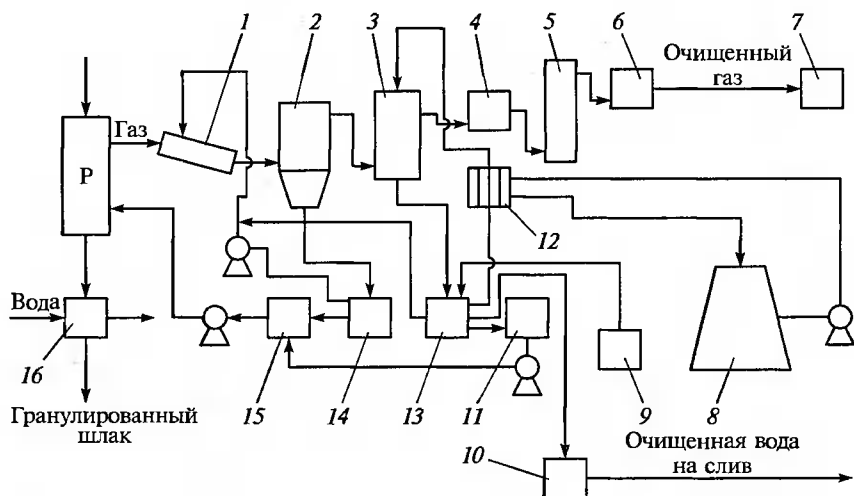


Рис. 12.9. Технологическая схема получения газообразного топлива (пирогаза) из твердых отходов:

Р — реактор; 1 — газосборник; 2 — сепаратор; 3 — скруббер; 4 — эксгаустер; 5 — электрофильтр; 6 — газгольдер; 7 — газовая турбина; 8 — градирня; 9 — емкость с щелочью; 10 — биохимическая очистка; 11, 15 — промежуточные сборники; 12 — трубчатый холодильник; 13, 14 — отстойники; 16 — приемник шлака

В качестве источника энергии используется электродуговой воздушный плазмотрон ПВ-85, предназначенный для нагрева воздуха до высоких температур с целью получения теплоносителя или высокотемпературного реагента.

Процесс происходит в печи шахтного типа. В нижней части печи расположен плазмотрон, который плавит минеральную часть отходов. Сюда же подается воздух и водяной пар. Отходы загружаются в верхнюю часть печи. Под действием собственного веса они проходят последовательно зоны сушки, пиролиза и газификации. Тепловая энергия, необходимая для проведения процесса генерируется в нижней зоне — зоне газификации. Эта энергия складывается из энергии, выделяющейся при сгорании кокса, и высокоэнтальпийной энергии плазменной струи.

Основные характеристики установки

| | |
|--|---|
| Расход отходов, кг/ч | 60 |
| Расход плазмообразующего газа — воздуха, м ³ /ч | 20 |
| Габаритные размеры печи, м: | |
| диаметр | 1,12 |
| высота | 7,5 |
| Средний состав пирогаза, %, в зоне: | |
| пиролиза | 81,6 H ₂ O, 5,5 H ₂ , 3,8 CO, 6,7 CO ₂ |
| газификации | 32,5 CO, 64,1 N ₂ , 2,8 H ₂ O |
| Рабочие условия процесса в аппарате: | |
| температура пиролизных газов, °С | 200 |
| температура расплава, °С | 1600 |
| температура плазменной струи, К | 3000—5000 |
| давление в печи, МПа, менее | 0,1 |

Перед подачей газов на газовую турбину используется (см. рис. 12.9) электрофильтр ПГ-8 (5) для очистки их от пыли и смолы, образующихся при газификации углей. Электрофильтр рассчитан на работу при ≤ 50 °С, давлении до 40 кПа, разрежении до 5 кПа и представляет вертикальный, однополюсный, односекционный аппарат со стальным корпусом цилиндрической формы активным сечением 5 м². Осадительные электроды трубчатой формы.

Скруббер 3 — полый форсуночный с противоточным движением газовой и жидкой фаз (см. рис. 12.9). Орошающая жидкость подается в скруббер через форсунки под давлением 300—400 кПа. Скорость газа 0,6 м/с, удельный расход жидкости 10 л/м³. Полые форсуночные скрубберы могут обеспечить высокую степень очистки (≤ 92 %) при улавливании частиц пыли > 10 мкм.

Отстойники-осветители (13 и 14) — горизонтальные сооружения глубиной 1,5—4, шириной 6—9 м (отношение длины к глубине 8—12), в которых одновременно с отстаиванием сточная вода фильтруется через слой взвешенного осадка. Отстойник оборудован скребковым механизмом ленточного типа, сдвигающим выпавший осадок в приямок. Из приямка осадок удаляют насосом.

Сооружение для биохимической очистки сточных вод (10) — аэротенк — прямоугольный в плане железобетонный резервуар, оборудованный воздуховодами, из которых по стоякам воздух подается в фильтросные каналы, заделанные на цементном растворе фильтросами — пористыми шамотными или пластиковыми пластинами 300 × 300 × 40 мм. Через такие пластины происходит мелкопузырчатая (размер пузырьков 1—4 мм) аэрация смеси в аэротенке.

Продуктами плазмохимического пиролиза твердых отходов являются шлак и пиролизный газ, содержащий H_2 , CO , углеводороды, водяной пар и смолу. Жидкий шлак из реактора поступает в приемник шлака 16, куда подается охлаждающая вода. Вследствие высокой температуры (1500 °С) в реакционной зоне реактора шлак не содержит органических веществ, стерилен, и его можно использовать в качестве наполнителя для строительных материалов.

При низкотемпературном пиролизе температура газа на выходе из реактора 200—400 °С, он содержит значительные количества смолы и водяных паров, поэтому первая и обязательная технологическая операция, которой подвергается полученный газ — охлаждение для конденсации водяных паров и смолы. При разработке системы охлаждения используется схема, применяемая на коксохимических заводах. Газ из реактора поступает в газосборник 1, предназначенный:

- для приема газа из печи и выравнивания его состава в постоянную и равномерную смесь;
- первичного охлаждения газа;
- выделения смолы и фусов.

В газосборнике газ охлаждается до 90 °С интенсивным орошением надсмольной водой, которая подается через специальные форсунки под напором 100—150 кПа. Количество испаряющейся воды 2—3 % от подаваемой, конденсирующейся смолы 50—60 % от содержащейся в пирогазе. Кроме конденсации смолы, в газосборнике выделяются фусы.

Газ, надсмольная вода, смола и фусы из газосборника по газопроводу поступают в сепаратор 2, предназначенный для отделения газа от жидкой фазы. Из сепаратора 2 по вертикальному отводу из нижней его части смола, надсмольная вода и фусы поступают в механизированный отстойник-осветитель 14. Отстоявшаяся от смолы вода из верхней части отстойника-осветителя насосом подается на орошение газосборника. Смола и флюсы через проме-

жуточный сборник 15 подаются насосом в реакционную зону печи на сжигание. Газ из сепаратора 2 поступает в нижнюю часть скруббера 3, который сверху орошается надсмольной охлажденной водой. В скруббере газ охлаждается до 30 °С. Надсмольная вода нагревается от 25 до 80 °С. Сконденсировавшиеся пары смолы воды вместе с охлаждающей водой поступают в отстойник 13, где происходит отделение смолы от воды. Из отстойника смола подается насосом через промежуточные сборники 11 и 15 в зону газификации реактора. Часть надсмольной воды направляется в цикл газосборника для пополнения убыли охлаждающей водой за счет испарения.

Другая часть воды, необходимая для орошения скруббера, поступает в трубчатый холодильник 12 и, охлажденная до 25 °С, подается в верхнюю часть скруббера 3. В трубчатом холодильнике 12 надсмольная вода передает тепло технической воде, для охлаждения которой служит градирня 8. Избыток надсмольной воды отводится из отстойника 13 на биохимическую очистку 10.

Надсмольная вода содержит большое количество органических веществ, а также H_2S и HCl . Для нейтрализации HCl применяется щелочь, которая из емкости 2 непрерывно подается в отстойник 14.

Биохимическая очистка 10 предусматривает очищение воды до содержания вредных примесей в пределах ПДК.

Для преодоления газом гидравлического сопротивления охлаждающей аппаратуры и трубопроводов устанавливается специальный насос или эксгаустер 4. Газопровод и аппаратура, расположенные до эксгаустера (на всасывании), находятся под разрежением, а после эксгаустера (на нагнетании) — под давлением. Эксгаустер устанавливается после скруббера 3.

Содержание смолы в газе после газовых холодильников составляет обычно 2—5 г/м³. Полное выделение смолы из газа только охлаждением и промывкой практически неосуществимо. После очистки газа в электрофильтре 5 содержание смолы в очищенном газе не превышает 50 мг/м³. После электрофильтра газ через газгольдер 6 подается на газовую турбину 7, где происходит его сжигание.

12.4. Фильтровальная техника для очистки и обеззараживания отработанных моющих растворов

Прачечное производство

Прачечное производство имеет большое социально-экономическое значение. По масштабам оно соизмеримо со многими промышленными производствами. Например, объем услуг прачечных только в Москве — около 200 т белья в сутки (А. Ф. Порядин, 2001). Оно направлено на обеспечение санитарно-гигиенических условий и здоровья человека. Потребители услуг прачечного произ-

водства (гостиницы, больницы, учреждения отдыха, транспорта, общественного питания и индивидуальные потребители) предъявляют в настоящее время достаточно жесткие требования к качеству услуг, в первую очередь, к санитарно-гигиеническим требованиям, качеству стирки, стоимости и доступности.

В настоящее время постоянно возрастает стоимость питьевой воды, используемой в стирке, что обусловлено ростом энергетических затрат на водоподготовку и транспортировку воды, а также на очистку сточных вод перед сбросом в водоемы. Ресурсосбережение позволяет сократить производственные расходы, в том числе стоимость. Вместе с тем, экологические аспекты прачечного производства продолжают оставаться малоизученными. Чтобы предотвратить загрязнение водоемов СПАВ, фосфатами и удаленными из одежды загрязнениями, сбросы прачечных производств необходимо очищать. В России и за рубежом этим проблемам уделяется большое внимание.

Особенность сточных вод прачечных в том, что они содержат ксенобиотики, СПАВ, а также фосфаты и биогенные органические вещества. В результате в загрязненных ими водоемах интенсивно развивается специфическая микрофлора, сине-зеленые водоросли, которые подавляют жизнедеятельность высших организмов. Организация замкнутого оборота позволяет решить проблему загрязнения водоемов и сократить расход традиционных моющих средств.

Для снижения водопотребления используют разные технологии, например, на основе организации противотока. Однако они не в полном объеме решают проблему сброса загрязняющих веществ, СПАВ и минеральных веществ. Проблема сокращения водопотребления и снижения уровня химического загрязнения и обеззараживания сточных вод прачечных остается актуальной.

Так как реагентные методы приводят к возрастающей минерализации и накоплению минеральных отходов, перспективным в этой сфере представляется электрохимический метод (установки «ЭЛМА-1М» и «СТЭЛ-10Н-120-01», модель 80-01). Электрохимическая малогабаритная установка ЭЛМА-1М предназначена для получения дезинфицирующих и отбеливающих растворов гипохлорита натрия (NaClO) путем электролиза раствора поваренной соли. Установка СТЭЛ-10Н-120-01 предназначена для электрохимического синтеза щелочных (моющих) и кислых (дезинфицирующих) растворов. Установка используется в проточном режиме, т. е. электрохимический синтез технологических растворов осуществляется непрерывно из протекающей через установку водопроводной воды, в которую предварительно вводится раствор NaCl .

На рис. 12.10 представлена схема оборотного водоснабжения прачечного производства, обеспечивающая экономию воды и минимизацию загрязнения окружающей среды в соответствии с технологическим режимом стирки (табл. 12.4).

Всего: 26 662 л/смена

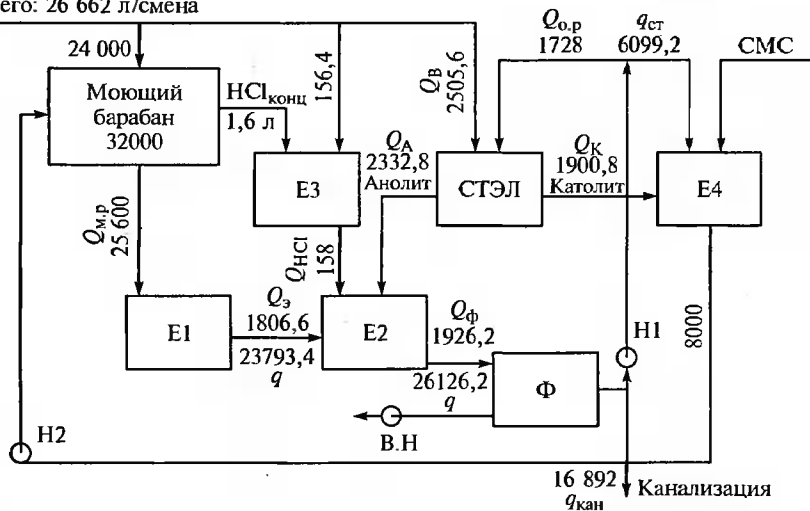


Рис. 12.10. Технологическая схема оборотного водоснабжения прачечной

С учетом оборотного водоснабжения: на первую и вторую стирки используется обратная вода, на полоскания — свежая. Вода после стирок и полосканий поступает в емкость Е1. В процессе стирки теряется 20 % общего объема воды. Очистка воды происходит двумя потоками: из емкости Е1 подается в емкость Е2, где подкисляется соляной кислотой из резервуара Е3. Полученный раствор поступает на эспандерный фильтр (Ф), затем фильтрат поступает на установку СТЭЛ для получения анолита и католита. В резервуаре Е2 происходит подкисление и обеззараживание анолитом. Затем раствор подается на фильтр. После чего часть очищенной воды

Таблица 12.4

Технологический режим стирки

| Операция | Вода, л/кг белья | Операция | Вода, л/кг белья |
|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| 1. Первая стирка | 4 | 6. Отжим | — |
| 2. Отжим | — | 7. Второе полоскание | 8 |
| 3. Вторая стирка | 4 | 8. Отжим | — |
| 4. Отжим | — | 9. Третье полоскание | 8 |
| 5. Первое полоскание | 8 | 10. Отжим | — |
| Итого | | | 32 |

выводится в канализацию, а оставшаяся часть подается в емкость Е4, в которую подается католит и СМС. Полученный моющий раствор поступает в моющий барабан для первой и второй стирок. На полоскания расходуется свежая вода. Расчеты показали сокращение потребления свежей воды в 1,5—2 раза.

Химическая чистка одежды

Процессы утилизации шламов и оборудование для их реализации являются в настоящее время одним из основных и энергоемких процессов современных производств, включая химическую чистку одежды. В первую очередь это связано с платным принципом размещения отходов, резким скачком цен на хлорорганические растворители и введением жестких требований по экологической безопасности хлорсодержащих продуктов, к которым и относится растворитель — перхлорэтилен, подлежащий рекуперации из шлама вышеуказанного производства.

Недостаток системных теоретических исследований по проблеме извлечения растворителя из шлама дистилляционных установок машин химической чистки и, как следствие, отсутствие каких-либо обобщающих рекомендаций, кроме традиционных, сложившихся в ходе эксплуатации имеющейся в распоряжении техники по использованию «острого» пара из нелетучего остатка со всеми вытекающими недостатками (повышенный расход пара и воды, снижение качества растворителя, и, следовательно, чистки одежды из-за наличия соляной кислоты, повышенная скорость коррозии оборудования — баков, водоотделителя, испарителя и др.), позволяют говорить о перспективности установки для рекуперации растворителя из шлама непосредственно в испарителе дистилляционных установок машин химической чистки одежды (разработчики МГУсервиса и ЦНИИБыт, Москва).

Установка КХ-445 (рис. 12.11) предназначена для извлечения остаточного растворителя (перхлорэтилена, трихлорэтилена) из кубовых остатков (шлама) дистилляционных установок машин химической чистки одежды. Согласно результатам испытаний установки, проводившихся в разных регионах страны, при начальном содержании растворителя в кубовом остатке машин химической чистки до 25 % остаточное содержание растворителя в обработанном остатке не превышает 1—2 %. Конденсация паров растворителя осуществляется в водоохлажденном конденсаторе. Продолжительность процесса переработки 100 мин, причем значительная часть времени расходуется на разогрев шлама.

В установке КХ-445 в качестве средства вакуумирования использован вакуум-насос, который задействуется на заключительной стадии отгонки, после введения «острого» пара. Установка состоит из следующих составных узлов:

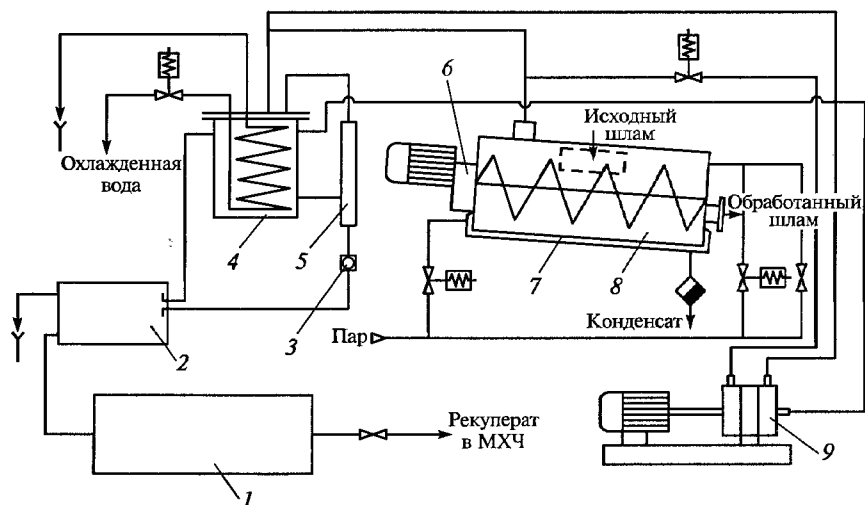


Рис. 12.11. Схема установки для рекуперации растворителя из шлама КХ-445:

1 — бак-сборник растворителя; 2 — водоотделитель; 3 — окно смотровое; 4 — конденсатор; 5 — охладитель конденсатора; 6 — привод мешалки; 7 — рубашка; 8 — испаритель; 9 — вакуум-насос

испарителя, в котором осуществляется процесс отгонки растворителя;

конденсатора для рекуперации паров растворителя;

водоотделителя для разделения эмульсии «растворитель — вода» на составные части;

вакуум-насоса для вакуумирования рабочего пространства испарителя;

бака-сборника растворителя;

шкафа управления.

Основные параметры установки (по данным Змиевского машиностроительного завода, Украина):

| | |
|--|-------|
| Загрузочная масса по исходному шламу, кг | 100 |
| Производительность по исходному шламу, кг/ч | 25 |
| Содержание растворителя в обработанных кубовых остатках, % | 1 |
| Удельные расходы | |
| пара, кг/кг | 2,0 |
| воды, м ³ /кг | 0,045 |
| электроэнергии, кВт·ч/кг | 0,05 |

Установка характеризуется сравнительно невысокой производительностью, расходует незначительное количество пара на рекуперацию; удовлетворительной степенью извлечения рас-

творителя из шлама согласно современным экологическим требованиям.

Работает она следующим образом: исходный шлам через боковой загрузочный люк загружается в испаритель, в рубашку испарителя через электромагнитный клапан подается пар для подогрева шлама. По истечении установленного времени включается подача «острого» пара непосредственно в испаритель для интенсификации извлечения растворителя из шлама. Для окончательного удаления растворителя из шлама и парового пространства испарителя включается вакуум-насос по схеме «испаритель—вакуум-насос—конденсатор». Для интенсификации теплообмена между греющей поверхностью рубашки и шламом, а также для увеличения удельной поверхности испарения растворителя внутри испарителя установлена горизонтальная мешалка с электромеханическим приводом.

Смесь паров растворителя и воды (при подаче «острого» пара) поступает в конденсатор. Охлаждение и конденсация паров происходит на поверхности охлаждаемого водопроводной водой оребренного змеевика; сконденсированная эмульсия через охладитель конденсата и смотровое окно отводится в водоотделитель. Рекуперат из водоотделителя поступает в бак-сборник растворителя.

Исполнительные механизмы (электродвигатели приводов мешалки, вакуум-насоса, пневмо- и электромагнитные клапаны) управляются посредством командоаппарата. Для обеспечения удобства выгрузки шлама корпус испарителя имеет наклон 15° в сторону разгрузочного люка. Обработанный шлам выгружается через разгрузочный люк в результате реверсивного вращения мешалки с подачей шлама в сторону люка.

Таким образом, использование установки типа КХ-445 для организации станций (участков) по централизованной переработке шлама оправданно как с экономической (получение дополнительных количеств растворителя), так и с экологической позиций.

Автомобильные моечные станции

Важное государственное значение имеет очистка *нефте содержащих* сточных вод предприятий сервиса и коммунальных объектов.

С 1972 г. введен в действие Водный кодекс. С 1 января 1982 г. в целях повышения заинтересованности промпредприятий в рациональном использовании воды введена плата за 1 м^3 забора воды из водопровода и 1 м^3 сброса этой воды в канализацию.

В 1990 г. введен платный принцип природопользования. В частности, были установлены базовые нормативы платежей за лимитные и сверхлимитные сбросы загрязняющих веществ в водные объекты, в том числе взвесей и нефтепродуктов, отводимых от автомобильных моек.

В последнее десятилетие возросли требования к эффективности очистных сооружений, позволяющих очищать нефтесодержащие сточные воды до требований природоохранного законодательства и повторного использования. Разработанные до 1992 г. типовые очистные сооружения (производительностью от 3 л/с) для очистки нефтесодержащих сточных вод предназначались в основном для крупных автотранспортных предприятий, таксомоторных парков и городских (промышленных) систем отведения поверхностных вод.

С 1992 г. наметилась устойчивая тенденция к появлению широкой гаммы малых очистных установок, предназначенных в основном для очистки сточных вод одного-двух моечных постов для легкового автотранспорта производительностью 0,5—3 м³/ч. Однако разнообразные технологические и конструктивные решения до сих пор должным образом не систематизированы и не типизированы.

Импортные же установки данного типа (например, фирмы *Karcher*, Германия) весьма дороги и могут быть доступны далеко не всем предприятиям.

В то же время существует высокая потребность в унифицированных, недорогих и эффективных установках средней производительности (3—10 м³/ч), которые могут быть применены для очистки широкого спектра нефтесодержащих сточных вод сферы сервиса (автомойки, автозаправочные станции) и коммунально-го хозяйства.

Загрязнение сточных вод АТП характеризуется следующими содержаниями, мг/л, взвешенных веществ: от мойки грузовых автомобилей — 3000, автобусов — 1600 и легковых автомобилей — 700, а нефтепродуктов соответственно 900, 850 и 75 мг/л.

Степень очистки сточных вод устанавливается в соответствии с требованиями СНиП П-39-74. Концентрация загрязняющих веществ в воде, подаваемой на мойку после очистки, не должна превышать, мг/л: для грузовых автомобилей 70 — по взвешенным веществам, 20 — по нефтепродуктам, для автобусов и легковых автомобилей соответственно 40 и 15 мг/л.

Фракционный состав частиц взвешенных веществ и их процентное соотношение в сточных водах от мойки автомобилей, определенные опытным путем [13]:

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|
| d_r , мм | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,14 | 0,10 | 0,05 |
| В водах от мойки автомобилей, %: | | | | | | | |
| грузовых | 0,30 | 1,4 | 14,21 | 34,14 | 44,11 | 5,84 | — |
| легковых | 0,68 | 1,66 | 9,28 | 18,40 | 31,58 | 23,6 | 14,8 |

Согласно ОНТП-01-86 Минавтотранса РСФСР и более новой редакции ОНТП-01-91, средняя концентрация загрязнений в стоке дана в зависимости от категории автомобилей (табл. 12.5).

**Средняя концентрация загрязнений
автотранспортного предприятия (АТП)**

| Категория автомобилей | Взвешенные вещества, г/л | Нефтепродукты, мг/л | pH | БПК ₂₀ , мг O ₂ /л | ТЭС, мг/л |
|--------------------------|--------------------------|---------------------|-----|--|-----------|
| Легковые | 0,4—0,6 | 20—40 | 7—8 | 20—40 | 0,01 |
| Автобусы | 0,9—1,3 | 20—50 | 7—8 | 30—40 | 0,01 |
| Грузовые: | | | | | |
| малой грузоподъемности | 1,4—1,8 | 40—50 | 7—8 | 30—40 | 0,01 |
| большой грузоподъемности | 2,0—4,0 | 50—150 | 7—8 | 30—40 | 0,01 |

Гранулометрический состав взвешенных веществ, содержащихся в стоке от мойки грузовых автомобилей и автобусов:

| | | | | |
|------------------------|---------|---------|----------|-----------|
| d_r , мм | > 5 | 5—3 | 3—0,25 | < 0,25 |
| % от общей массы | 8,7±2,1 | 3,9±2,7 | 64,9±8,9 | 22,5±1,11 |

а от мойки легковых автомобилей может быть принят следующий, м: 12 % — частицы > 300 мкм; 75 % — 300—100 мкм; 13 % — < 100 мкм.

В сточных водах от мойки автомобилей, работающих на этилированном бензине, возможны попадания в сток высокотоксичного вещества — тетраэтилсвинца (ТЭС). Содержание ТЭС по данным исследований в стоке составляет 0,002—0,01 мг/л, однако при мойке двигателей оно может достичь 2,46 мг/л, осадок и нефтепродукты обладают высокой токсичностью. После реагентной очистки и моечных вод последние практически не содержат ТЭС и могут быть включены в систему оборотного водоснабжения.

Применение при мойке автомобилей СМС ведет к эмульгированию нефтепродуктов и требует иного способа их очистки, так как отстаивание, коагуляция и фильтрация не обеспечивают надлежащей эффективности.

Нормативное значение концентраций согласно требованиям ОАТП-01-91 при повторном использовании составляет 40 и 15 мг/л по взвешенным веществам и нефтепродуктам соответственно.

На рис. 12.12 представлена аппаратно-технологическая схема очистных сооружений с безнапорными гидроциклонами по методу механической очистки загрязненной воды после мойки автомобилей (для крупных АТП). Как показал опыт эксплуатации, очистные сооружения удовлетворяют установленным требованиям. Содержание взвешенных веществ в фильтрованной воде составляет для сточных вод от мойки, мг/л: автобусов — 40; легковых автомобилей — 20; грузовых — 70. Содержание нефтепродуктов в

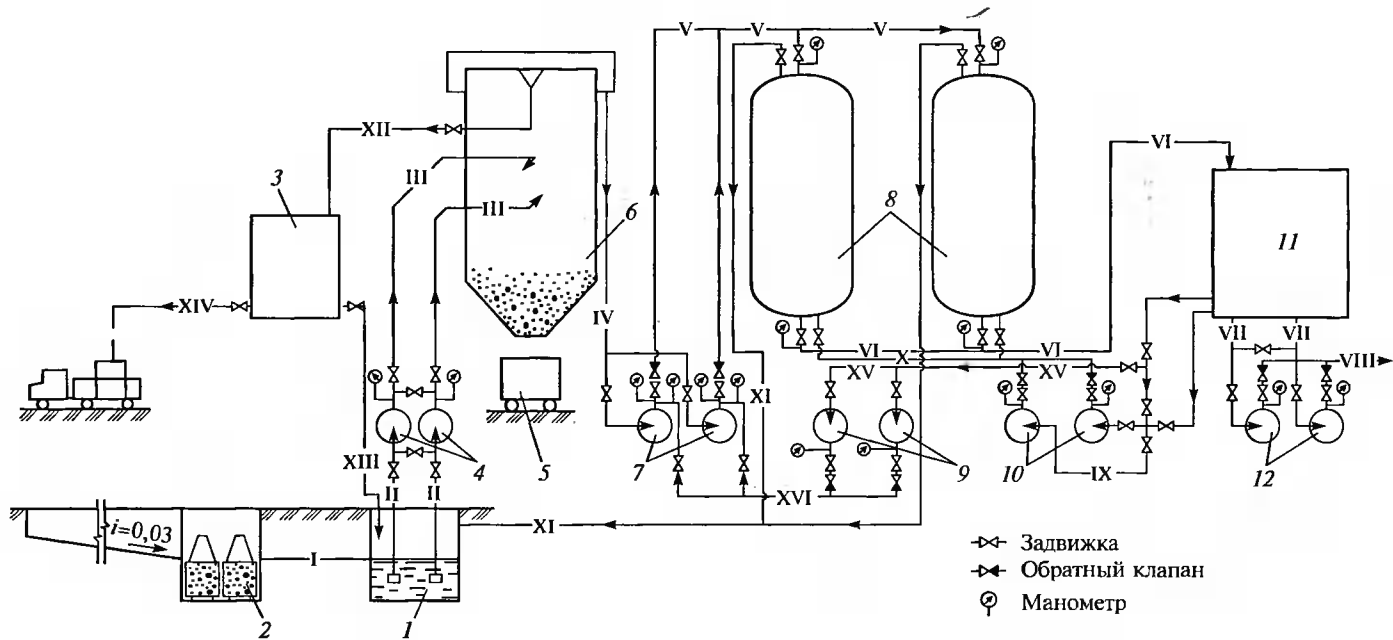


Рис. 12.12. Схема работы очистных сооружений Гипроавтотранса с безнапорными гидроциклонами для систем оборотного водоснабжения мойки автомобилей

Трубопроводы: I — сточных вод от мойки автомобилей, прошедших песколовку; II — всасывающий насосов первого подъема с приемным клапаном; III — напорный, подающий сточные воды на гидроциклон; IV — всасывающий от насосов второго подъема; V — напорный, подающий на фильтр; VI — фильтрованной воды (очищенной); VII — всасывающий от насоса (оборотного водоснабжения); VIII — напорный от насосов к моечным установкам; IX — всасывающий от насосов промывки фильтров; X — напорный от насосов промывки фильтров; XI — фильтрата; XII — отводящий нефтепродукты от гидроциклона; XIII — слива воды; XIV — слива нефтепродуктов; XV — всасывающий от насосов гидроуплотнения сальников; XVI — напорный от насосов гидроуплотнения сальников; 1 — приемный резервуар; 2 — песколовка; 3 — бак для сбора нефтепродуктов; 4 — насосная станция первого подъема; 5 — передвижной контейнер для осадка; 6 — безнапорные гидроциклоны; 7 — насосная станция второго подъема; 8 — фильтры напорные; 9 — насосная станция гидроуплотнения сальников; 10 — насосная станция для промывки фильтров; 11 — резервуар очищенной воды; 12 — насосная станция оборотного водоснабжения

фильтрованной воде составляет для сточных вод от мойки, мг/л: автобусов — 15; легковых автомобилей — 1,5; грузовых — 18.

Таким образом, очистные сооружения обеспечивают требуемую степень очистки для повторного использования сточных вод в системе оборотного водоснабжения [13].

Для мелких и средних АТП, а также муниципальных постов мойки легковых автомобилей предложены следующие принципиальные схемы очистки с оборотным водоснабжением (рис. 12.13, I, II, III).

Технологическая схема установки (разработчик МГУ сервиса) производительностью 3—5 м³/ч, апробированная на ряде автомоек, представлена на рис. 12.14. Установка состоит из следующих основных блоков (узлов):

приемник-песколовка (в виде бетонированного приемка непосредственно на моечной площадке);

блок тонкослойного отстаивания;

блок напорного фильтрования с зернистой загрузкой;

бак, разделенный на две секции: накопления воды перед фильтрацией и накопления очищенной воды.

Отличительная особенность установки — ее более низкая в сравнении с аналогами материалоемкость в сочетании с высокой эффективностью и надежностью очистки. Это, с одной стороны, позволило значительно снизить стоимость, что особенно важно при высокой конкуренции на рынке автомоечного оборудования, а с другой — применять установку для наиболее ответственных случаев (сброс очищенных вод в водоемы рыбохозяйственного значения).

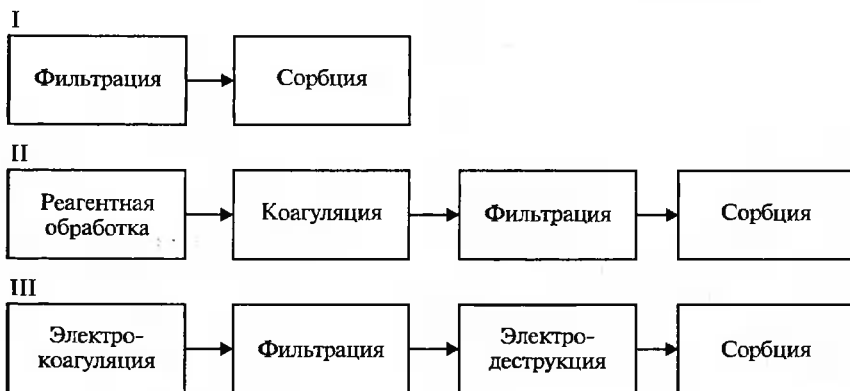


Рис. 12.13. Схемы очистки воды после мытья автомобильного транспорта с обратным водоснабжением:

I — модуль «Эйкос-АВТО-Б1»; II — фильтрационная модульная установка «Эйкос»; III — комплекс «АВТО-Р-2»

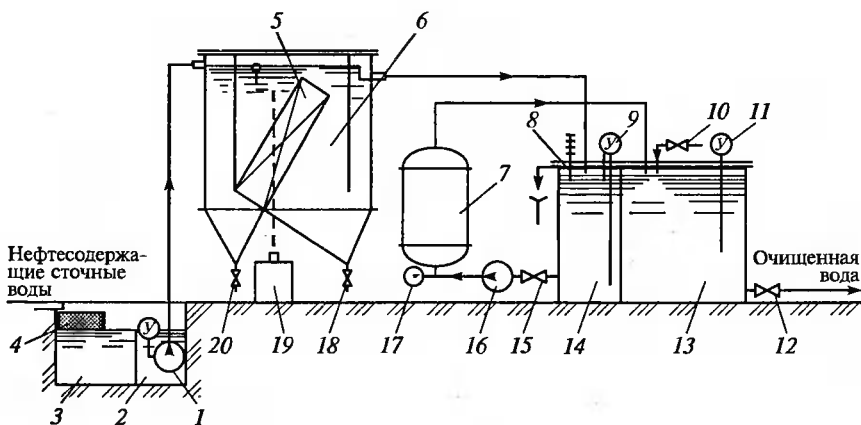


Рис. 12.14. Технологическая схема установки для очистки нефтесодержащих сточных вод:

1 — насос подачи сточной воды; 2 — промежуточный сборник (секция для сбора грязной воды); 3 — песколовка (секция приемка для осаждения песка); 4 — ловушка грубых механических включений; 5 — тонкослойный блок; 6 — отстойник; 7 — фильтр с зернистой (угольной) загрузкой; 8 — дозатор; 9, 11 — электронное реле уровня; 10 — клапан подпитки водопроводной воды; 12 — патрубок подачи очищенной воды; 13 — секция бака для сбора очищенной воды; 14 — секция бака промежуточная; 15 — кран; 16 — насос фильтра; 17 — манометр; 18, 20 — патрубки для слива осадка; 19 — сборник нефтепродуктов

Обосновано применение средств подготовки осадка, извлекаемого из песколовки и концентраторов осадка отстойника, к утилизации. Применение напорного гидроциклона типа ГН-80 с $D = 80$ мм с производительностью по осадку 9,8 л/мин и граничной крупностью удерживаемых частиц 7,4 мкм позволяет при достигаемой влажности 60 % снизить объем осадка более чем в два раза. Расчеты показали, что вместе с природоохранным эффектом, достигаемым за счет предотвращения сброса неочищенных сточных вод, эффект сокращения объема, подлежащего утилизации, позволяет добиться годового экологического эффекта, сопоставимого со стоимостью установки.

Дополнительным преимуществом установки является также возможность экологически безопасной утилизации отработанного антрацитового фильтрата в топках стандартных теплогенераторов, приспособленных под сжигание твердого топлива.

12.5. Мобильная ресурсосберегающая установка комплексного обезвреживания вредных веществ в ТЧС

В процессах аварийной эксплуатации промышленного оборудования образуются сточные воды, которые требуют специальной очистки перед сбросом в канализационные системы. Сточные воды любого промышленного предприятия содержат специфические загрязнения, которые необходимо удалять (нейтрализовать) до смешения со стоками другого производства или населенного пункта. Наиболее распространенными загрязняющими веществами, подлежащими очистке, включая поверхностные воды, являются нефтепродукты, фенолы, легкоокисляемые органические вещества, соединения меди, цинка, аммоний, нитратный азот и др.

На многих крупных предприятиях действуют общезаводские очистные сооружения с установками для механической, физико-химической и биологической очистки. Но малые предприятия, автомойки, автозаправочные станции, стекольные производства либо такими очистными сооружениями не располагают, либо в период ТЧС они не функционируют. В связи с этим была поставлена задача разработки мобильного комплекса по очистке выбросов предприятий от вредных веществ (сточные воды, газовые и твердые отходы).

Все выбросы промышленных предприятий можно разделить на две большие группы: технологические отходы и сбросы ливневой канализации. Технологические же отходы подразделяются на пыль, агломераты или шлам, кислоты, щелочи, ПАВ (СПАВ), нефтепродукты, а сбросы ливневой канализации — на атмосферные осадки, отходы транспортного цеха (после мойки автомобилей),

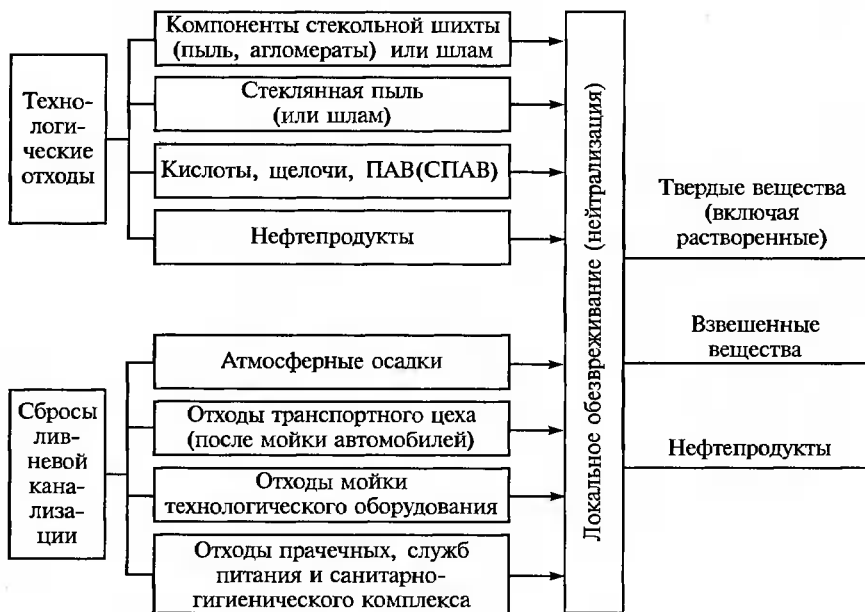
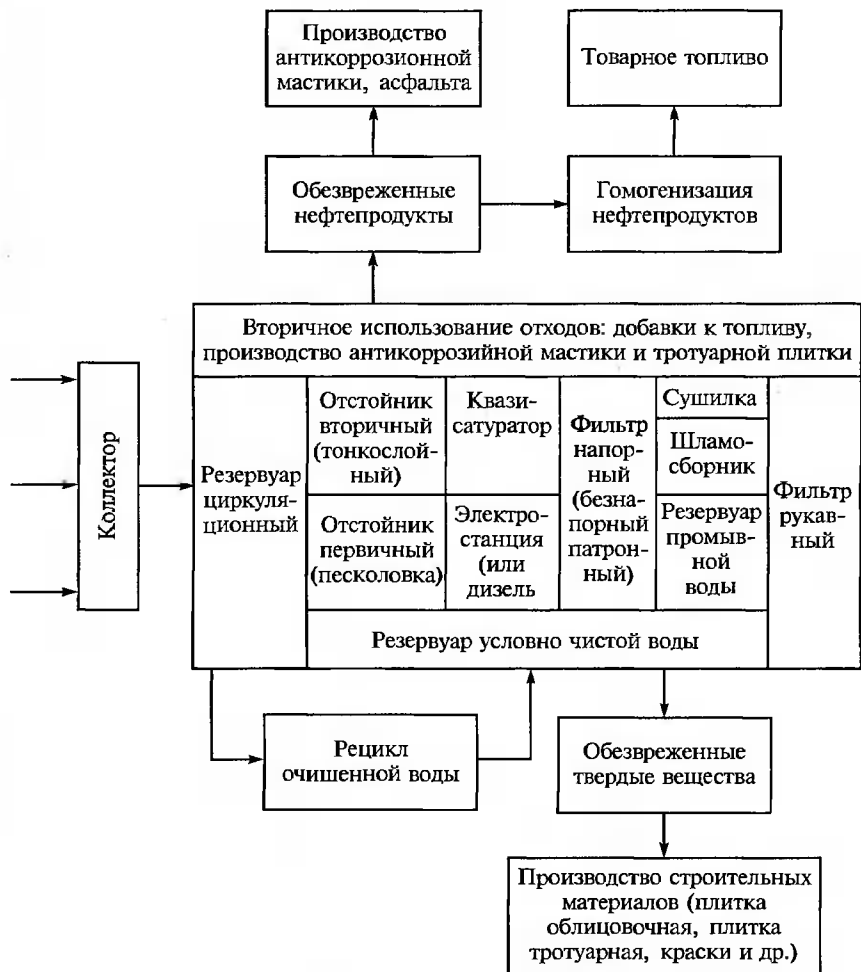


Рис. 12.15. Блок-схема мобильной ресурсосберегающей



установки комплексного обезвреживания вредных веществ

мойки технологического оборудования, прачечных, служб питания и санитарно-гигиенического комплекса. Выбросы заводов даже в условиях ТЧС должны подвергаться обязательной локальной очистке, основные цели которой:

максимальное снижение потерь сырья со сточными водами;

снижение потребления чистой воды;

сокращение сброса сточных вод по объему и количеству загрязняющих веществ в водоемы;

снижение объемов отходов вне заводских очистных сооружений и капитальных вложений в их восстановление.

Пройдя локальное обезвреживание (нейтрализацию), отходы выходят в виде твердых веществ, взвешенных веществ и нефтепродуктов, которые затем поступают в коллектор на дополнительную очистку. Откуда выбросы заводов идут на обезвреживание по методу, представленному на блок-схеме передвижного водоочистного модуля (рис. 12.15). Основным элементом этой оперативно развертываемой очистной станции — звено «тонкослойный отстойник — квазисатуратор — фильтр с зернистым наполнителем». В качестве последнего предлагается использовать фильтр, новизной которого является картридж из стеклянных (бисерных) шариков, выполненный либо засыпным с регулируемой порозностью слоя, либо спеченным, порозность которого подбирается в зависимости от времени года.

Анализ отечественных и зарубежных разработок установок и сооружений для очистки нефтесодержащих сточных вод показал, что наиболее отработанными, эффективными и сравнительно недорогими аппаратами являются отстойники с тонкослойными блоками и фильтры с зернистой загрузкой.

Главный недостаток конструкций отстойников с тонкослойными блоками — их необоснованная материалоемкость, а фильтров с зернистой загрузкой — невыполнение в большинстве случаев главной функции — гарантированной доочистки стоков до нормативных требований.

В МГУИЭ разработана установка, оснащенная типовым недорогим и в то же время эффективным блоком очистки, предназначенная для универсального применения на предприятиях сервиса и малых коммунальных объектах в условиях ТЧС [14, 15].

Очистка заключается в последовательном выделении механических примесей, нефтепродуктов и ПАВ (СПАВ) в разных агрегатных состояниях и дисперсных фазах с последующей их вторичной переработкой и использованием. Например, обезвреженные нефтепродукты, пройдя гомогенизацию, могут использоваться в производстве товарного топлива, антикоррозионной мастики, асфальта. В свою очередь, обезвреженные твердые вещества пригодны в производстве строительных материалов — облицовочной и тротуарной плитки, краски и др.

Все основное оборудование водоочистного модуля размещается в стандартном автомобильном прицепе — тяжеловозе со стандартным кузовом на базе седельного тягача КРАЗ или МАЗ.

Использование таких передвижных модулей (производительность очистки: по газу — до 3000 м³/ч, по жидкости — до 10 м³/ч, по твердым отходам — до 200 кг/сут; стоимость 2,5—2,7 млн руб.) позволяет оперативно решить проблему очистки сточных вод не только на стекольных заводах, но и на других промышленных предприятиях и коммунально-городских службах (автомойках, АЗС и др.) в случае чрезвычайных техногенных ситуаций, а также на любых инженерных объектах. Ведется разработка оригинального технологического оборудования для мобильного модуля применительно к автомоечным станциям и предприятиям по производству стекла и стеклянного волокна.

12.6. Перспективные концепции ядерных технологий

Ядерная энергетика

Необходимо разработать схемы АЭС нового поколения в целях полного исключения попадания радионуклидов в окружающую среду при любых авариях на энергоблоке. В основу этих разработок положен многобарьерный принцип удержания радионуклидов в случае аварии. Первый барьер — *таблетка* диоксида урана. Большая часть продуктов распада удерживается в самой таблетке. Второй барьер — *герметичная оболочка тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)*, которая удерживает даже газообразные радионуклиды. Третий барьер — *плотно-прочные корпус реактора и трубопроводы первого контура*, которые удерживают радионуклиды в случае разгерметизации оболочки ТВЭЛ. Четвертый барьер — *массивная, проч-*

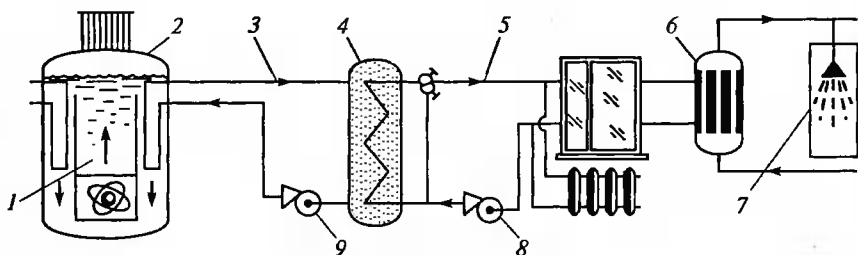


Рис. 12.16. Принципиальная схема реакторной установки АСТ-500:

1 — первый контур ($P_1 = 20$ атм, $t_1 = 208$ °С); 2 — реактор; 3 — второй контур ($P_2 = 12$ атм, $t_2 = 160$ °С); 4 — сетевой теплообменник; 5 — сетевой контур ($P = 20$ атм, $t = 150$ °С); 6 — дополнительный теплообменник для горячего водоснабжения; 7 — потребители тепла; 8 — сетевой насос; 9 — насос второго контура

ная герметичная оболочка, окружающая водо-водяные реакторы или здание реактора.

Приоритетными направлениями перспективных АЭС является создание такой системы безопасности, которая практически полностью исключала бы влияние обслуживающего персонала на ход остановки и расхолаживания реактора в случае аварии. Такой подход позволит в перспективе иметь реактор с *внутренне присущей безопасностью*. В наибольшей степени в настоящее время этому принципу соответствует проект атомной станции теплоснабжения (АСТ-500), принципиальная схема которой (с шестью защитными барьерами) представлена на рис. 12.16. Атомная станция теплоснабжения проектировалась для строительства в непосредственной близости к крупным городам. Поэтому АСТ удовлетворяет наиболее строгим требованиям по обеспечению безопасной работы энергоблока [16].

Окончательное удаление радиоактивных отходов (РАО)

Хранилище для окончательного удаления РАО часто называют могильником. Оно непременно должно содержать средства контроля за миграцией радионуклидов, а также технические барьеры для препятствий этой миграции. Конструкция хранилища и его расположение (планировка) различны для отходов разных категорий. Для низкоактивных отходов можно строить приповерхностные и наземные сооружения; для среднеактивных предлагается строительство подземных специальных хранилищ; для высокоактивных предполагается их удаление в глубокие геологические формации, возраст которых составляет сотни миллионов лет.

Сооружение и ввод в эксплуатацию таких хранилищ возможны лишь к середине XXI в.

12.7. Вторичная переработка и уничтожение продуктов оборонной промышленности. Конверсионные технологии

Ядерное оружие — переработка оружейного плутония

Разработан простой технологический процесс перевода оружейного плутония в смешанное уран-плутониевое топливо ядерных реакторов типа БН и ВВЭР, основанный на использовании пирохимических процессов в расплавленных солевых системах [17].

Особенности технологии (рис. 12.17): высокая скорость растворения плутония, минимум химических операций по очистке и конверсии плутония в оксидное топливо, компактность оборудо-

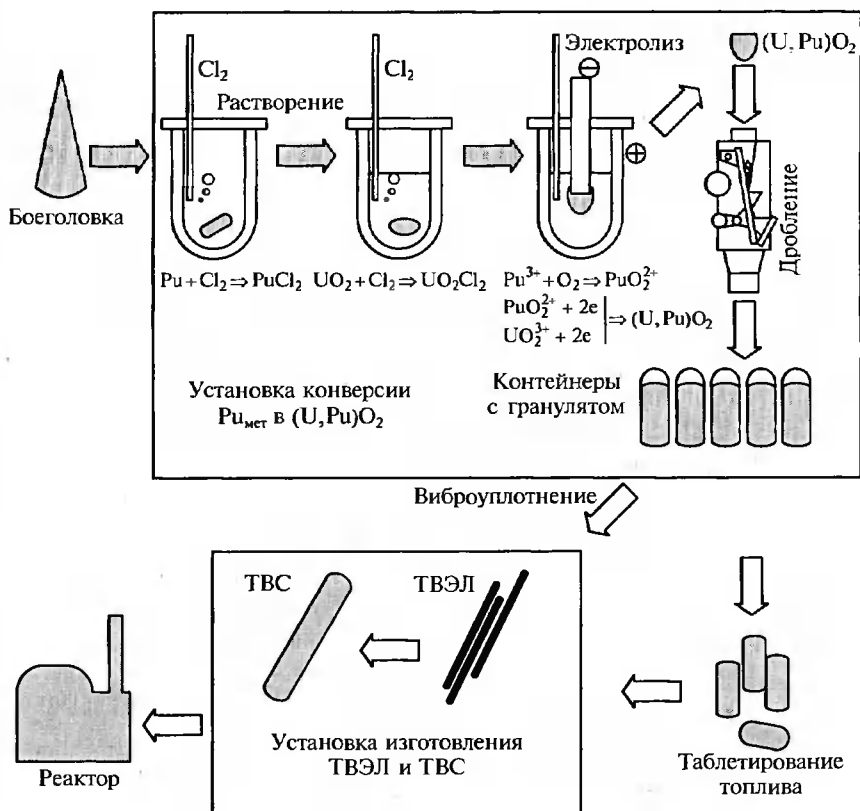


Рис. 12.17. Технология утилизации оружейного плутония

вания, минимум радиоактивных отходов, возможность получения топлива разных видов, гранулята — для виброуплотненных твэлов, мелкодисперсного порошка — для таблеток.

Химическое оружие (ХО)

В соответствии с Конвенцией о запрещении разработки, производства, накопления ХО и его уничтожения предлагаются десятки отечественных и зарубежных технологий вторичной переработки и уничтожения основных отравляющих веществ (ОВ), среди которых особое место в связи с их высокой токсичностью занимают кожно-нарывные и нервно-паралитические. Наиболее сложным в технологическом оформлении является уничтожение ОВ в боевых оболочках.

В США используют два метода уничтожения: химическую нейтрализацию и высокотемпературное сжигание (рис. 12.18) [18]. В ос-



Рис. 12.18. Основные методы уничтожения ХО



Рис. 12.19. Сжигание элементов химических боеприпасов в печи

нову этих технологий заложены следующие методы уничтожения ХО: термические — пиролиз (высокотемпературный и паровой) и сжигание (в снаряде, вылив ОВ в печи); химический и электрохимический; плазменный; лазерный; криогенный; биологическая детоксикация и уничтожение ядерным взрывом. Схема реализации одного из методов представлена на рис. 12.19.

Всесторонний анализ рассмотренных методов уничтожения ХО позволил американским специалистам выбрать в качестве базового метода прямое сжигание ОВ в специальных печах при высоких температурах. Этот метод прошел экспериментальную проверку и был реализован на установке JASADS.

В России разработан и экспериментально подтвержден способ взаимопутилизации ОВ типа люизит и отвального гексафторида урана — отхода атомной промышленности [18].

Производство порохов

Конверсия пороховых заводов осуществляется по двум направлениям [19].

1. Продолжение выпуска порохов в мирных целях.

2. Организация на базе пороховых заводов выпуска товаров народного потребления.

Вторичное использование *баллиститного пороха* основано на том, что он является конденсированным источником энергии, которая может быть выделена в трех режимах: *горения, детонации и газификации*.

Режим горения — используется для изготовления зарядов двигателей ракет широкого назначения, фейерверков, МГД-генераторов и др.

Режим детонации — взрыв может совершать как разрушительную, так и созидательную работу (синтез алмазов, резка металла, промышленные взрывчатые вещества).

Режим газификации обеспечивает управляемую генерацию газов по требуемому режиму (изготовление различного типа газогенераторов, аккумуляторов давления).

Выпуск гражданской продукции на базе вторичного использования баллиститного пороха (в том числе и снимаемых с вооружения пороховых зарядов) позволяет:

использовать пороха для добычи нефти, в геологии, для горных и других работ;

вести поиск полезных ископаемых методом сейсмозффекта;

применять пороховые аккумуляторы давления (ПАД) и газогенераторы давления (ГГ) в установках для тушения пожаров;

использовать пороха для импульсной обработки металлов, резки громоздких металлоконструкций, упрочнения материалов направленным взрывом и др.;

применять пороха для синтеза алмазов, корунда, нитрида бора и других сверхтвердых материалов;

использовать пороха в системах для борьбы с градом, громом, дождем и повышения ресурсов водообеспечения засушливых районов, а также в качестве зарядов для метеорологических и геофизических ракет типа «Алазань», «Кристалл» и др.

Основные направления конверсионных технологий:

производство лакокрасочной продукции с использованием в качестве сырья *нитроклетчатки* и, в первую очередь, *коллоксилина*;

выпуск декоративно-отделочных материалов, например, линолеума на основе *нитроклетчатки* или *поливинилхлорида*;

производство клеящих, чистящих и моющих веществ;

производство медицинских, парфюмерно-косметических препаратов и др.

Характерная особенность новых разработок — их реализация на основе двойных, наукоемких и автоматизированных технологий, что должно явиться гарантом конкурентоспособности, постоянного спроса и экологической чистоты изделий.

12.8. Новые технологии защиты от шума

В нашей стране действуют 80 стандартов, устанавливающих требования к нормированию, измерению и снижению шума. Человек подвергается действию повышенного шума чаще всего на транспортных средствах, в жилой застройке и на рабочих местах.

Таблица 12.6

Эффективность активной шумозащиты

| Объект | Снижение УЗД, дБ | Частотный диапазон глушения, Гц |
|--|------------------|---------------------------------|
| Вентилятор | 15 | НЧ*2 |
| Компрессор (акт выпуска) | 10 | НЧ |
| Двигатель внутреннего сгорания (акт выпуска) | 15 | НЧ |
| Турбомашина | 16 | ОЧВ*3 |
| Салон автомобиля*1 | 7 | 100—200 |
| Салон автомобиля*2 | 15 | ОЧВ |
| Активный шумозащитный экран | 5—12 | НЧ |

*1 Уровень звукового давления.

*2 Низкие частоты.

*3 Основная частота вращения.

Современная виброакустика предлагает следующие средства защиты от шума:

улучшение качества воспринимаемого звука. Методика базируется на понимании, что шум разного частотного состава (тембра), но одинаковый по уровню звука, воспринимается по-разному. Психоакустиками доказано, что разница в восприятии может достигать 10—14 дБА [20];

активная шумозащита. Методика основана на интерференции звуковых волн при их наложении, осуществляемом генерированием звуковой энергии дополнительным источником.

В развитых странах выпуск специальных устройств активной шумозащиты налажен в широких масштабах. В табл. 12.6 приведены некоторые примеры использования активной шумозащиты [21].

Анализ приведенных данных показывает, что активная шумозащита обеспечивает снижение УЗД на 7—15 дБ на низких частотах. Это большое преимущество, так как так называемая пассивная шумозащита наименее эффективна именно на низких частотах. Наиболее эффективно применение активных средств в совокупности с пассивными.

12.9. Перспективные топливосжигающие устройства

Акустическая форсунка

Для распыливания жидкого топлива применен излучатель, принцип действия которого основан на эффекте Гартмана, проявляющемся при истечении газообразной среды из сопла в резонансную полость.

Излучатель в узле распыливания жидкого топлива (рис. 12.20) работает следующим образом.

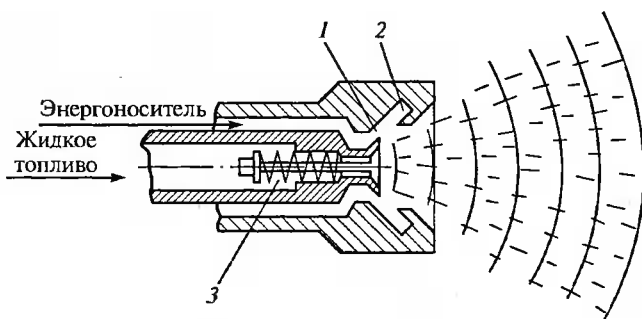


Рис. 12.20. Акустическая форсунка:

1 — кольцевое сопло; 2 — резонансная полость; 3 — клапан

Энергоноситель (компрессорный воздух, природный газ высокого давления, водяной пар), истекая из кольцевого сопла 1 в резонансную полость 2, становится источником мощных акустических колебаний. Жидкое топливо поступает по центральному каналу и равномерно распределяется в поле акустических колебаний с помощью клапана 3.

Преимущества принятой конструкции генератора заключаются в том, что при сравнительно низких значениях давления энергоносителя (≈ 3 атм) интенсивность упругих колебаний при частоте 16 кГц (на расстоянии 50 мм от носика форсунки) достигает 140 дБ, благодаря этому средний размер капель 80 мкм обеспечивается при удельном расходе энергоносителя 0,15 кг/1 кг топлива (по данным разработчика — АОТ «Экотеплогаз»).

Горелка типа ГПРУ

Горелка газовая рециркуляционных устройств предназначена для сжигания природного газа в топках котлов, печей, теплогенераторах и т.п. Номинальное давление газа 20 кПа, воздуха — 1 кПа. Полное сгорание газа происходит при коэффициенте избытка воздуха 1,02—1,04, что позволяет повысить КПД теплоагрегата дополнительно на 2%.

Широкий диапазон регулирования (коэффициент рабочего регулирования ≥ 10) обеспечивает устойчивую работу горелки при коэффициентах избытка воздуха от 0,8 до 1,5.

ГПРУ обеспечивает стадийное сжигание топлива, что позволяет снизить содержание вредных выбросов на 30%, а в компоновке с рециркуляционными устройствами — до 70% (на котле ПТВМ).

Типовой ряд горелок охватывает диапазон номинальных расходов газа от 600 до 3500 м³/ч.

При оснащении устройств форсункой ГПРУ работает на жидком топливе.

Горелка типа ГГВ

Горелка газовая вихревая предназначена для использования в котлах, печах, сушилах, теплогенераторах. Может работать на газе *низкого* или *среднего* давления и на жидком топливе. Рабочее давление горелок на газе низкого давления — 130, среднего — 2000 мм. вод. ст., что соответствует режимам эксплуатации сетей низкого (до 160 мм вод. ст.) и среднего (до 4500 мм вод. ст.) давления.

Полное сгорание топлива обеспечивается при коэффициенте избытка воздуха 1,02—1,03, что позволяет повысить КПД теплоагрегата дополнительно на 2%.

Широкий диапазон рабочего регулирования (коэффициент рабочего регулирования ≥ 7) обеспечивает устойчивый режим при коэффициентах избытка воздуха от 0,4 до 2,5.

Горелки обеспечивают *пониженное содержание оксидов азота* и отсутствие продуктов неполного сгорания топлива.

Типовой ряд горелок охватывает диапазон номинальных расходов газа от 10 до 1500 м³/ч.

При оснащении форсункой ГТВ работает на жидком топливе.

Малотоксичная горелка на жидком топливе

Предназначена для подогрева потока воздуха за счет сжигания в нем жидкого топлива с высокой полнотой сгорания, без видимого факельного излучения, с низким содержанием токсичных элементов (разработчик ОЛГП НИЧ КГТУ им. А. Н. Туполева). Применяется для подогрева и сушки асфальто-битумных смесей, котельных агрегатов, камер сгорания газотурбинных двигателей.

Основные технические характеристики

| | |
|---|----------------------------|
| Расход топлива, кг/с, для горелок: | |
| низкорасходных | < 0,1 |
| высокорасходных | < 0,2 |
| Температура газов, °С | 700—1800 |
| Топливо | Жидкое (дизельное, печное) |
| Давление подачи: | |
| топлива при работе на атмосферном воздухе (нормальное), мПа | 0,5 |
| воздуха, кПа | $\geq 2,0$ |

Достижимый эффект

устранение дымления за счет высокой полноты сгорания топлива при работе асфальто-битумных заводов;

экономия расхода топлива при работе асфальто-битумных заводов до 50 % по сравнению с имеющимися горелками.

Аппараты с погружными горелками (погружного горения) — АПГ

К современному теплоиспользующему оборудованию относятся АПГ, предназначенные для нагрева и выпаривания растворов кислот, минеральных солей, сточных вод, содержащих шламы, взвеси и механические примеси [22—24].

Механизм работы АПГ характеризуется барботажными процессами, протекающими между продуктами сгорания и растворами.

Продукты сгорания получают при сжигании газообразного или жидкого топлива в горелке, сопло которой помещено в жидкость на некоторую глубину. При этом продукты сгорания, барботируя, образуют при всплывании газовых пузырьков большую поверхность тепло- и массообмена.

Интенсивное испарение раствора достигается насыщением газовых пузырьков парами воды за счет теплоты жидкости. Выпаривание жидкости в этом случае протекает при равновесной температуре, которая для воды при атмосферном давлении на 15—16 °С ниже температуры кипения [24].

Характерно, что при равновесной температуре газовые пузырьки полностью насыщаются водяным паром и уходят из водных растворов в виде парогазовой смеси с температурой на 1—2 °С выше температуры испарения. Поэтому при непосредственном контакте продуктов сгорания с жидкостью процессы тепло- и массообмена протекают с резким снижением теплотерь. Коэффициент использования теплоты сгорания топлива 95—96 %.

Большинство АПГ применяется для выпаривания агрессивных и кристаллизующихся растворов. Широко используются АПГ в области обезвреживания промышленных сточных вод, содержащих минеральные соли и органические вещества, пригодные для извлечения ценных продуктов: сточные воды невозможно выпаривать в обычных трубчатых аппаратах.

Обезвреживание промышленных стоков с помощью АПГ давно привлекает внимание работников промышленности, поскольку после упаривания сточных вод остается конденсат, пригодный для повторного водопотребления, а полученный концентрат может служить в качестве сырья.

Включение АПГ в состав оборудования технологической схемы любого производства позволяет:

- полностью прекратить сброс загрязненных сточных вод в природные водоемы;

- сократить потребление свежей воды из природных источников: создать благоприятные санитарно-гигиенические условия на производстве;

- регулировать расход воды в системах оборотного водоснабжения за счет стабильности температуры, солесодержания рН и других характеристик, определяющих пригодность очищенных стоков;

- снизить капитальные затраты на сооружение очистных сооружений;

- получить экономический эффект при утилизации сточных вод для выработки дополнительной продукции и сырья.

Практика показала, что высокие результаты возможны при использовании АПГ в химической промышленности, где они — единственное надежное и долговечное оборудование для концентрирования растворов кислот и минеральных солей. Эффективность дос-

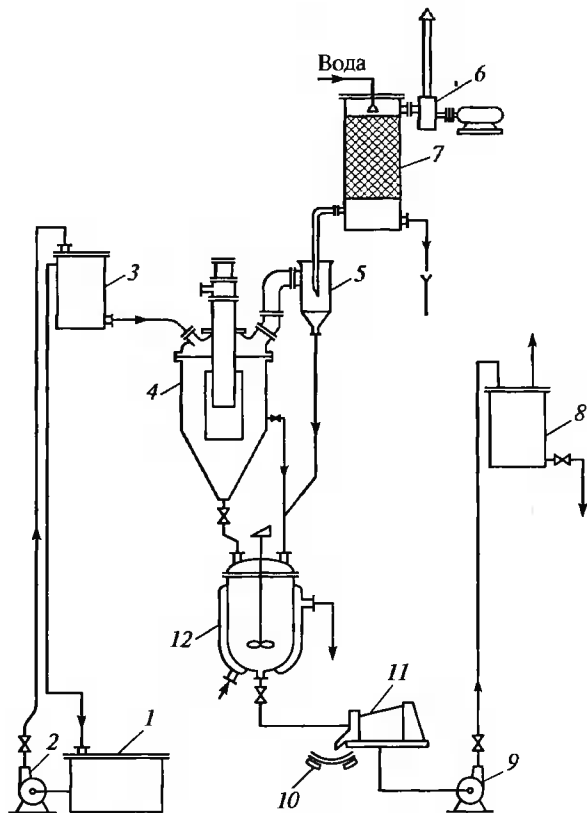


Рис. 12.21. Установка погружного горения:

1 — сборник исходного раствора; 2, 9 — насосы; 3 — расходный бак; 4 — АПГ; 5 — каплеотделитель; 6 — вентилятор; 7 — скруббер с насадкой из колец Рашига; 8 — сборник готового продукта; 10 — транспортер; 11 — центрифуга; 12 — кристаллизатор

тигается в металлургической промышленности при регенерации отработанных травильных растворов с извлечением ценных веществ.

В технологической схеме выпарной установки погружного горения (рис. 12.21) исходный раствор из сборника 1 подается насосом 2 в расходный бак 3, откуда самотеком поступает в выпарной АПГ 4. При сжигании природного газа в погружной горелке дымовые газы контактируют с раствором, который нагревается до температуры испарения и полного насыщения их парами воды.

Для создания интенсивного перемешивания раствора и избежания осаждения кристаллов солей на стенках аппарата погружная горелка размещается в циркуляционной трубе, создающей эйр-лифтное движение раствора за счет потока дымовых газов. Паро-

газовая смесь из аппарата 4 поступает через каплеотделитель циклонного типа 5 в скруббер 7, где пары воды конденсируются при орошении парогазовой смеси холодной водой. Конденсат из скруббера удаляется в систему оборотного водоснабжения, а охлажденные дымовые газы выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу. Концентрированный раствор, полученный в АПГ, отводится в кристаллизатор 12, где охлаждается водой, поступающей в рубашку. В зависимости от свойств насыщенного раствора и размера кристаллов солей охлажденный раствор направляется на разделение в барабанный фильтр или центрифугу. Маточник, образованный после фильтрации, насосом 9 подается в сборник 8 для дальнейшего использования в производстве.

В некоторых производствах: кислот, минеральных солей, синтетических волокон, полимерных материалов, а также ряде нефтехимических, целлюлозно-бумажных, коксохимических, где процессы выпаривания и концентрирования агрессивных растворов характеризуются большим расходом тепловых и энергетических ресурсов, с помощью АПГ решается основная проблема — утилизация газовых, жидких и твердых отходов [22—24].

12.10. Установка для производства защитной атмосферы

Основана на принципе сжигания углеводородов и последующей очистки продуктов сгорания от вредных примесей. Получаемая азотводородная субстанция используется в производстве флот-стекла, в металлургии и машиностроении, в процессах термической и химико-термической обработки металлов и сплавов. На рис. 12.22 представлена технологическая схема процесса, разработанного в ОАО «Саратовский институт стекла». Состав получаемой азотводородной смеси, об. %: водород 0,5—20, азот 99,493—79,993; примеси: кислород — $\leq 0,003$, вода — $\leq 0,001$, диоксид углерода — $\leq 0,001$. На рис. 12.23 показано аппаратурно-технологическое оформление установки, имеющей следующие характери-

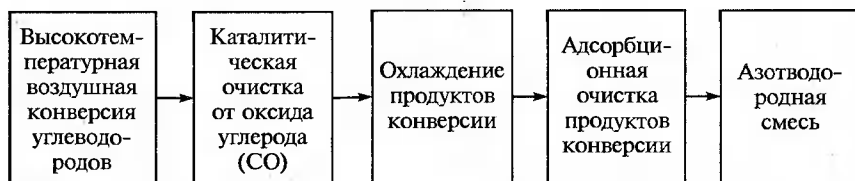


Рис. 12.22. Схема процесса получения защитной атмосферы

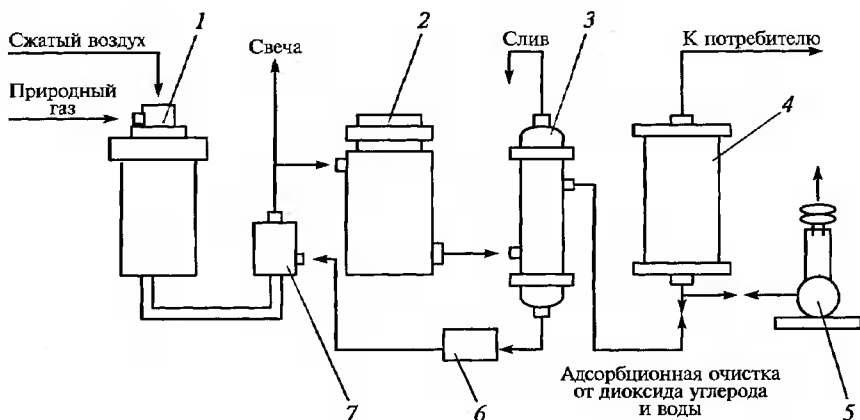


Рис. 12.23. Установка получения защитной атмосферы:

1 — камера сжигания; 2 — конвертер; 3 — теплообменник; 4 — адсорбер; 5 — вакуумный насос; 6, 7 — сборник и испаритель конденсата

стики: производительность — до $500 \text{ нм}^3/\text{ч}$; расход электроэнергии — до 200 кВт/ч ; расход природного газа — до $80 \text{ нм}^3/\text{ч}$; занимаемая площадь — до 150 м^2 .

Список литературы

1. Калыгин В. Г. Безопасность жизнедеятельности. — М.: Изд-во МГУИЭ, 2001. — 236 с.
2. Чехов О. С., Назаров В. И., Калыгин В. Г. Вопросы экологии в стекольном производстве. — М.: Легпромбытиздат, 1990. — 144 с.
3. Калыгин В. Г., Попов Ю. П. Порошковые технологии — экологическая безопасность и ресурсосбережение. — М.: Изд-во МГАХМ, 1996. — 212 с.
4. Исследование возможностей использования отработанных формовочных смесей в производстве стекла // Химическое и нефтяное машиностроение / Ю. Н. Скрынник, В. Г. Калыгин, Е. В. Петрова и др. — 1993. — № 5. — С. 30—31.
5. Патент РФ № 2001026. Способ подготовки стекольной шихты / П. Д. Саркисов, В. Г. Смирнов, Б. М. Боркоев и др. — 1993. — № 37—38.
6. Калыгин В. Г. Современная технология защиты окружающей среды от загрязнений стекольных производств // Стекло и керамика. — 1996. — № 1—2. — С. 3—7.
7. Мелконян Р. Г. Объемы и источники образования стеклобоя в Москве и московском регионе // Стекло и керамика. — 1999. — № 3. — С. 5, 7.
8. Калыгин В. Г., Нефедова Ю. А., Маньковская Л. Г. Концепция двойных технологий в процессах вторичной переработки силикатных отходов / Индустрия сервиса в XXI веке (2-я международная конференция). — М.: Изд-во МГУ сервиса, 2000. — С. 55—57.
9. Калыгин В. Г. Промышленная экология. — М.: МНЭПУ. 2000. — 240 с.

10. *Калыгин В. Г.* Вторичная переработка стеклобоя: технологии, оборудование, товарная продукция и экологическая безопасность / Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности. В 3-х т. Т. 2. — СПб.: Изд-во БГТУ, 1998. — С. 575—576.

11. Патент РФ № 2081858. Способ получения стеклянных микрошариков / В. В. Будов, В. Г. Калыгин, Г. В. Гусев и др. Приоритет от 21.10.1993.

12. Каталог «Промышленное оборудование для очистки воздуха». — М.: Элстат, 1997. — 45 с.

13. *Завьялов С. Н.* Мойка автомобилей: технология и оборудование. — М.: Транспорт, 1994. — 176 с.

14. *Чернышева Н. Б., Калыгин В. Г.* Разработка ресурсосберегающих передвижных автомоечных модулей системы «Бисер-Эковормит»: Тезисы докладов Международной конференции и V Международного симпозиума молодых ученых, аспирантов и студентов «Инженерная защита окружающей среды». — М.: Изд-во МГУИЭ, 2001. — С. 275.

15. *Елисеева Н. А., Калыгин В. Г.* Передвижная установка для очистки сточных вод стекольных производств: Материалы VI международного симпозиума молодых ученых, аспирантов и студентов «Техника и технология экологически чистых производств». — М.: Изд-во МГУИЭ, 2002. — С. 68—70.

16. *Преображенская Л. Б., Зарубин В. А., Никандрова А. В.* Популярно о ядерной энергетике. — М.: ИздАТ, 1993. — 48 с.

17. Утилизация плутония оружейного качества: Проспект НИИАР. — Димитровград-10: ГНЦ РФ НИИАР, 1998. — 2 с.

18. *Пушкин И. А.* Проблемы уничтожения (утилизации) химического оружия в Российской Федерации // Экология и промышленность России. — 1988. — № 12. — С. 37—40.

19. *Смирнов Л. А.* Оборудование для производства баллистических порохов по шнековой технологии и зарядов из них. — М.: МГАХМ, 1997. — 192 с.

20. *Шик А.* Психологическая акустика в борьбе с шумом / Под общ. ред. Н. И. Иванова. — СПб.: Изд-во БГТУ, 1995. — 224 с.

21. *Иванов Н. И.* Проблема акустического загрязнения окружающей среды / Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности. — СПб.: Изд-во БГТУ, 1998. — С. 60—71.

22. *Удыма П. Г.* Аппараты с погружными горелками. — М.: Машиностроение, 1973. — 270 с.

23. *Алабовский А. Н.* Выпарные аппараты погружного горения. — М., Киев: Вища школа, 1980. — 300 с.

24. *Алабовский А. Н., Удыма П. Г.* Аппараты погружного горения. — М.: Изд-во МЭИ, 1994. — 256 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Что лежит в основе стратегии разработки приоритетных путей развития и реализации новых технологий, отвечающих требованиям промышленной экологии?

2. Назовите новые способы экологической безопасности силикатных отходов. Какой из них наиболее перспективен?

3. Почему именно фильтровальная техника («сухие» способы) все чаще применяются при очистке газовых и газопылевых потоков в различных отраслях промышленности?

4. В чем заключается перспективность термического обезвреживания твердых отходов? Поясните на примере процесса пиролиза. Как протекают современные процессы обеззараживания отработанных моющих растворов (на примере прачечных производств и химчисток)?

5. Перечислите особенности функционирования автомобильных мочечных станций, включая мобильные (передвижные) установки.

6. Назовите перспективные концепции ядерной энергетики и современные возможности конверсионных технологий.

7. Для чего созданы и где применяются установки для производства защитной атмосферы?

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест

| Вещество | ПДК, мг/м ³ | | Класс опасности |
|--|------------------------|---------------------|-----------------|
| | максимальная разовая | точная | |
| Азота диоксид | 0,085 | 0,04 | 2 |
| Азота оксид | 0,6 | 0,06 | 3 |
| Аммиак | 0,2 | 0,04 | 4 |
| Ангидрид серный | 0,5 | 0,05 | 3 |
| Бенз(а)пирен | — | $0,1 \cdot 10^{-5}$ | 1 |
| Бензин (нефтяной малосернистый в пересчете на углерод) | 5 | 1,5 | 4 |
| Бензин сланцевый (в пересчете на углерод) | 0,05 | 0,05 | 4 |
| Бензол | 1,5 | 0,1 | 2 |
| Взвешенные вещества — недифференцированная по составу пыль (аэрозоль) в воздухе населенных пунктов | 0,5 | 0,15 | 3 |
| Водорода хлорид по молекуле HCl | 0,2 | 0,2 | 2 |
| Железа оксид в пересчете на железо | — | 0,04 | 3 |
| Железа сульфат в пересчете на железо | — | 0,007 | 3 |
| Кислота азотная по молекуле HNO ₃ | 0,4 | 0,15 | 2 |
| Кислота серная по молекуле H ₂ SO ₄ | 0,3 | 0,1 | 2 |
| Магния оксид | 0,4 | 0,05 | 3 |
| Соединения ртути в пересчете на ртуть | — | 0,0003 | 1 |
| Озон | 0,16 | 0,03 | 1 |

| Вещество | ПДК, мг/м ³ | | Класс опасности |
|-------------------------------------|------------------------|----------------|-----------------|
| | максимальная разовая | среднесуточная | |
| Пыль неорганическая, содержащая: | | | |
| > 70 % оксида кремния (динас и др.) | 0,15 | 0,05 | 3 |
| от 70 до 20 % (шамот, цемент) | 0,3 | 0,1 | 3 |
| < 20 % (доломит и др.) | 0,5 | 0,15 | 3 |
| Сажа | 0,15 | 0,05 | 3 |
| Сероводород | 0,008 | — | 2 |
| Углерода оксид | 5 | 3 | 4 |
| Фенол | 0,01 | 0,003 | 2 |
| Фенолы сланцевые | 0,007 | — | 3 |
| Кальция оксид* ² | 0,3 | — | — |

*¹ Не распространяется на аэрозоли органических и неорганических соединений, для которых устанавливаются соответствующие ПДК.

*² Ориентировочно безопасный уровень воздействия.

Приложение 2

ПДК загрязняющих веществ в воздухе рабочей зоны

| Вещество | ПДК, мг/м ³ | Агрегатное состояние* | Класс опасности |
|---|------------------------|-----------------------|-----------------|
| Азота оксиды в пересчете на NO ₂ | 2 | П | 3 |
| Аммиак | 25 | П + А | 4 |
| Бензин топливный (сланцевый, крекинг и др.) в пересчете на углерод | 100 | П | 4 |
| Бензол | 5+ | П | 2 |
| Дым пентактида ванадия | 0,1 | А | 1 |
| Пыль три- и пентактида ванадия | 0,5 | А | 2 |
| Пыль ванадийсодержащих шлаков | 4 | А | 3 |
| Возгоны каменноугольных смол и пеков при среднем содержании в них бенз(а)пирена, %: | | | |
| 0,075 | 0,2 | П | 2 |
| 0,075—0,15 | 0,1 | П | 1 |
| 0,15—0,3 | 0,05 | П | 1 |

| Вещество | ПДК, мг/м ³ | Агрегатное состояние* | Класс опасности |
|---|---------------------------|--------------------------|--------------------|
| Германий и его оксид | 2 | А | 3 |
| Гидразин-гидрат, гидразин и его производ. | 0,1 ⁺ | П | 1 |
| Каменный уголь с содержанием свободного диоксида кремния до 5 % | 10 | А | 4 |
| Нефть сырая | 10 | А | 3 |
| Озон | 0,1 | П | 1 |
| Ртуть металлическая | 0,01 | П | 1 |
| Серная кислота, серный ангидрид | 1 | А | 2 |
| Сернистый ангидрид | 10 | П | 3 |
| Сероводород | 10 ⁺ | П | 2 |
| Углеродная и угольная пыль с содержанием свободного диоксида кремния от 5 до 10 % | 4 | А | 4 |
| Шамот каолиновый | 6 | А | 4 |
| Щелочи едкие (растворы) в пересчете на NaOH | 0,5 | А | 2 |
| <i>Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия</i> | | | |
| Алюминия оксид (в том числе с примесью диоксида кремния) | 2 | — | 4 |
| Доломит | 6 | — | 4 |
| Зола горючих сланцев | 6 | — | 4 |
| Известняк | 6 | — | 4 |
| Магнезит | 10 | — | 4 |
| Сажи черные промышленные с содержанием 3,4-бенз(а)пирена ≤ 35 мг/кг | 4 | — | 4 |
| Асбест природный и искусственный | 2 | — | 4 |
| Асбестоцемент | 6 | — | 4 |
| Стекловолоконное и минеральное волокно | 4 | — | 4 |
| Цемент, глина | 6 | — | 4 |

* «А» — вещество находится в форме аэрозоля, «П» — пара; «+» означает, что вещество опасно и при поступлении через кожу.

**ПДК загрязняющих веществ в воде водных объектов
хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования**

| Вещество | ПДК, мг/л | Лимитирующий показатель вредности | Класс опасности |
|-------------------------|--------------|---|--------------------|
| Барий | 0,1 | Санитарно-токсикологический | 3 |
| Бенз(а)пирен | 0,000005 | То же | 1 |
| Бензол | 0,5 | » | 2 |
| Бериллий | 0,0002 | » | 1 |
| Винилхлорид | 0,05 | » | 2 |
| Диоксин* | — | » | 1 |
| Дифенил | 0,001 | » | 2 |
| Дихлорбромметан* | 0,03 | » | 2 |
| Кадмий | 0,001 | » | 2 |
| Марганец | 0,1 | Органолептический цветной | 3 |
| Медь | 1,0 | То же, появление привкуса | 3 |
| Нефть многосернистая | 0,1 | » , образование пленок на поверхности воды | 4 |
| Нефть прочая | 0,3 | » | |
| Нитраты | 45 | Санитарно-токсикологический | 3 |
| Нитриты | 3,3 | То же | 2 |
| Свинец | 0,03 | » | 2 |
| Тетраэтилсвинец | Отсутств. | Санитарно-токсикологический | 1 |
| Фенол | 0,001 | Органолептический, изменения запаса воды | 4 |
| Формальдегид | 0,05 | Санитарно-токсикологический | 2 |
| Цинк | 1,0 | Общесанитарный | 3 |

* Ориентировочно допустимый уровень.

Ввод в действие (по годам) мощностей по охране от загрязнения водных ресурсов и атмосферного воздуха

| Сооружения и системы | 1976—1980 | 1980 | 1995 | 1990 | 1991 | 1992 |
|--|-----------|------|------|------|------|------|
| Сооружения для очистки сточных вод, млн м ³ воды/сут | 29,8 | 5,3 | 2,5 | 2,0 | 1,3 | 0,8 |
| Системы оборотного водоснабжения, млн м ³ /сут | 42,7 | 13,1 | 20,8 | 8,4 | 3,9 | 1,4 |
| Установки для улавливания и обезвреживания вредных веществ из отходящих газов, млн м ³ газа/ч | 102,1 | 18,4 | 19,6 | 16,4 | 8,2 | 5,6 |

Окончание прил. 4

| Сооружения и системы | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Сооружения для очистки сточных вод, млн м ³ воды/сут | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 0,4 |
| Системы оборотного водоснабжения, млн м ³ /сут | 5,9 | 1,8 | 2,2 | 0,9 | 1,9 | 2,7 | 0,7 |
| Установки для улавливания и обезвреживания вредных веществ из отходящих газов, млн м ³ газа/ч | 4,3 | 5,9 | 7,5 | 6,3 | 3,1 | 1,7 | 3,8 |

Характеристика одиночных циклонов СЦН-40

| Диаметр, мм | Производительность, м ³ /ч | | | Примечания |
|-------------|---------------------------------------|------------------|------------------|--|
| | $v\pi = 1,3$ м/с | $v\pi = 1,6$ м/с | $v\pi = 1,9$ м/с | |
| 300 | 330 | 405 | 480 | 1. Гидравлическое сопротивление при $t = 20^\circ\text{C}$ 100—200 кгс/м ² 2. Скорость во входном патрубке циклона 16—24 м/с 3. Условная скорость в сечении корпуса циклона 1,3—1,9 м/с |
| 400 | 590 | 720 | 860 | |
| 500 | 920 | 1130 | 1340 | |

| Диаметр, мм | Производительность, м ³ /ч | | | Примечания |
|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|--|
| | $vп = 1,3$ м/с | $vп = 1,6$ м/с | $vп = 1,9$ м/с | |
| 500 | 920 | 1130 | 1340 | 4. Степень очистки в циклоне диаметром 1000 мм для пыли 10 мкм при $t = 20^\circ\text{C}$ — 95 % 5. Коэффициент гид- равлического сопро- тивления, отнесенный к сечению корпуса цик- лона, $\zeta = 1100$ |
| 600 | 1320 | 1630 | 1930 | |
| 700 | 1800 | 2215 | 2630 | |
| 800 | 2350 | 2890 | 3435 | |
| 900 | 2975 | 3660 | 4350 | |
| 1000 | 3670 | 4520 | 5370 | |
| 1200 | 5290 | 6510 | 7730 | |
| 1400 | 7200 | 8862 | 10525 | |
| 1600 | 9405 | 11575 | 13745 | |
| 1800 | 11900 | 14650 | 17400 | |
| 2000 | 14695 | 18085 | 21475 | |
| 2200 | 17780 | 21885 | 25990 | |
| 2400 | 21160 | 26045 | 30930 | |
| 2600 | 24835 | 30565 | 36300 | |
| 2800 | 28800 | 35450 | 42100 | |
| 3000 | 33060 | 40695 | 48325 | |

Характеристика износостойких циклонов СЦН-50

| Диаметр, мм | Производительность, м ³ /ч | | | Примечания |
|----------------|---------------------------------------|--------------|----------------|---|
| | $vH = 2,5$ м/с | $vH = 3$ м/с | $vH = 3,5$ м/с | |
| 400 | 1130 | 1350 | 1582 | 1. Гидравлическое сопротивление при $t = 20$ °С 80—180 кгс/м ² 2. Коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к сечению корпуса циклона, $\zeta = 180$ 3. Степень очистки циклона диаметром 1000 мм на пыли со средним размером частиц 20 мкм — 85 % |
| 500 | 1760 | 2119 | 2473 | |
| 600 | 2543 | 3052 | 3561 | |
| 700 | 3462 | 4154 | 4846 | |
| 800 | 4522 | 5426 | 6330 | |
| 900 | 5723 | 6867 | 8012 | |
| 1000 | 7065 | 8478 | 9891 | |
| 1200 | 10 174 | 12 208 | 14 243 | |
| 1400 | 13 847 | 16 617 | 19 386 | |
| 1600 | 18 086 | 21 704 | 25 321 | |
| 1800 | 22 891 | 27 469 | 32 047 | |
| 2000 | 28 260 | 33 912 | 39 564 | |
| 2200 | 34 195 | 41 033 | 47 872 | |
| 2400 | 40 694 | 48 833 | 56 972 | |
| 2600 | 47 759 | 57 311 | 66 863 | |
| 2800 | 55 390 | 66 467 | 77 545 | |
| 3000 | 63 585 | 76 302 | 89 019 | |

Техническая характеристика групповых высокоэффективных циклонов СЦН-40М

| Показатель* | Группа циклонов | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | четырёх | | | | шести | | | | восьми | | | |
| D , мм | 600 | 700 | 800 | 1000 | 600 | 700 | 800 | 1000 | 600 | 700 | 800 | 1000 |
| N , шт. | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Q 10^{-3} м ³ /ч | 6—7,3 | 8—10 | 10,5— 13 | 16—20 | 9—11 | 12—15 | 15— 19,5 | 24,4— 30,5 | 12— 14,6 | 16—20 | 2—26 | 32,5— 41 |
| ΔP , кПа | 1,56— 2,35 | 1,6— 2,4 | 1,65— 2,45 | 1,8— 2,5 | 1,56— 2,35 | 1,6— 2,4 | 1,65— 2,45 | 1,8— 2,5 | 1,56— 2,35 | 1,6— 2,4 | 1,65— 2,45 | 1,8— 2,5 |
| Ст. о., % ($d_{50} =$ $= 15$ мкм, $r_n =$ $= 2,7$ г/см ³) | 94 | 93 | 92 | 91 | 94 | 93 | 92 | 91 | 94 | 93 | 92 | 91 |

* D — диаметр циклонного элемента; N — количество элементов в группе; Q — объем очищаемого воздуха; ΔP — гидравлическое сопротивление; Ст. о. — степень очистки воздуха от пыли.

Стоимость фильтровальных материалов

| Материал | Стоимость | |
|---------------------------------|-----------------|---------------|
| | рукава*, ф. ст. | относительная |
| Полиарамид (номекс) | 31 | 1,0 |
| PMJN | 45 | 1,5 |
| PPS/PPS (ритон) | 45 | 1,5 |
| Стеклоткань | 48 | 1,6 |
| PPS/PTFE (ритон с пропиткой) | 64 | 2,1 |
| Со — полиимид (р 84) | 75 | 2,4 |
| ПТФЭ (тефлон) | 163 | 5,3 |
| Полиакрилонитрил | 13 | 0,4 |
| То же с поверхностным покрытием | 19 | 0,6 |

* Диаметр 200 мм, длиной 3500 мм.

Термостойкость и относительная стоимость фильтровальных материалов
(по данным фирмы *Flakt (Du Pont 5)*)

| Материал | Термостойкость, °С | Относительная стоимость |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|
| Стеклоткань | 270 | 1,0 |
| Дралон-Т | 125 | 1,0 |
| Полиарамид (номекс) | 200—210 | 2,9 |
| Ритон (5p0) | 180—190 | 3,5 |
| Стекланный войлок | 250 | 3,6 |
| Номекс/ПТФЭ каркас | 200—210 | 4,5 |
| Ритон 5p0/ПТФЭ каркас | 180—190 | 4,8 |
| Тефлон | 250 | 10 |
| Тефэр | 250 | — |

**Технические характеристики рукавных фильтров
(ТУ 3646-002-05799284—98)**

| Характеристика | ФРИ-30 | ФРИ-60 | ФРИ-90 | ФРИ-180 | ФРИ-360 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч, ≤ | 2784 | 5568 | 8352 | 16 896 | 33 792 |
| Площадь поверхности фильтрования, м ² , ≥ | 30 | 60 | 90 | 180 | 360 |
| Количество секций | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 |
| Количество рукавов | 36 | 72 | 108 | 144 | 288 |
| Диаметр рукава, мм | 135 | 135 | 135 | 135 | 135 |
| Длина рукава, м | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Количество мембранных клапанов | 6 | 12 | 18 | 24 | 48 |
| Удельная газовая нагрузка, м ³ /(м ² ·мин), ≤ | 1,55 | 1,55 | 1,55 | 1,55 | 1,55 |
| Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на входе, г/м ³ | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на выходе, г/м ³ , ≤ | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Гидравлическое сопротивление, кПа | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Давление продувочного воздуха, МПа | 0,3—0,6 | 0,3—0,6 | 0,3—0,6 | 0,3—0,6 | 0,3—0,6 |
| Расход продувочного воздуха, % от объема очищаемого газа | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| Допустимое давление (разрежение) в аппарате, кПа | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Масса, кг, ≤ | 1150 | 1950 | 2800 | 4200 | 9000 |

Примечание. Выпускаются также фильтры ФРИ-630-01-Щ(П); ФРИ-800-01-Щ(П); ФРИ-1250-01-Щ(П); ФРИ-1600-01-Щ(П); ФРИ-1920-01-Щ(П); ФРИ-3840-01-Щ(П); ФРИ-8000-01-Щ(П).

Технические характеристики рукавных фильтров типа ФРКИ

| Тип | Объем очищенного газа, м ³ /ч, ≤ | $L_{\phi} \times B_{\phi} \times H_{\phi}$, м | M_{ϕ} , кг | Расход сжатого воздуха, м ³ /ч (н. у.) | Установленная мощность, кВт |
|------------------|---|--|-----------------|---|-----------------------------|
| ФРКИ-5-П1-2-1 | 480 | 1,9 × 0,6 × 2,6 | 223 | 1,2 | 0,07 |
| ФРКИ-10-П1-2-1 | 960 | 1,9 × 0,6 × 3,6 | 446 | 1,2 | 0,07 |
| ФРКИ-15-П1-2-1 | 1440 | 1,9 × 0,8 × 3,6 | 670 | 3,6 | 0,15 |
| ФРКИ-20-П1-2-1 | 1920 | 1,9 × 1,0 × 3,5 | 705 | 2,4 | 0,11 |
| ФРКИ-30-П1-2-1 | 2880 | 1,9 × 1,5 × 3,6 | 950 | 3,6 | 0,15 |
| ФРКИ-60-Щ1-2-2 | 5760 | 2,9 × 2,0 × 4,1 | 2220 | 7,2 | 1,77 |
| ФРКИ-90-Щ1-3-2 | 8640 | 2,8 × 2,0 × 4,6 | 2635 | 7,2 | 1,77 |
| ФРКИ-120-Щ1-2-2 | 11520 | 5,6 × 2,1 × 4,1 | 4210 | 14,4 | 2,01 |
| ФРКИ-135Щ1-3-2 | 12960 | 4,3 × 1,9 × 5,1 | 3740 | 10,8 | 1,89 |
| ФРКИ-180-П4-3-1 | 17280 | 5,6 × 1,9 × 5,1 | 4860 | 14,4 | 2,01 |
| ФРКИ-240-Щ2-2-3 | 23040 | 5,6 × 4,0 × 4,1 | 8120 | 28,8 | 3,99 |
| ФРКИ-360-П8-3-3 | 34560 | 5,8 × 4,2 × 4,8 | 8750 | 48 | 0,99 |
| ФРКИ-450-П10-3-3 | 43260 | 7,2 × 4,2 × 4,9 | 10940 | 36 | 1,23 |
| ФРКИ-600-П2-5-1 | 57600 | 5,4 × 3,2 × 7,8 | 8520 | 14,6 | 0,51 |

Рукавные циклонные фильтры

| Обозначение | F^* , м ² | Рукавов | Исполнение |
|----------------|------------------------|---------|------------------|
| РЦИЭ5,2-8-01 | 5,2 | 8 | Правое |
| РЦИЭ5,2-8-06 | 5,2 | 8 | Правое без днища |
| РЦИЭ6,9-16-01 | 6,9 | 16 | Правое |
| РЦИЭ6,9-16-02 | 6,9 | 16 | Левое |
| РЦИЭ10,4-16-02 | 10,4 | 16 | Левое |
| РЦИЭ15,6-24-04 | 15,6 | 24 | Левое с люком |
| РЦИЭ23,4-36-01 | 23,4 | 36 | Правое |
| РЦИЭ23,4-36-02 | 23,4 | 38 | Левое |
| РЦИЭ23,4-36-03 | 23,4 | 48 | Правое с люком |
| РЦИЭ31,2-48-01 | 31,2 | 48 | Правое |
| РЦИЭ31,2-48-02 | 31,2 | 48 | Левое |

| Обозначение | F^* , м ² | Рукавов | Исполнение |
|----------------|------------------------|---------|----------------|
| РЦИЭ31,2-48-03 | 31,2 | 48 | Правое с люком |
| РЦИЭ31,2-48-04 | 31,2 | 48 | Левое с люком |
| РЦИЭ40,8-48-01 | 40,8 | 48 | Правое |
| РЦИЭ40,8-48-02 | 40,8 | 48 | Левое |
| РЦИЭ46,8-72-02 | 46,8 | 72 | Левое |
| РЦИЭ1,7-4-01 | 1,7 | 4 | Правое |
| РЦИЭ1,7-4-02 | 1,7 | 4 | Левое |
| РЦИЭ3,9-9-0,1 | 3,9 | 9 | Правое |
| РЦИЭ3,9-9-0,2 | 3,9 | 9 | Левое |

* Площадь поверхности фильтрации.

Фильтры РЦИЭ (рукавные циклонные с импульсной продувкой и электронным прибором управления) применяются в аспирационных и всасывающих пневмотранспортных установках с разрежением до 10 кПа.

Фильтры — разгрузители РЦИРЭ используются в нагнетающих пневмотранспортных установках при давлении до 3 кПа.

Фильтры типа РЦИЭК предназначены для очистки запыленных газов с температурой не более 120 °С и влажностью, исключающим конденсацию влаги в фильтре.

Приложение 13

Техническая характеристика электрофильтров с верхним расположением механизмов встряхивания электродов

| Типоразмер электрофильтра | Производительность по очищаемому газу*, м ³ /ч | Площадь, м ² | |
|---------------------------|---|-------------------------|-----------------------|
| | | активного сечения | поверхности осаждения |
| ЭГАВ1-10-4-4-4 | 38 160 | 10,6 | 819,2 |
| ЭГАВ1-10-4-6-3 | 38 160 | 10,6 | 921,6 |
| ЭГАВ1-14-7,5-4-4 | 100 170 | 27,8 | 2150,4 |
| ЭГАВ1-14-7,5-6-3 | 100 170 | 27,8 | 2419,2 |
| ЭГАВ1-20-7,5-4-4 | 143 100 | 39,8 | 3072,0 |
| ЭГАВ1-20-7,5-6-3 | 143 100 | 39,8 | 3456,0 |
| ЭГАВ1.30-7,5-4-4 | 214 650 | 59,6 | 4608,0 |
| ЭГАВ1-30-7,5-6-3 | 214 650 | 59,6 | 5184,0 |
| ЭГАВ1-40-7,5-4-4 | 286 200 | 79,5 | 6144,0 |

| Типоразмер электрофильтра | Производительность по очищаемому газу*, м ³ /ч | Площадь, м ² | |
|---------------------------|---|-------------------------|-----------------------|
| | | активного сечения | поверхности осаждения |
| ЭГАВ1-40-7,5-6-3 | 286 200 | 79,5 | 6912,0 |
| ЭГАВ1-40-9-4-4 | 343 440 | 95,4 | 7372,8 |
| ЭГАВ1-40-9-6-3 | 343 440 | 95,4 | 8294,4 |
| ЭГАВ2-56-9-6-3 | 480 816 | 133,6 | 11612,2 |
| ЭГАВ2-56-9-4-4 | 480 816 | 133,6 | 10321,9 |
| ЭГАВ2-56-9-6-3 | 652 536 | 181,3 | 15759,4 |

* При условной скорости 1 м/с.

| | |
|---|-----------|
| Входная запыленность очищаемого газа, г/м ³ | ≤ 90 |
| Температура очищаемого газа, °С | ≤ 330 |
| Допустимое разрежение внутри аппарата, кПа (кгс/м ²) | 15 (1500) |
| Энергетические затраты на очистку 1000 м ³ газа, кВт·ч | 0,4—1,3 |

Приложение 14

Прогрессивные мембранные технологии для промышленности

| Установка | Область использования | Техническая характеристика |
|--|---|---|
| Мембранные по подготовке воды для питания водонагревательных систем — УМВС | Подготовка воды для батарейных котельных и т. д. с обратнo-осмотическим обессоливанием для водогрейных котлов и дополнительным ионитным умягчением для паровых котлов | Производительность по умягченной воде 0,5—100 м ³ /ч |
| Для производства глубокообессоленной воды — УПДВ | Получение глубокообессоленной воды с удельным сопротивлением $\rho \leq 18$ МОм·см для электронной, фармацевтической стекольной и других отраслей | Производительность по обессоленной воде 50—10000 л/ч. Содержит мембранный модуль и узел ионитного умягчения |

| Установка | Область использования | Техническая характеристика |
|---|--|---|
| Регенерации соляной кислоты из отработанных травильных растворов (ОТР), содержащих хлорид железа — УРТР | Предочистка, ультрафильтрация, электролиз, гидролиз и адсорбция | Производительность: 0,300 м ³ /ч. Выход соляной кислоты (в пересчете на Сl-ионы): ≥ 90,0 %. Концентрация регенерированной кислоты 20 ± 4 масс. % |
| Ультрафильтрационные для разделения водомасляных эмульсий: УМ-Т и УМ-Т/ФСУ | С трубчатыми ультрафильтрами БТУ 0,5/2 — для регенерации отработанных моющих и обезжиривающих растворов, утилизации отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), улавливания и концентрирования масел и нефтепродуктов, на постах мойки автотранспорта и др. | Производительность 0,15—6,0 м ³ /ч. Остаточное содержание нефтепродуктов в фильтрате: 10—30 мл/л (УМ-Т); ≤ 3 мл/л (УМ-Т/ФСУ). Могут доукомплектовываться адсорбционным фильтром |
| Очистки сточных вод гальванических производств — УМГ | Очистка промывных вод и регенерация отработанных рабочих, моющих и обезжиривающих растворов и электролитов после хромирования, никелирования, омеднения, оцинкования и т. д. | В состав входят: узел очистки промывных вод, узлы регенерации моющих и обезжиривающих растворов, регенерации растворов электролитных ванн и отработанных травильных растворов |
| Очистки дренажных вод полигонов ТБО-УОДВ | Очистка дренажных вод, содержащих биологически разлагаемые и трудноразлагаемые вещества, азот (в виде аммония), растворимые соли, тяжелые металлы. Очищенная вода соответствует ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения | Производительность по очищенной воде 0,5—5,0 м ³ /ч. Комплектность: узлы электрохимической обработки, двухступенчатой фильтрации, обратно-осмотического модуля, адсорбционной очистки и испарителя |

Нормы шума на рабочих местах*

| Страны | Допустимый уровень звука, дБА |
|--|-------------------------------|
| Австралия, Финляндия, Франция, Германия, Венгрия, Израиль, Италия, Норвегия, Испания, Швеция, Англия | 85 |
| Китай | 70—80 |
| Канада | 85—90 |
| Россия | 80 |
| США | 90 |

* Рекомендации рабочей группы Европейской комиссии: 85 дБА.

Уровни акустической (звуковой) мощности промышленного оборудования L_w , дБ

| Оборудование | Средняя геометрическая частота, Гц | | | | | | | |
|--|------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Станок токарно-револьверный с программным управлением | 93 | 92 | 90 | 90 | 86 | 82 | 78 | 76 |
| Станок фрезерный с программным управлением | 85 | 86 | 88 | 91 | 90 | 86 | 78 | 70 |
| Сверлильный автомат | 80 | 86 | 88 | 94 | 100 | 90 | 89 | 89 |
| Газовая резка | 94 | 95 | 97 | 92 | 96 | 87 | 102 | 103 |
| Штамповочный автомат (АТ60) | 98 | 102 | 102 | 105 | 101 | 99 | 92 | 92 |
| Всасывающие/выхлопные воздуховоды от компрессоров низкого давления: | | | | | | | | |
| 205 ВП-30/8 | 121 | 127 | 117 | 108 | 100 | 94 | 90 | 89 |
| | 106 | 108 | 117 | 118 | 115 | 109 | 106 | 107 |
| 2СА-25 | 111 | 106 | 96 | 95 | 87 | 80 | 76 | 76 |
| | 103 | 97 | 96 | 93 | 96 | 102 | 110 | 112 |
| Всасывающие/выхлопные воздуховоды от компрессоров высокого давления: | | | | | | | | |
| 20-3/220 | | | 97 | 86 | 80 | 75 | 71 | 69 |
| | 108 | 112 | 117 | 122 | 128 | 128 | 127 | 126 |
| К 250 61 | 84 | | | 82 | 94 | 99 | 98 | |
| | 119 | 117 | 120 | 124 | 124 | 130 | 133 | 130 |

Приборы для контроля акустического загрязнения

| Шумомер | Микрофон | Диапазоны | |
|----------|----------------------|------------------------|------------------|
| | | частот, Гц | уровней шума, дБ |
| СИ 1 | М101, конденсаторный | 2—45 · 10 ³ | 50—130 |
| ВМ 292 А | То же | 8—32 · 10 ³ | 44—130 |
| ИШВ1 | » | 3—20 · 10 ³ | 30—130 |
| 140 ОЕ | Кристаллический | 8—32 · 10 ³ | 24—140 |

Влияние вибрации на организм человека

| Амплитуда колебаний вибрации, мм | Частота вибрации, Гц | Результат воздействия |
|----------------------------------|----------------------|---|
| ≤ 0,015 | Разная | Не влияет на организм |
| 0,016—0,050 | 40—50 | Нервное возбуждение с депрессией |
| 0,051—0,100 | 40—50 | Изменение в центральной нервной системе, сердце и органах слуха |
| 0,101—0,300 | 50—150 | Возможное заболевание |
| 0,101—0,300 | 150—250 | Виброблезнь |

Допустимые уровни общей вибрации (ОВ)

| Средняя геометрическая частота, Гц | Допустимые значения по осям x, y, z | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|------|--------|------|----------------------------------|-------|--------|------|
| | виброскорости, см/с | | ОВ, дБ | | виброускорения, м/с ² | | ОВ, дБ | |
| | z | x, y | z | x, y | z | x, y | z | x, y |
| 1,0 | 20,0 | 6,3 | 132 | 122 | 1,12 | 0,4 | 71 | 62 |
| 2,0 | 7,1 | 3,5 | 123 | 117 | 0,8 | 0,4 | 68 | 62 |
| 4,0 | 2,5 | 3,2 | 114 | 116 | 0,56 | 0,8 | 65 | 68 |
| 8,0 | 1,3 | 3,2 | 108 | 116 | 0,56 | 1,6 | 65 | 74 |
| 16,0 | 1,1 | 3,2 | 107 | 116 | 1,12 | 3,15 | 71 | 80 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 63 | 1,1 | 3,2 | 107 | 116 | 4,50 | 12,50 | 83 | 92 |

Допустимые уровни локальной вибрации (ЛВ)

| Средняя геометическая частота, Гц | Допустимые значения по осям z, x, y | | | |
|---|-------------------------------------|--------|-----------------------|--------|
| | виброускорение, м/с ² | ЛВ, дБ | виброскорость, м/с | ЛВ, дБ |
| 8 | 1,4 | 73 | 2,8 | 115 |
| 16 | 1,4 | 73 | 1,4 | 109 |
| 31,5 | 2,7 | 79 | 1,4 | 109 |
| 63 | 5,4 | 85 | 1,4 | 109 |
| 125 | 10,7 | 91 | 1,4 | 109 |
| 250 | 21,3 | 97 | 1,4 | 109 |
| 500 | 42,5 | 103 | 1,4 | 109 |
| 1000 | 85,0 | 109 | 1,4 | 109 |

Виды демфирующих покрытий

| Покрытия мастичные | η^* | Покрытия листовые | η^* |
|-----------------------|----------|----------------------|----------|
| Пластик № 378 | 0,45 | Пенопласт ПХВ-Э | 0,85 |
| Мастика А-2, ВД-17-63 | 0,40 | Волосяной войлок | 0,23 |
| Мастика ВД-17-58 | 0,44 | Поролон | 0,22 |
| Мастика ВД-17-59 | 0,30 | Минераловатная плита | 0,04 |
| Пластикат «Агат» | 0,46 | Губчатая резина | 0,15 |
| ВПМ-1 | 0,18 | Винипор технический | 0,40 |
| ВПМ-2 | 0,22 | Радуга | 0,30 |
| Антивибрит М | 0,20 | Фольгоизол | 0,27 |
| Адем-НШ | 0,25 | | |

* Коэффициент потерь энергии (для $f = 1$ кГц).

Допустимое время воздействия вибрации τ , мин

| Вибрация | Превышение уровней вибрации над нормативными, дБ, \geq | | | | |
|-----------|--|-----|----|----|----|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 |
| Локальная | 320 | 160 | 80 | 40 | 40 |
| Общая | 480 | 120 | 60 | 30 | 15 |

Допустимые величины вибрации в производственных помещениях предприятий

| Амплитуда, мм | Частота, Гц | Скорость, см/с | Ускорение, см/с ² |
|---------------|-------------|----------------|------------------------------|
| 0,6—0,4 | ≤ 3 | 1,12—0,76 | 22—14 |
| 0,4—0,15 | 3—5 | 0,76—0,46 | 14—15 |
| 0,15—0,05 | 5—8 | 0,46—0,25 | 15—13 |
| 0,05—0,03 | 8—15 | 0,25—0,28 | 13—27 |
| 0,03—0,009 | 15—30 | 0,28—0,17 | 27—32 |
| 0,009—0,007 | 30—50 | 0,17—0,22 | 32—70 |
| 0,007—0,005 | 50—75 | 0,22—0,23 | 70—112 |
| 0,005—0,003 | 75—100 | 0,23—0,19 | 112—120 |
| 1,5—2 | 45—55 | 1,5—2,5 | 25—40 |

Примечание. Приведенные нормы одинаковы для горизонтальных и вертикальных вибраций. Непрерывность их воздействия не должна превышать 10—15 % рабочего времени.

Приложение 24

Основные единицы измерения активности и интенсивности полей излучения

| Величина (обозначение) | Единица измерения | | Связь между единицами |
|--|---|--------------------------|--|
| | международная | внесистемная | |
| Активность (А) | Беккерель (Б) = = 1 расп/с | Ки | 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с = = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк 1 Ки = 10^3 мКи = 10^6 мкКи |
| Плотность потока (I) | Ватт на м ² (Вт/м ²) или то же Дж/(м ² ·с) | Эрг/(см ² ·с) | 1 эрг/(см ² ·с) $1 \cdot 10^{-3}$ Дж/м ² = = $1 \cdot 10^{-3}$ Вт/м ² |
| Мощность экспозиционной дозы (P ₁) | Кулон на килограмм в 1 с (Кл/кг·с) | Р/с | 1 Р/с = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/(кг·с) 1 Кл/(кг·с) = $3,88 \cdot 10$ Р/с Связь между мощностью P ₁ и активностью Q (мКи) $P_1 = QK_{\gamma} \cdot 10^3 / R^2$ мР/ч, где K _γ — постоянная радионуклида; R — расстояние, см и плотность потока I |

| Величина (обозначение) | Единица измерения | | Связь между единицами |
|--|--------------------|-------------------|---|
| | междуна- родная | внесис- темная | |
| | | | $P_1 = I_\gamma / 0,11 =$ $= [(1,6 \cdot 10^6 \gamma) / 0,11] N h_\gamma, \text{ P/c,}$ <p>где γ — линейный коэффициент электронного преобразования в воздухе, P, см²/(ч · мКи); N — число γ-квантов, пересекающих площадь в 1 см² за 1 с; h_γ — энергия γ-квантов, МэВ; $1,6 \cdot 10^6$ — число эрг в МэВ; I — плотность потока, МэВ; 0,11 — энергетический эквивалент рентгена в воздухе</p> |
| Экспозиционная доза ($D_{\text{эксп}}$) | Кл/кг | P | $1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ $1 \text{ Кл/кг} = 3,38 \cdot 10^3 \text{ P}$ |
| Поглощенная доза (D) равна отношению средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе (dm) вещества в этом объеме | Грей (Гр) | рад | $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/с} =$ $= 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$ $D = d_{\text{ср}}/dm$ |
| Мощность поглощенной дозы (P) | Гр/с | рад/с | $1 \text{ рад/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с}) =$ $= 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр/с}$ |
| Эквивалентная доза (H) | Зиверт (Зв) | Бэр | $1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад/К} =$ $= (1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр})/\text{К} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}$ $H = DK,$ <p>где K — средний коэффициент качества. Для излучения, состоящего из нескольких компонентов, $H = \sum D_i K_i$ — поглощенная доза, $K_{i\gamma}$ — компонента излучения и его среднего коэффициента качества</p> |

| Величина (обозначение) | Единица измерения | | Связь между единицами |
|---|--------------------|-------------------|---|
| | междуна- родная | внесис- темная | |
| Мощность эквивалентной дозы (H_1) | Зв/с | бэр/с | — |
| Миллиграмм- эквивалент | — | мг-экв. Ra | 1 мг-экв. Ra = 2,0 нГр · м ² /с 1 мг-экв. Ra = 8,4 Р/(ч · см ²) |

Приложение 25

**Содержание естественных радионуклидов
в отходах химической промышленности, Бк/кг**

| Вид отходов | Источник сырья | ²³² Th | ²²⁶ Ra | ⁴⁰ K |
|---------------|---|-------------------|-------------------|-----------------|
| Шлак (щебень) | Кольский апатит | 14,4 | 158,7 | 100 |
| Шлак (пыль) | То же | 15,9 | 99,9 | 148 |
| Шлак | » | 4,1 | 135,4 | 167 |
| То же | » | 16,7 | 173,9 | 78 |
| Шлак (литой) | » | 19,2 | 163,7 | 137 |
| То же | Ала-Тау | 19,6 | 225,7 | 107 |
| Фосфогипс | То же | 14,1 | 50,0 | 22 |
| То же | Кольский апатит | 3,3 | 10,4 | 7 |
| » | Ковдорский апатит | 8,1 | 15,5 | 26 |
| » | То же | 10,4 | 70,3 | 180 |
| » | » | 32,2 | 18,1 | 70 |
| Огарки | » | 3,3 | 14,1 | 93 |
| То же | Сумский химический комбинат | 4,1 | 16,3 | 56 |
| » | Воскресенский химический комбинат | 3,3 | 15,2 | 52 |
| » | Тула | 3,3 | 13,7 | 52 |
| Пирит | Учалы | 3,3 | 8,1 | 41 |
| То же | Красноуральский медеплавильный завод | 3,7 | 7,4 | 56 |
| » | Свердловская область | 3,3 | 8,1 | 63 |

**Содержание естественных радионуклидов
в фосфатных удобрениях, Бк/кг**

| Тип удобрения | Страна | ²³² Th | ²²⁶ Ra | ⁴⁰ K |
|--------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Суперфосфаты | Российская Федерация | 20 | 790 | 2 |
| То же | Германия | 44 | 110 | 120 |
| » | США | 25 | 910 | 180 |
| Тройной | Германия | 48 | 780 | — |
| То же | США | 115 | 380 | 5900 |
| Фосфорно-калиевые | Германия | 30 | 310 | 41 |
| Азотно-фосфорные | То же | 48 | 100 | — |
| Фосфат аммония | Российская Федерация | 10 | 850 | — |
| Фосфат нитроаммония | То же | 63 | 20 | — |
| Азотно-фосфорно-калиевые | » | 15 | 210 | 5900 |

**Содержание естественных радионуклидов
в отходах предприятий цветной металлургии, Бк/кг**

| Вид отходов | Месторождение | ²³² Th | ²²⁶ Ra | ⁴⁰ K |
|------------------------|----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Шлак | Бокситогорское | 133,6 | 30,7 | 70 |
| Шлак | г. Шахты | 2,2 | 20,0 | 85 |
| Шлаковый песок | Кривой Рог | 5,2 | 1,5 | 63 |
| Шлак никелевый | То же | 3,0 | 30,0 | 48 |
| Шлак | Николаевское | — | — | — |
| Шлак свинцовый | Алмалыкское | 7,4 | 16,3 | 59 |
| Шлак медноцинковый | Гайское | — | — | — |
| Шлак полиметаллический | То же | — | 29,6 | 77 |
| Шлак медный | Норильское | — | 18,5 | 289 |
| То же | То же | — | 25,9 | 48 |
| Шлак полиметаллический | Кургапшинское | 1,1 | 74,0 | 537 |
| Шлак свинцовоцинковый | Горевское | — | — | 163 |
| Шлак медноцинковый | Ломовское | — | 14,8 | 407 |
| То же | Ловихское | — | 7,4 | 784 |
| Флюорит | Хайдыркенское | 8,5 | 29,6 | 222 |

**Содержание естественных радионуклидов
в шлаках предприятий черной металлургии, Бк/кг**

| Шлак | Город | ²³² Th | ²²⁶ Ra | ⁴⁰ K |
|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Доменный | Мариуполь | 49,6 | 133,6 | 144,0 |
| То же | То же | 8,1 | 18,5 | 15,0 |
| » | » | 55,1 | 111,0 | 189,0 |
| » | » | 89,5 | 132,3 | 159,0 |
| Щебень | » | 10,0 | 15,2 | 22,0 |
| Доменный | » | 22,6 | 64,3 | 155,0 |
| То же | » | 27,8 | 107,3 | 130,0 |
| Металлургический | Нижний Тагил | 23,3 | 55,5 | 130,0 |
| Отходы литья | Свирск | 37,0 | 25,9 | 63,0 |
| Доменный | Кемерово | 45,9 | 44,4 | 636,0 |
| То же | То же | 60,2 | 125,8 | 185,0 |
| » | » | 42,2 | 214,6 | 525,0 |
| Щебень | Липецк | 52,9 | 54,0 | 148,0 |
| Шлак | То же | 44,4 | 91,8 | 200,0 |
| Доменный | » | 41,4 | 81,0 | 74,0 |
| Конвертерный | » | 5,55 | 20,9 | 19,0 |
| Доменный | Оренбург | 24,1 | 57,0 | 163,0 |
| То же | » | 31,1 | 86,6 | 170,0 |
| » | Пермь | 12,2 | 26,6 | 89,0 |
| Гранулированный | Рязань | 31,8 | 114,7 | 207,0 |
| Доменный | Тула | 51,8 | 125,8 | 122,0 |
| То же | Днепродзержинск | 22,9 | 79,2 | 167,0 |
| Гранулированный | Алма-Ата | 28,9 | 122,1 | 81,0 |
| То же | То же | 9,25 | 66,6 | 33,0 |

**Содержание естественных радионуклидов
в строительных материалах из отходов производства, Бк/кг**

| Материал | ²³² Th | ²²⁶ Ra | ⁴⁰ K |
|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Шлакопортландцемент | 18,1 | 51,4 | 118 |
| То же | 21,5 | 53,3 | 215 |
| » | 30,3 | 121,7 | 70 |
| » | 27,8 | 47,7 | 137 |
| » | 18,5 | 34,0 | 122 |
| » | 14,8 | 38,5 | 214 |
| » | 7,4 | 29,6 | 122 |
| » | 16,3 | 57,7 | 100 |
| » | 25,2 | 67,3 | 111 |
| » | 31,5 | 105,8 | 192 |
| » марки М-300 | 21,5 | 40,7 | 167 |
| Шлакобетон | 22,2 | 74,0 | 440 |
| То же | 6,3 | 36,6 | 85 |
| » | 31,8 | 26,3 | 326 |
| » | 22,9 | 55,5 | 192 |
| » | 9,6 | 29,2 | 93 |
| » | 21,9 | 64,0 | 126 |
| » | 15,2 | 46,6 | 104 |
| » марки М-200 | 6,3 | 2,2 | 67 |
| » панели | 17,8 | 26,6 | 485 |
| Бетон на шлаке | 34,0 | 89,2 | 218 |
| Шлакоблоки | 38,9 | 24,5 | 377 |
| То же | 38,1 | 61,1 | 370 |
| Шлакокерамзит | 37,0 | 26,6 | 570 |
| Газозолобетон | 23,0 | 38,5 | 167 |

**Критерий оценки степени загрязнения атмосферного воздуха
по максимальным разовым концентрациям**

| Класс опасности загрязнения | Экологическое бедствие | | Чрезвычайная экологическая ситуация | |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | кратность превышения ПДК (К) | измерений выше ПДК, % | К | измерений выше ПДК, % |
| I | 5 | 30 | 3—5 | 30 |
| II | 7,5 | 30 | 5—7,5 | 30 |
| III | 12,5 | 50 | 8—12,5 | 50 |
| IV | 20 | 50 | 12,5—20 | 50 |

**Критерий оценки степени загрязнения атмосферного воздуха
по среднесуточным концентрациям**

| Класс опасности загрязнения | Экологическое бедствие | | Чрезвычайная экологическая ситуация | |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | Кратность превышения ПДК (<i>K</i>) | Процент проб выше <i>K</i> (или сут) | <i>K</i> | Процент проб выше <i>K</i> (или сут) |
| I | 3 | 20 или 7 сут* | 2—3 | 20 или 7 сут* |
| II | 5 | То же | 3—5 | То же |
| III | 7,5 | 30 сут | 5—7,5 | 30 сут |
| IV | 12 | 30 сут | 8,12 | 30 сут |

* Поряд.

**Динамика крупных катастроф в РФ и количества пострадавших
и погибших людей (данные МЧС)**

| Год | Число чрезвычайных ситуаций | | | Число граждан, тыс. | |
|------|-----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|---------|
| | всего | техногенного характера | природного характера | пострадало | погибло |
| 1991 | 334 | 209 | 125 | > 25 | 236 |
| 1992 | 1015 | 769 | 246 | > 68 | 947 |
| 1993 | 1032 | 905 | 127 | > 18 | 1320 |
| 1994 | 1322 | 1097 | 225 | > 51 | 2672 |
| 1995 | 1369 | 1088 | 281 | > 57 | 4679 |
| 1996 | 1454 | 1139 | 315 | > 20 | 2120 |

**Коэффициенты, отражающие конструкцию промышленного
(офисного, административного) здания**

| <i>K_{зд}</i> | | <i>K_р</i> | | | | <i>K_к</i> | | |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|---------|---------|--------|----------------------|-----------|------------------------|
| промышленное | офисно-административное | полное | сильное | среднее | слабое | бескаркасная | каркасная | монолитный железобетон |
| 14 | 23 | 1 | 0,87 | 0,56 | 0,35 | 1 | 2 | 3,5 |

| K_M | | | K_B | | | |
|----------------|-----------------|---|---|-------|------|--------|
| кир- пичная | дере- вянная | железобетонная слабо армированная | железобетон- ная нормально армированная | < 5 м | 5—15 | > 15 м |
| 1,5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 0,85 | 0,8 |

| K_C | | $K_{кр}$ | | | | |
|-----------------|---------------|----------|------|------|------|-------|
| несейсмостойкая | сейсмостойкая | 10 т | 20 т | 40 т | 60 т | 100 т |
| 1 | 1,5 | 1,05 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,45 |

Приложение 34

**Коэффициенты трения f между поверхностями различных
конструкционных материалов**

| | |
|---------------------------------|---------|
| Сталь по стали | 0,15 |
| Сталь по чугуну | 0,3 |
| Металл по линолеуму | 0,2—0,4 |
| Металл по дереву | 0,6 |
| Металл по бетону | 0,2—0,5 |
| Резина по твердому грунту | 0,4—0,5 |
| Резина по линолеуму | 0,4—0,5 |
| Резина по дереву | 0,5—0,8 |
| Резина по чугуну | 0,8 |
| Дерево по дереву | 0,4—0,6 |
| Кожа по чугуну | 0,3—0,5 |
| Кожа по дереву | 0,4—0,6 |

Приложение 35

**Коэффициенты аэродинамического сопротивления c_x
для объектов разной формы (при $P_{ф} < 50$ кПа)**

| Форма объекта | Движение воздуха | c_x |
|--|----------------------------------|-------|
| Параллелепипед | Перпендикулярно основанию | 0,85 |
| То же (основание — квадрат, дли- на боковой стороны в 3 раза боль- ше меньшей стороны основания) | Перпендикулярно боковой грани | 1,3 |
| Куб | Перпендикулярно грани | 1,5 |
| Пластина квадратная | Перпендикулярно пластине | 1,45 |
| Диск | Перпендикулярно диску | 1,6 |

| Форма объекта | Движение воздуха | c_x |
|-----------------------|---------------------------------|-------|
| Цилиндр: $h/d = 1$ | Перпендикулярно оси цилиндра | 0,4 |
| $h/d = 4$ | То же | 0,43 |
| $h/d = 9$ | » | 0,46 |
| Сфера | Вдоль поверхности | 0,25 |
| Полусфера | Параллельно плоскости основания | 0,3 |
| Пирамида | Параллельно основанию | 1,1 |

Приложение 36

Допустимые нагрузки болтов на разрыв

| Размер болта | M12 | M16 | M20 | M24 | M27 | M30 | M36 | M42 | M46 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| σ_p , кН | 17 | 26 | 41 | 60 | 78 | 96 | 14 | 200 | 290 |

Приложение 37

Основные нагрузки, воспринимаемые радиоэлектронной и оптической аппаратурой в процессе эксплуатации

| Аппаратура | Наземная | Авиационная |
|----------------------------------|-----------|-------------|
| Ударные сотрясения: | | |
| ускорение, m/c^2 | 10—15 | 6—12 |
| длительность, мс | 5—10 | ≤ 15 |
| Одиночные удары: | | |
| ускорение, m/c^2 | 50—1000 | — |
| длительность, мс | 0,5—10 | — |
| Линейное ускорение, m/c^2 | 2—5 | 4—10 |
| Вибрация: | | |
| частота, Гц | 10—70 | 5—2000 |
| ускорение, m/c^2 | 1—4 | ≤ 20 |
| Ветровая нагрузка: | | |
| рабочая, м/с | ≤ 50 | — |
| предельная, м/с | ≤ 70 | — |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|-------------------|---|
| Предисловие | 3 |
|-------------------|---|

ЧАСТЬ I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

| | |
|--|-----------|
| Глава 1. Основополагающие определения и принципы промышленной экологии | 5 |
| 1.1. Понятийно-терминологические определения и другие классификационные структуры | 5 |
| 1.2. Экологизированные (ресурсосберегающие) технологии | 10 |
| 1.3. Международный контроль и государственное управление качеством окружающей среды | 13 |
| 1.4. Контроль качества окружающей среды | 16 |
| 1.5. Стратегия взаимодействия общества и природы | 18 |
| Глава 2. Системный анализ экологически чистых производств | 22 |
| 2.1. Технические и химико-технологические системы | 22 |
| 2.2. Уровни и иерархии организации производственных процессов | 23 |
| 2.3. Алгоритм системной разработки и/или усовершенствования ресурсо-, энергосберегающей техники | 32 |
| Глава 3. Формирование и синтез энергосберегающих и экологически безопасных ТС и ХТС | 37 |
| 3.1. Подсистема подготовки сырья | 37 |
| 3.2. Подсистема надежности (обеспечения стабильности подготовки) | 53 |
| 3.3. Подсистема оценки качества полупродукта | 57 |
| 3.4. Подсистема переработки | 62 |
| 3.5. Подсистема природоохранной стратегии | 67 |
| Глава 4. Введение в курс промышленной пыле-, газоочистки и переработки отходов производств | 75 |
| 4.1. Основы инженерной реологии, физико-химической механики гомо- и гетерогенных систем, тепло- и массообменных процессов (на примере характеристик газообразных, жидких и твердых загрязнителей биосферы) | 75 |
| 4.2. Некоторые свойства и физические основы переноса аэрозольных частиц | 97 |

| | |
|---|------------|
| 4.3. Основные свойства и способы концентрирования растворов | 101 |
| 4.4. Физические и химические основы пылеочистки и очистки технологических газов | 110 |
| 4.5. Физико-химические основы очистки и обезвреживания дымовых газов | 115 |
| 4.5.1. Очистка дымовых газов от оксидов азота (на примере ТЭС) | 115 |
| 4.5.2. Методы снижения выбросов и очистки дымовых газов от сернистого и серного ангидридов, хлорида и фторида водорода, оксидов азота (на примере стекольных производств) | 122 |
| 4.5.3. Метод термохимического обезвреживания дымовых газов (на примере сжигания твердых отходов) | 125 |
| 4.6. Метод термической переработки органосодержащих твердых отходов (пиролиз) | 127 |
| Глава 5. Экологические и экономические принципы оценки инженерной защиты биосферы | 129 |
| 5.1. Экологическая оценка влияния промышленности на природу и человека | 131 |
| 5.1.1. Экологическая эффективность природоохранных мероприятий | 133 |
| 5.1.2. Экологические платежи и методы их расчета | 140 |
| 5.2. Оценка социальной эффективности природоохранных мероприятий и программ | 143 |
| 5.3. Экономическая эффективность малоотходных и ресурсосберегающих производств | 144 |

ЧАСТЬ II

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

| | |
|--|------------|
| Глава 6. Природоохранная деятельность на промышленных предприятиях | 153 |
| 6.1. Система государственных стандартов в области охраны биосферы | 153 |
| 6.2. Нормирование загрязняющих веществ в биосфере | 158 |
| 6.3. Экологический паспорт предприятия | 169 |
| Глава 7. Источники техногенного загрязнения биосферы | 171 |
| Глава 8. Процессы и аппараты для обеспечения экологической безопасности и ресурсосберегающих технологий | 187 |
| 8.1. Очистка и переработка технологических газов, дымовых отходов и вентиляционных выбросов | 187 |
| 8.1.1. «Сухие» механические пылеуловители | 188 |
| 8.1.2. «Сухие» пористые фильтры | 192 |
| 8.1.3. Электрофильтры («сухие» и «мокрые») | 198 |
| 8.1.4. Аппараты «мокрого» пыле- и газоулавливания | 200 |
| 8.1.5. Комбинированные методы и аппаратура очистки газов | 210 |

| | |
|--|------------|
| 8.2. Очистка и повторное использование технической воды и промышленных стоков | 214 |
| 8.2.1. Условия приема промышленных сточных вод в канализацию населенных мест | 214 |
| 8.2.2. Методы и оборудование для очистки технической воды и промышленных стоков | 215 |
| 8.3. Рекуперация, вторичная переработка, хранение и использование твердых отходов. Оценка технологий | 238 |
| 8.3.1. Обезвреживание твердых отходов | 241 |
| 8.3.2. Извлечение ценных компонентов из ВМР | 241 |
| 8.3.3. Использование твердых отходов в качестве вторичных энергетических (ВЭР) и материальных (ВМР) ресурсов | 248 |
| 8.3.4. Санитарное захоронение отходов | 266 |
| Глава 9. Виброакустические загрязнения окружающей среды | 269 |
| 9.1. Производственный шум: механизм, нормирование и методы защиты | 269 |
| 9.2. Вибрация: механизм, нормирование и методы защиты | 277 |
| Глава 10. Неионизирующие и ионизирующие загрязнения (излучения, поля) окружающей среды | 282 |
| 10.1. Неионизирующие поля и излучения. Электромагнитное загрязнение биосферы: опасность, оценка, технические средства защиты | 282 |
| 10.1.1. Механизм ЭМП | 283 |
| 10.1.2. Природные (естественные) источники ЭМП | 286 |
| 10.1.3. Техногенные (антропогенные) источники ЭМП | 286 |
| 10.1.4. Нормирование ЭМП | 287 |
| 10.1.5. Основные методы коллективной и индивидуальной защиты от ЭМП | 292 |
| 10.1.6. Безопасность лазерного излучения | 293 |
| 10.1.7. Безопасность персональных ЭВМ (ПК) | 295 |
| 10.2. Ионизирующие поля и излучения: опасность, оценка и нормирование, технические средства защиты, безопасные технологии | 297 |
| 10.2.1. Электростатические поля (ЭСП), загрязнение и защита биосферы | 297 |
| 10.2.2. Радиационное излучение, загрязнение и защита биосферы | 302 |
| Глава 11. Промышленные аварии и техногенные чрезвычайные ситуации | 316 |
| 11.1. Экологическая безопасность человека, биосферы и промышленных (инженерных) объектов в условиях ЧС и крупных аварий | 316 |
| 11.1.1. Основные понятия | 316 |
| 11.1.2. Принципы обеспечения экологической безопасности производств | 319 |
| 11.2. Устойчивость работы промышленных объектов в ТЧС | 320 |

| | |
|---|------------|
| 11.2.1. Оценка устойчивости зданий (сооружений) к действию ударной волны | 320 |
| 11.2.2. Оценка устойчивости технологического оборудования к действию ударной волны | 322 |
| 11.2.3. Оценка устойчивости электронной (офисной) аппаратуры и техники | 324 |
| 11.2.4. Оценка последствий аварий на потенциально опасных промышленных объектах | 325 |
| 11.2.5. Основные пути повышения инженерной устойчивости промышленных объектов | 328 |
| 11.3. Прогнозирование экологической обстановки при авариях на химически опасных объектах | 328 |
| 11.3.1. Масштабы реальной опасности химических объектов | 328 |
| 11.3.2. Сильнодействующие ядовитые вещества | 331 |
| 11.3.3. Прогнозирование химической обстановки при авариях со СДЯВ | 335 |
| Глава 12. Приоритетные пути развития и реализации новых технологий, отвечающих требованиям промышленной экологии | 347 |
| 12.1. Ресурсосберегающая техника силикатных производств | 348 |
| 12.1.1. Новые способы обеспечения экологической безопасности промышленных отходов | 348 |
| 12.1.2. Компактирование стекольной шихты | 360 |
| 12.2. Фильтровальная техника защиты биосферы от промышленных выбросов | 361 |
| 12.3. Получение газообразного топлива (пирогаза) из твердых отходов | 367 |
| 12.4. Фильтровальная техника для очистки и обеззараживания отработанных моющих растворов | 372 |
| 12.5. Мобильная ресурсосберегающая установка комплексного обезвреживания вредных веществ в ТЧС | 383 |
| 12.6. Перспективные концепции ядерных технологий | 387 |
| 12.7. Вторичная переработка и уничтожение продуктов оборонной промышленности. Конверсионные технологии | 388 |
| 12.8. Новые технологии защиты от шума | 392 |
| 12.9. Перспективные топливосжигающие устройства | 393 |
| 12.10. Установка для производства защитной атмосферы | 398 |
| Приложения | 402 |

Учебное издание

Калыгин Виталий Геннадьевич

Промышленная экология

Учебное пособие

Редактор *А. В. Савенков*

Технический редактор *Е. Ф. Коржуева*

Компьютерная верстка: *Н. Н. Лопашова*

Корректоры *А. П. Сизова, Ю. Н. Лаврухин*

Качество печати соответствует качеству
предоставленных издательством диапозитивов.

Изд. № А-743-І. Подписано в печать 18.08.2004. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 27,0.
Тираж 4000 экз. Заказ №13698

Лицензия ИД № 02025 от 13.06.2000. Издательский центр «Академия».
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953 Д.004796.07.04 от 20.07.2004.
117342, Москва, ул. Бултерова, 17-Б, к. 328. Тел./факс: (095)334-8337, 330-1092.

Отпечатано на Саратовском полиграфическом комбинате.
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.

В. Г. КАЛЫГИН

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Для студентов высших учебных заведений

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

ISBN 5-7695-1449-3



9 785769 514494

Издательский центр «Академия»

lib-ecolog.narod.ru

Библиотека

инженера-эколога

<http://vkontakte.ru/club994894>