



МЕЖДУНАРОДНЫЙ НЕЗАВИСИМЫЙ
ЭКОЛОГО - ПОЛИТОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра химической и техногенной экологии

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Часть I

Учебное пособие для студентов
заочного отделения

РАЗРАБОТЧИК: к.т.н., доц. Галактионова Н.А.

Москва
2002

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Тема 1. ВВЕДЕНИЕ</i>	3
1.1. Предмет промышленной экологии	3
1.2. Производство и потребление	4
1.3. Краткие исторические сведения	9
<i>Раздел 2. ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ</i>	17
2.1. Общая трактовка	17
2.1. Модели ЭЭС: структура и потоки	18
2.2. Соизмерение производственных и природных потенциалов	21
<i>Раздел 3. ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ</i>	25
3.1. Виды технологий	25
3.2. Природоохранные технологии	29
3.3. Технологические системы	34
<i>Раздел 4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ</i>	38
4.1. Классификация основных технологических процессов	38
4.1. Классификация основных технологических процессов	39
4.3. Процессы периодические, непрерывные, полупериодические	40
4.4. Гидромеханические процессы	43
4.4.1. Классификация неоднородных систем	43
4.4.2. Осаждение	44
4.4.3. Фильтрация	52
4.4.4. Перемешивание в жидкой среде	53
4.4.5. Псевдооживление	54
4.5. Тепловые процессы	57
4.5.1. Общие характеристики тепловых процессов	57
4.5.2. Нагревание	59
4.5.3. Охлаждение до обыкновенных температур	64
4.5.4. Конденсация	65
4.5.5. Выпаривание	66
4.6. Массообменные процессы	68
4.6.1. Абсорбция	71
4.6.2. Ректификация	73
4.6.3. Экстракция	83
4.6.4. Адсорбция	87
4.6.5. Сушка	90
4.6.6. Кристаллизация	95
<i>Раздел 5. Безотходные и малоотходные производства</i>	97
5.1. Определения и концепция безотходного производства	97
5.2. Коэффициенты для оценки степени приближения традиционной технологии к безотходной.	100
5.3. Принципы безотходного производства	102
5.4. Основные направления развития мало – и безотходных производств	109
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Экологические проблемы альтернативной энергетики д.х.н., проф. МГУ, Лисичкин Г.В. (В кн. Материалы конференции «Основы экологической безопасности» /Под ред. Г.А. Богдановского, Н.А. Галактионовой. «Научные труды МНЭПУ». Вып. 4. Серия: «Реймерсовские чтения». – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – с.37 – 44.</i>	<i>112</i>
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Из второй части учебного пособия «Промышленная экология», готовящегося к.т.н., доц. Галактионовой Н.А. (биохимическая очистка СВ, компостирование твердых отходов, переработка ТО на свалках)</i>	<i>120</i>

Тема 1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Предмет промышленной экологии. . .

На современном этапе все очевиднее становится взаимосвязь производственных и природных процессов. Происходит слияние объектов хозяйственной деятельности человека, среды его обитания и природной среды¹ в единые системы, развивающиеся по своеобразным, еще недостаточно изученным законам. Для их изучения состояния и прогнозирования изменений, а также управлением развития таких систем возникло новое научное направление – промышленная экология.

Существует несколько определений *промышленной экологии (ПЭ)*. Например, Реймерс Н.Ф. [1] дает следующее определение: «*Промышленная экология*» – дисциплина, рассматривающая воздействие промышленности – от отдельных предприятий до техносферы – на природу, и наоборот, – влияние условий природной среды на функционирование предприятий и их комплексов. Это же определение использовано В.Г. Калыгиным, по программе и учебнику которого учатся студенты МНЭПУ [6]. В работе [2] (Р.А. Степень, С.М. Репях) под ПЭ понимается наука об эколого-экономических системах. Под последней понимается экологическая система или их сумма, которая включает так или иначе промышленные предприятия и другие объекты хозяйственной деятельности человека: транспорт, сельское хозяйство, города, плотины, тепловые станции и т.п. А.А. Челноков и Л.Ф. Ющенко [3] также считают, что современная *промышленная экология* – это самостоятельная наука, изучающая влияние промышленной деятельности на биосферу, а также определяющая пути достаточно безболезненного для человеческой цивилизации перехода техносферы в ноосферу. В справочнике-словаре В.В. Снакина вообще считается, что ПЭ – это научное направление, предметом изучения которого является непосредственное отрицательное антропогенное воздействие хозяйственной деятельности на окружающую среду [8].

С нашей точки зрения, промышленная экология – это дисциплина, содержание которой наиболее полно отражено в книге В.А. Зайцева «*Промышленная экология*» [4], выполненное по переводной статье [5]. Это мнение в настоящее время является наиболее распространенным и в той или иной формах поддерживается рядом ученых.

¹ **Окружающая среда (ОС)** – совокупность всех материальных тел, сил и явлений природы, ее вещество и пространство, любая деятельность человека. ОС – совокупность абиотической, биотической и социальной среды, совместно оказывающих влияние на человека и его деятельность [6].

Природная среда – совокупность объектов и условий природы, в которых протекает деятельность какого-либо субъекта [6].

Промышленная экология рассматривает (изучает) взаимосвязь (и взаимозависимость) материального, в первую очередь промышленного, производства, человека и других живых организмов и среды их обитания, то есть предметом изучения промышленной экологии являются эколого-экономические системы.

Одной из главных задач ПЭ является нахождение путей для рационального и комплексного использования сырьевых и энергетических ресурсов в народном хозяйстве в цикле: первичные сырьевые ресурсы – производство – потребление – вторичные сырьевые ресурсы – и, в конечном итоге, создание техногенного кругооборота веществ по аналогии с биогеохимическим кругооборотом в природных экологических системах.

Промышленная экология – функциональная дисциплина, так как наряду с установлением структуры и законов развития эколого-экономических систем, предметом исследования ПЭ является установление динамических связей внутри них, то есть функционирование подобной системы как единого целого. Методологической основой промышленной экологии служит системный подход с учетом всего многообразия экономических, биологических, социальных, технологических и других связей, их разнообразия и соподчинения.

1.2. Производство и потребление

Любое общество строится на принципах «производство-потребление», направленных на удовлетворение многоплановых *потребностей* людей за счет хозяйственной деятельности, основным видом которой является *производство*. При этом неизбежно возникают противоречия между человеком и природой, между производством и естественными экологическими системами.

Рост народонаселения планеты, динамика которого не утешительна², приводит к росту потребления. Причем, эти величины не пропорциональны друг другу! Потребление растет более высокими темпами, чем народонаселение. На это существуют объективные причины: расширение ассортимента, качества и количества потребляемых благ.

Совершенно ясно, что удовлетворить эти растущие потребности можно только за счет роста производства, которое не мыслимо без использования природы и ее разнообразных ресурсов. Этим и объясняется возникновение противоречий между человеком и природой, между производством и естественными экологическими

² В современном мире численность населения Земли быстро возрастает. В 1700 г. она составляла 600 млн. человек, а в 1850 г. увеличилась до 1,2 млрд., к 1950 г. – до 2,5 млрд., а к середине 1987 г. – до 5 млрд. человек. Таким образом для первого удвоения числа землян с начала XVIII в. потребовалось 150 лет, для второго – 100, а для третьего – менее 37 лет.

системами. Рассмотрим некоторые негативные стороны влияния человека на природу в процессе роста производства.

Первое – ежегодно человечество отторгает от природы десятки миллиардов тонн природного вещества [7], к которому относятся нефть, газ, уголь, водные и природные ресурсы и т.п. На сегодня является очевидным ограниченность традиционно используемых природных благ суши, поэтому «ненасытные создания» устремляются к новым источникам: Мировому океану и космосу.

Второе – и возможно самое главное – это загрязнение окружающей среды отходами производства, которое во многих районах мира достигло критического уровня для устойчивости экосистем и здоровья людей. Структура отходов производства в мире представлена в таблице 1.1. [6].

Таблица 1.1.

Структура и объем отходов производства в мире (2000 г.)

<i>Категория отходов</i>	<i>Млн. т</i>	<i>%</i>
Основные газообразные вещества атмосферы	50759	48,8
Выброс твердых частиц в атмосферу	721	0,7
Твердые отходы	15000	14,4
Углеводороды	244	0,2
Органические отходы	13050	12,5
Фекальные отходы	24320	23,4
<i>ИТОГО</i>	<i>104094</i>	<i>100</i>

Загрязнение атмосферного воздуха сопровождается массовой гибелью лесов — «легких планеты», снижением поголовья или исчезновением видов фауны, снижением урожайности сельскохозяйственных культур, потерей рыбопродуктивности водоемов, наносит урон здоровью людей. Общий экономический ущерб при этом исчисляется каждый год десятками миллиардов долларов.

Распределение выбросов загрязняющих веществ за год по различным видам антропогенной деятельности приведено в таблице 1.2 [4].

Большую угрозу для человечества представляет радиационное загрязнение окружающей среды, связанное, прежде всего, с аварийными ситуациями.

Радиационные загрязнения, связанные с технологически нормальным ядерным топливным циклом, имеют локальный характер и доступны для контроля, изоляции и предотвращения эмиссий. Эксплуатация объектов атомной энергетики сопровождается незначительным радиационным воздействием (табл. 1.3, [9]). Многолетние систематические

Таблица 2.2.

Распределение выбросов загрязняющих веществ за год по различным видам антропогенной

<i>Вид деятельности</i>	<i>%</i>
Все виды транспорта	50-60
Промышленные технологии и процессы горения	15-20
Производство пара, тепловой и электроэнергии	10-15
Местное отопление	10
Сжигание отходов	5

измерения и контроль радиационной обстановки не обнаружили серьезного влияния на состояние объектов окружающей природной среды. Дозы облучения населения, проживающего в окрестностях АЭС, не превышают 10 мкЗв/год³, что в 100 раз меньше установленного допустимого уровня. Вероятность радиационных аварий реакторов АЭС сейчас оценивается

Таблица 1.3.

Основные источники излучения и средняя облучаемость населения стран СНГ

<i>Источники излучений</i>	<i>Средняя ЭЭД, мЗв/год</i>
Естественный и техногенно измененный фон	2,37
в том числе:	
космическое излучение	0,32
природные радионуклиды в том числе:	2,05
при внутреннем облучении	0,37
при внешнем облучении	1,68
в том числе:	
радон	1,20
другие радионуклиды	0,48
1,82	
Техногенные источники	1,69
в том числе:	
медицинского значения	0,02
угольная энергетика	0,002
ядерная энергетика	0,024
авария на Чернобыльской АЭС	0,02
ядерные испытания	0,006
профессиональное облучение	0,05
прочие источники	4,2
Итого	

³ Зв – зиверт (эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма). 1 Зв = 100 бэр (бэр – внесистемная единица).

как 10^{-4} - 10^{-5} в год. Тем не менее, атомной энергетике часто приписывается наивысшая экологическая опасность, что обусловлено, прежде всего, чрезвычайными авариями, имевшими место в СССР.

Поучительным и трагическим примером такой аварии считается авария на ПО «Маяк».

ПО «Маяк». Самое крупное из известных сейчас скоплений радионуклидов находится на Урале, в 65 км к северо-западу от Челябинска на территории ПО «Маяк», созданного на базе промышленного комплекса, построенного в 1945—1949 гг. в Челябинской области, в районе городов Кыштым и Касли. Здесь в 1948 г. был пущен первый в стране промышленный атомный реактор, в 1949 г. — первый радиохимический завод, изготовлены первые образцы атомного оружия. В настоящее время в производственную структуру ПО «Маяк» входят ряд производств ядерного цикла, комплекс по захоронению высокоактивных материалов, хранилища и могильники РАО. Многолетняя деятельность ПО «Маяк» привела к накоплению огромного количества радионуклидов и сильному загрязнению районов Челябинской, Свердловской, Курганской и Тюменской областей. В результате сброса отходов радиохимического производства непосредственно в открытую речную систему Обского бассейна через р. Теча (1949—1951 гг.), а также вследствие аварий 1957 и 1967 гг. в окружающую среду было выброшено 23 млн. Ки⁴ активности. Радиоактивное загрязнение охватило территорию в 25 тыс.км² с населением более 500 тыс. человек. Официальные данные о десятках поселков и деревень, подвергшихся загрязнению в результате сбросов радиоактивных отходов в р. Теча, появились только в 1993 г.

В 1957 г. в результате теплового взрыва емкости с РАО произошел мощный выброс радионуклидов (церий-144, цирконий-95, стронций-90, цезий-137 и др.) с суммарной активностью 2 млн. Ки. Возник «уральский радиоактивный след» длиной до 110 км (в результате последующей миграции даже до 400 км) и шириной до 35—50 км (рис. 1.1., [9]). Общая площадь загрязненной территории, ограниченной изолинией 0,1 Ки/км² по стронцию-90, составила 23 тыс. км². Около 10 тыс. человек из 19 населенных пунктов в зоне наиболее сильного загрязнения с большой задержкой были эвакуированы и переселены.

Зона радиационного загрязнения на Южном Урале расширилась вследствие ветрового разноса радиоактивных аэрозолей с пересохшей части технологического водоема № 9 ПО «Маяк» (оз. Карачай) в 1967 г. В настоящее время в этом резервуаре находится около 120 млн. Ки активности, преимущественно за счет стронция-90 и цезия-137. Под озером сформировалась линза загрязненных подземных вод объемом около

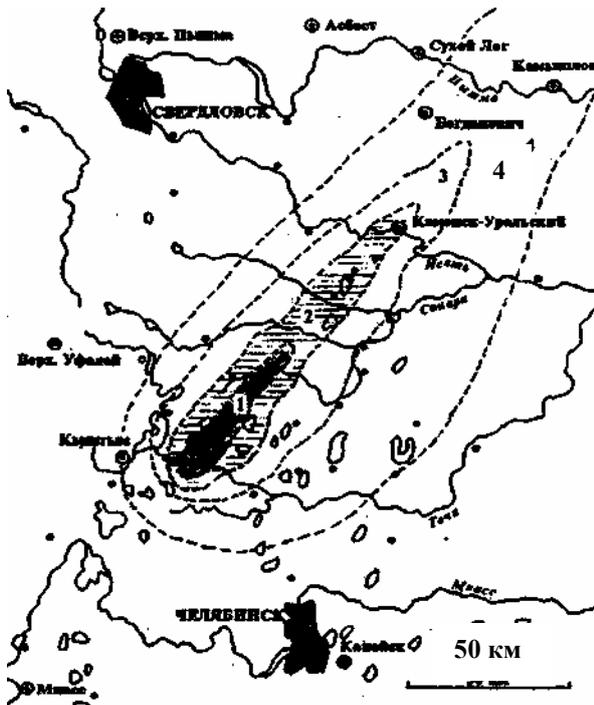


Рис 1.1.. Карта-схема, «уральского радиоактивного следа», связанного с аварией на ПО «Маяк» в 1957 г.

Зоны загрязнения с активностью: более 50 Ки/км² (1), более 5 Ки/км² (2), более 0,1 Ки/км² (3), более 0,02 Ки/км² по стронцию-90 через год после аварии (4)

4 млн.м³ и площадью 10 км². Существует опасность проникновения загрязненных вод в другие водоносные горизонты и выноса радионуклидов в речную сеть.

По данным радиационного мониторинга, выпадения цезия-137 из атмосферы в районах, расположенных в зоне влияния ПО «Маяк», в течение 1994 г. были в 50—100 раз больше, чем в среднем по стране. Высоким остается и уровень загрязнения местности цезием-137 в пойме р. Теча. Концентрации стронция-90 в речной воде и в донных отложениях в 100—1000 раз превышают фоновые значения. В каскаде промышленных водоемов в верховьях Течи накоплено 350 млн. м³ загрязненной воды, являющейся по сути низкоактивными отходами. Суммарная активность твердых и жидких РАО, накопленных в ходе деятельности ПО «Маяк», достигает 1 млрд. Ки. Сосредоточение огромного количества РАО, загрязнение поверхностных водоемов, возможность проникновения загрязненных подземных вод в открытую гидрографическую систему Обского бассейна создают исключительно высокую степень радиационного риска на Южном Урале.

По последним данным⁵ на ПО «Маяк» до сих пор вторичные радиоактивные воды сбрасываются в р. Теча и искусственные озера. На переработку 1 т. АЯТ необходимо не менее 2000 т. воды!. Поэтому проблема радиоактивных сточных вод стоит очень остро.

⁴ Ки – кюри – внесистемная единица активности радионуклида (системная единица – беккерель; 1 Бк = 1 распаду в секунду = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки)

⁵ Из программы телевидения «Опасный мир» 9 октября 2000 г, 6 канал)

Если ее хранить в баках, то при больших объемах возможен взрыв, как это и имело место ранее.

Последняя авария на ПО «Маяк» произошла 9 сентября 2000 г. На 29 минут в окружающем районе было все обесточено. За 50 лет уровень радиоактивности в районе ПО «Маяк» вырос в 50 раз. Уже более 500 тыс. человек пострадали от ПО «Маяк».

При рассмотрении комплекса вопросов, связанных с загрязнением окружающей среды, часто забывают о неблагоприятном влиянии шума, инфразвука и вибрации на жизнедеятельность человека. В городах промышленные и транспортные шумы, бытовые приборы и т. д. Создают сильную звуковую атаку на организм человека. «Шумовые загрязнения» окружающей среды являются серьезной проблемой. Уровни городских шумов возрастают в среднем за каждые 5—10 лет на 5—10 дБ [6]. Большую опасность представляют ультразвук и инфразвук. Даже при относительно низких уровнях энергии инфразвука он может привести к довольно серьезным заболеваниям. Многие нервные болезни городских жителей вызываются именно инфразвуками, проникающими сквозь самые толстые стены.

В отдельных случаях возможно «загрязнение» окружающей среды тепловыми выбросами, электромагнитными полями, ультрафиолетовыми, инфракрасными, световыми и ионизирующими излучениями.

Экологические исследования, проведенные в последние десятилетия во многих странах мира, показали, что все возрастающее разрушительное воздействие антропогенных факторов на окружающую среду привело ее на грань кризиса. Среди различных составляющих экологического кризиса (истощение сырьевых ресурсов, нехватка чистой пресной воды, возможные климатические катастрофы) наиболее угрожающий характер приняла проблема загрязнения незаменимых природных ресурсов — воздуха, воды и почвы — отходами промышленности и транспорта.

И, наконец, *третье*. Отрицательное воздействие производства на окружающую среду обусловлено не только его нерациональной структурой, но и несовершенством технологических процессов. Об этом свидетельствует уже тот факт, что из огромного количества вещества, изымаемого людьми из природной среды для целей производства, в конечный продукт превращается лишь *1,5—2,0%* [7]. Основная же его масса переходит в производственные и бытовые отходы. Такое положение сложилось исторически. Оно обусловлено, с одной стороны, уровнем развития науки и техники, а с другой — характером производственных отношений, доминирующих в том или ином сообществе. По мере развития науки и техники, умножения производительных сил общество получает возможность все более активно воздействовать на природу с целью использования ее ресурсов и естественного потенциала для удовлетворения своих постоянно возрастающих

потребностей. Это воздействие имеет двоякий характер. Оно может содействовать развитию природы, облагораживать ее, повышать полезную продуктивность биологических систем. К сожалению, в действительности эти совершенно необходимые условия учитываются далеко не всегда, а в большинстве случаев и вовсе игнорируются. В результате рост производства сплошь и рядом сопровождается широкомасштабным разрушением природных систем и интенсивным загрязнением среды, что наносит ущерб и природе, и обществу.

Перед человечеством неотвратимо встала задача разумного, рационального природопользования, позволяющего удовлетворять жизненные потребности людей в сочетании с охраной и воспроизводством природной среды.

1.3 . Краткие исторические сведения

Анализ истории взаимодействия человека с природой и вопросы происхождения проблемы охраны окружающей природной среды свидетельствуют о существовании в истории развития человечества четырех периодов, различных по времени и силе воздействия людей на природу. Сейчас в этом взаимодействии наблюдается переход к пятому периоду [6].

Первый период охватывает эру наиболее примитивной культуры каменного века и первобытно-общинного уклада жизни. Сравнительно малочисленные человеческие племена были в ту пору рассеяны по широким пространствам Земли, и воздействие их на природу ограничивалось рыболовством и охотой на диких животных, мясо которых использовалось в пищу, а шкуры и сухожилия — для пошива одежды.

Трудно говорить и о каких-либо социальных аспектах взаимодействия человека и природы в этот период, для которого характерно преклонение человека перед обожествленными им силами природы, пока еще таинственными, часто недобрыми, всегда неожиданными в своих проявлениях.

Время начала этого периода назвать трудно, по мере развития археологических исследований оно отодвигается все дальше. Ясно только одно — это был самый длительный период взаимодействия человека с природой, приведший к малоощутимым изменениям в ней.

Второму периоду соответствует время с начала землепользования, т. е. От VIII — VII вв. до н. Э. До становления промышленного производства в XV в. н. Э. Это период рабовладельческого и феодального общества, период активного *развития скотоводства и земледелия*. Широкий размах в это время приобретает *ирригация* земель в низовьях Нила, в Средней и Малой Азии, в Индии, Китае, Южной и Центральной Америке, возможно, на части территории Сахары.

Наряду с поверхностными водами для орошения земель и обводнения пастбищ начинают успешно использоваться *подземные воды*, извлекаемые дренажными галереями, перехватывающими подземные потоки в предгорьях хребтов Средней и Малой Азии, Азербайджана. Пробразом современных инфильтрационных водозаборов являются колодцы, выкопанные на глинистом днище плоских западин. Эти колодцы принимают в себя и сохраняют под землей воды весенне-зимнего стока, давая возможность использовать их для водопоя скота в жаркое летнее время.

Интенсивное *сельскохозяйственное освоение земель, использование древесины* как основного энергетического источника и строительного материала приводило к сокращению площади лесных массивов. Примечательно, что для строительства только одного парусного корабля требовалось до 400 вековых дубов. «Непобедимая армада» стоила Испании более полумиллиона вековых деревьев, вырубка которых на склонах гор активизировала эрозионные процессы и привела к необратимым неблагоприятным изменениям природных ландшафтов страны, ничем не компенсированным в последующие эпохи.

Развитие *мореходства* немало способствовало расширению морского промысла, прежде всего добычи китов. Этот промысел постепенно превращается в выгодное предпринимательство, а стадо китов начинает сокращаться и отходит все дальше от берегов, обживаемых человеком.

Третий период охватывает с **XVI** по **XIX** в. Это время становления и развития капитализма, характеризующееся постепенной концентрацией производительных сил, развитием частного предпринимательства, постоянными захватническими войнами, приведшими к разделу мира. Этот период ознаменовался, прежде всего, активным освоением минерально-сырьевых ресурсов, развитием горного дела, металлургии и добычи угля, потеснившего такой энергетический источник, как дерево.

Развитие *горнодобывающей и перерабатывающей* промышленности привело к перераспределению химических элементов между недрами Земли и ее поверхностью, к нарушению геохимического баланса биосферы. По подсчетам академика В. И. Вернадского, только за XIX в. было извлечено из недр Земли более **54 тыс. т** цветных и благородных металлов, а угля за вторую его половину — **15 млрд. т**. Выдача на поверхность такого громадного количества полезных ископаемых потребовала переработки горной массы, составляющей не менее **50 млрд. т.**, то есть превышающей годовой вынос твердого материала с континента в океан речными системами мира. Это обстоятельство позволило академику А. Е. Ферсману заметить, что роль человека гораздо значительнее обычных природных явлений переноса вещества, например деятельности рек, морей и ледников.

Расширение и совершенствование производства в развивающихся капиталистических странах протекали на фоне его непрерывной концентрации в промышленных районах и роста населения в городах, обслуживающих эти промышленные предприятия. Начался интенсивный процесс *урбанизации*. Использование *угля* в качестве топлива, отсутствие дымоулавливающих и водоочистных сооружений приводили к быстрому загрязнению воздушного бассейна, речных систем, а местами — к деградации растительного покрова. Это пагубное воздействие испытали на себе в первую очередь горнопромышленные районы Великобритании, Центральной Европы (Рурская область, Силезия), Южного Урала (Россия) и Соединенных Штатов Америки.

Нарушение природных ландшафтов в промышленных и городских районах, снижение плодородия земель, охватывающие все более значительные территории, — все эти последствия неумеренной и еще никем не контролируемой на раннем этапе хищнической эксплуатации природных ресурсов, неизбежной в условиях жесточайшей конкурентной борьбы и частной собственности на средства производства, требовали своего объяснения.

Таким образом, именно в период становления и развития капитализма взаимоотношения человека с природой осмысливаются как определенная социальная или философская альтернатива: «*Человек над Природой*» или «*Человек в Природе*».

С таким теоретическим и практическим багажом мир входил в буржуазный **XX** в.

Четвертый период взаимодействия человека с природой — период империализма и социальных революций. Концентрация производства, организация крупных промышленных объединений, охватывающих своим влиянием многие районы мира, приводят к расширению сфер их воздействия на окружающую природу, которые приобретают *региональный*, а затем *глобальный* характер. Возникает ситуация, при которой стремительное изменение природы вследствие, в первую очередь, загрязнения поверхностных вод и воздушного бассейна становится препятствием для дальнейшего развития производства; создается реальная опасность истощения не только невозобновимых, но и возобновимых природных ресурсов. Каковы же основные направления воздействия человека на природу в этот период?

Гигантскими темпами возросла *добыча нефти и газа*. Нефть становится основным источником энергетического и химического сырья, транспортировка и переработка которого способствуют усилению загрязнения среды и особенно океана. Например, многочисленные аварии танкеров, которые вызвали катастрофические утечки нефти и ее продуктов в море, при которых в Мировой океан ежегодно поступает до 10 млн. тонн нефти. После катастрофы танкера «Торри Каньон», севшего на камни у западной оконечности Корнуолла в марте 1967г., в море вылилось 117 тыс. тонн кувейтской сырой нефти. Пресса назвала аварию танкера «Торри Каньон» катастрофой века. 18 тыс. тонн

нефти образовали гигантское пятно, двигавшееся к побережью Корнуолла. Оно достигло берега через неделю после катастрофы и распространилось на 150 км вдоль побережья. В марте 1978г., наткнувшись на подводную скалу около Северо-западного побережья Франции, потерпел крушение танкер «Амоко Кадис». В море вылилось 216 тыс. тонн нефти и 4 тыс. тонн бункерного топлива. Большое загрязнение нефтью поверхности океана возникло в результате столкновения в июле 1979г. в Карибском море супертанкеров «Атлантик экспресс» и «Эгезн Кэптен». При мелких авариях, которые происходят ежегодно, в море выливаются тысячи и десятки тысяч тонн нефти.

Буквально недавно, в середине ноября 2002 г. потерпел аварию греческий танкер «Престиж», содержащий в бункере 70 тыс. т нефти. При транспортировке к берегу танкер затонул и уже к концу ноября 10 тыс. т. уже попали в море. Несмотря на плавучие ограждения и насосы, откачивающие 15 сантиметровый слой нефти, она добралась до берегов Испании. Эту катастрофу называют глобальной экологической катастрофой.

На примере разработки нефтяных месторождений лучше всего проявилась тенденция оставлять загрязнения в странах — поставщиках сырья. Там строятся заводы, на которых производится первичная перегонка нефти, а затем нефтепродукты поступают в страны-потребители. В частности, в таком положении оказались многие страны — поставщики нефти на Ближнем Востоке, в Африке и Латинской Америке, народы и правительства которых приложили немало усилий к тому, чтобы нефть, залегающая в недрах этих стран, стала их национальным достоянием.

Не меньшими темпами возрастала интенсивность *горных разработок* и связанного с ними техногенного преобразования ландшафтов. Если общий объем переработанной горной массы за весь период развития человечества до начала XX в. составил около **50** млрд. т, то ныне он достигает **100** млрд. т в год. Государства мира перерабатывают за год горной массы втрое больше, чем естественные геологические процессы, протекающие на Земле.

Перераспределение горной массы на поверхности Земли, например, в связи со строительством городов и водохранилищ, наряду с извлечением из недр нефти, газа и подземных вод способствовало развитию в земной коре гравитационных напряжений, которые иногда разрешаются медленным, но непрерывным оседанием почвы или быстрыми, взрывными проявлениями — землетрясениями. В США, России, Японии и других странах развиваются исследования, которые должны со временем обеспечить возможность прогноза землетрясений, в том числе и техногенных.

Создание обширных водохранилищ привело к изменению уровня грунтовых вод и водно-солевого баланса окружающих территорий, к развитию инженерно-геологических процессов по их берегам и в приповерхностных грунтах.

В последние годы отмечается значительное усиление различных геологических процессов в районах интенсивной застройки и промышленного освоения: на территориях крупных городов и городских агломераций, в урбанизированных зонах. Причиной его является коренное преобразование ландшафтов. Наибольшее распространение в этих условиях получают процессы суффозии, карстообразования, в северных регионах — суффозии и термокарста,⁶ а также оползневые и эрозионные. Суффозионно-карстовые процессы при эксплуатации подземных вод и одновременном их восполнении за счет утечек воды из инженерных сетей и коммуникаций способны аккумулироваться с поверхности до глубин, измеряющихся первой сотней метров. Активизации их способствует изменение гидродинамических, гидротермических и, как правило, гидрохимических условий, в частности повышение степени агрессивности подземных вод техногенного происхождения.

Таким образом, не только усилилась интенсивность геологического воздействия в абсолютном выражении, но само оно стало качественно иным.

Иным стало и геохимическое воздействие человека на природу, определяющееся тремя обстоятельствами.

3.□. Синтезом множества (более миллиона) веществ, отсутствовавших в естественных условиях и обладающих качествами, не свойственными природным соединениям.

2. Строительством широкой сети коммуникаций — газо- и нефтепроводов, шоссе и железных дорог, линий электропередачи и связи, что наряду со специализацией производства привело к массовой транспортировке разнообразного сырья из районов добычи в районы переработки, к перераспределению и рассеиванию загрязнений. Рассеиванию загрязняющих веществ во многом способствовало и задымление атмосферы выбросами тепловых электростанций, металлургических, химических, нефтеперегонных заводов, автомобильного и авиационного транспорта.

⁶ *Карст* – явления, возникающие в растворимых водными растворами осадочных горных породах (известняки, гипс) и выражающиеся в образовании углублений в виде воронок, котловин, провалов, пещер и т.п. *Термокарст* – образование просадочных, провальных форм рельефа, бугров и подземных пустот в результате вытаивания мерзлого грунта. *Суффозия* – выщелачивание и вынос мелких минеральных частиц потоками грунтовых вод, фильтрующихся в толще горных пород [10].

3. Интенсификацией производства сельскохозяйственной продукции, потребовавшей массового применения удобрений, гербицидов и пестицидов, отрицательное побочное воздействие которых на окружающую среду выявилось лишь спустя длительное время после начала их повсеместного применения.

Развитие производительных сил общества в XX в. потребовало многократно повысить выработку всех видов энергии, прежде всего электрической. Создание мощных тепловых электростанций способствовало возникновению совершенно нового — *теплового загрязнения* гидросферы и атмосферы. В свою очередь, формирование теплового стока и зарегулирование речного стока привели к бурному развитию синезеленых и других водорослей, нарушению миграционных путей и поголовья ценных пород рыб, зарастанию водохранилищ, цветению в них воды и изменению окислительно-восстановительных процессов.

И, наконец, развитие транспорта, в частности авиационного, и различного рода радиотехнических устройств привело к повышению общего *уровня шума*, возникновению очагов шума, временами превышающего допустимые для человека и фауны нормы.

Следует заметить, что в исследованиях взаимодействия в системе «природа — общество» ее элементы — природа, человек и техника — очень часто противопоставляются друг другу. Между ними действительно есть существенные различия, но много у них и общего. Общность эта определяется единством материального мира и историческим развитием, потому что появление на Земле человека и формирование человеческого общества — явления закономерные в процессе эволюции нашей планеты. Человек — это часть природы. И в этом отношении было бы неправомерным противопоставление природы и человека как сил внешних по отношению друг к другу. А раз это так, то и появление в недрах человеческого общества техники — явление тоже закономерное в процессе эволюции Земли.

Гармоничное развитие природы и техники возможно только в результате научно обоснованного компромисса между объектами природы и социальной деятельностью человека. Ответственность за такой компромисс лежит на промышленной и инженерной экологии — этих многопрофильных областей знаний о законах природосберегающего формирования техносферы планеты и ее сбалансированного экологически безопасного развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. – М.: Мысль, 1990. – 595 с.
2. Р.А. Степень, С.М. Репях. Промышленная экология: учебник для студентов химико-технологических специальностей. – Красноярск: СибГТУ, 2000. – 345 с.

3. *Челноков А.А., Ющенко Л.Ф.* Основы промышленной экологии: Учеб. Пособие. – Мн: Выш. Шк., 2001. – 343 с.
4. *Зайцев В.А.* Промышленная экология: учебное пособие. – М: ДеЛя, 1999. –140 с.
5. *Alienby, Braden.* "Industrial Ecology: The Materials in Environmentally Constrained World". The Materials Research Society Bulletin. 1992, March, PA. P. 45.
6. *Калыгин В.Г.* Промышленная экология: Курс лекций. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – 240 с.
7. *Мазур И.И., Молдованов О.И.* Курс инженерной экологии: Учеб. Для вузов. – М.: Высш. Шк., 1999. – 447 с.
8. *Снакин В.В.* Экология и охрана природы. Словарь-справочник. Под редакцией академика А.Л. Яншина. – М.: Academia, 2000. – 384 с.
9. *Акимова Т.А., Хаскин В.В.* Экология: Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 455.
10. *Снакин В.В.* Экология и охрана природы. Словарь-справочник. – М.: Academia, 2000. – 384 с.

Раздел 2. ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

2.1. Общая трактовка

Наиболее полно требования экоразвития и подчинение экономики принципу сбалансированного природопользования могут быть реализованы в пределах такого природно-хозяйственного комплекса, который образует равновесную *эколого-экономическую систему* (ЭЭС). Это понятие широко используется в современной экономической и экологической литературе наряду с близкими по смыслу понятиями «природно-экономическая система» и «биоэкономическая система».

Академик М.Я Лемешев в 1976 г. определил эколого-экономическую систему как *«интеграцию экономики и природы, представляющую собой взаимосвязанное и взаимообусловленное функционирование общественного производства и протекание естественных процессов в природе и в биосфере в особенности»* [1].

Такое определение ЭЭС предполагает глобальный или, по меньшей мере, национальный уровень. В настоящее время существует как бы два уровня интерпретации этого понятия — глобальный и территориальный. Согласно первому ЭЭС трактуется как тип экологически ориентированной социально-экономической формации. Именно в этом смысле на закрытии Конференции в Рио М. Стронг говорил о необходимости перехода человечества от экономической системы к эколого-экономической системе. Но в глобальном смысле организация ЭЭС — это отдаленная и довольно абстрактная перспектива. Для практической реализации принципа сбалансированного природопользования важно иметь представление об ЭЭС на территориальном уровне — в отдельных регионах и промышленных комплексах.

В такой трактовке *эколого-экономическая система — это ограниченная определенной территорией часть техносферы, в которой природные, социальные и производственные структуры и процессы связаны взаимоподдерживающими потоками вещества, энергии и информации.*

Реальные ЭЭС никто никогда специально не создавал. Они возникали сами собой в тех случаях, когда хозяйственная активность человека в какой-то территории базировалась на использовании местных возобновимых природных ресурсов, но не превышала их способности к регенерации. Чаще всего это были слабо технизированные агроценозы. Индустриальное развитие никогда не ставило своей целью создание сбалансированных ЭЭС. Механизмы экологической регламентации хозяйственной деятельности, активно разрабатываемые в последние годы, такие, как оценка предполагаемых воздействий на окружающую среду, лицензирование, экологическая экспертиза программ и проектов,

сами по себе не в состоянии обеспечить практическую реализацию требований сбалансированности. Но это не означает, что такие системы невозможны.

2.1. Модели ЭЭС: структура и потоки

Сейчас известно много попыток моделирования ЭЭС. Как правило, в них анализируются связи, но нет подходов к количественному анализу. Пример такой модели приведен на рис. 2.1 [1].

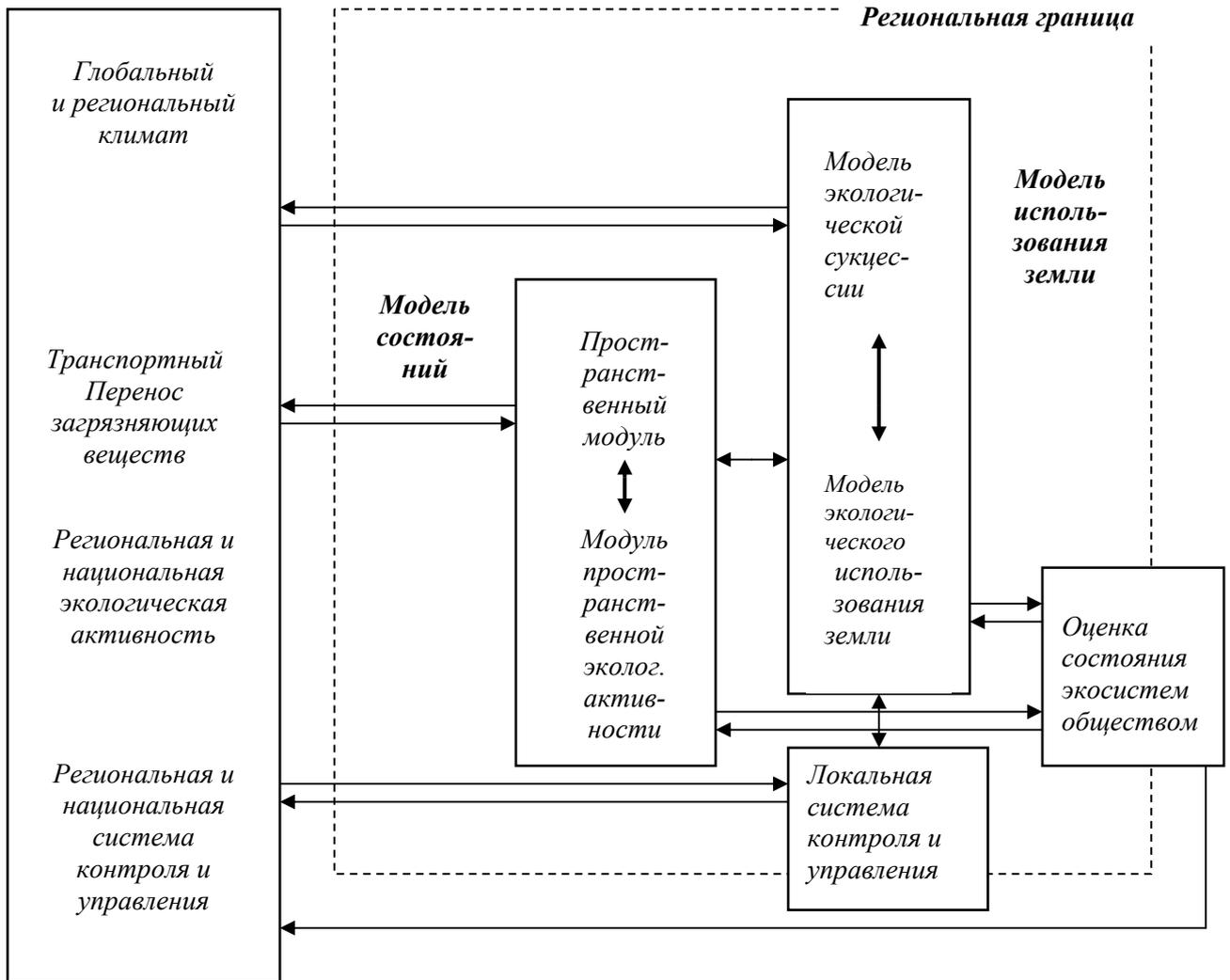


Рис. 2.1. Модель региональной эколого-экономической системы

Ниже приводится упрощенная потоковая схема территориальной ЭЭС (рис. 2.2). В ней экономическая и экологическая системы выступают как части целого и обозначаются как подсистемы. Граница между ними условна, так как вся сфера биологического жизнеобеспечения и воспроизводства людей относится к обеим подсистемам.

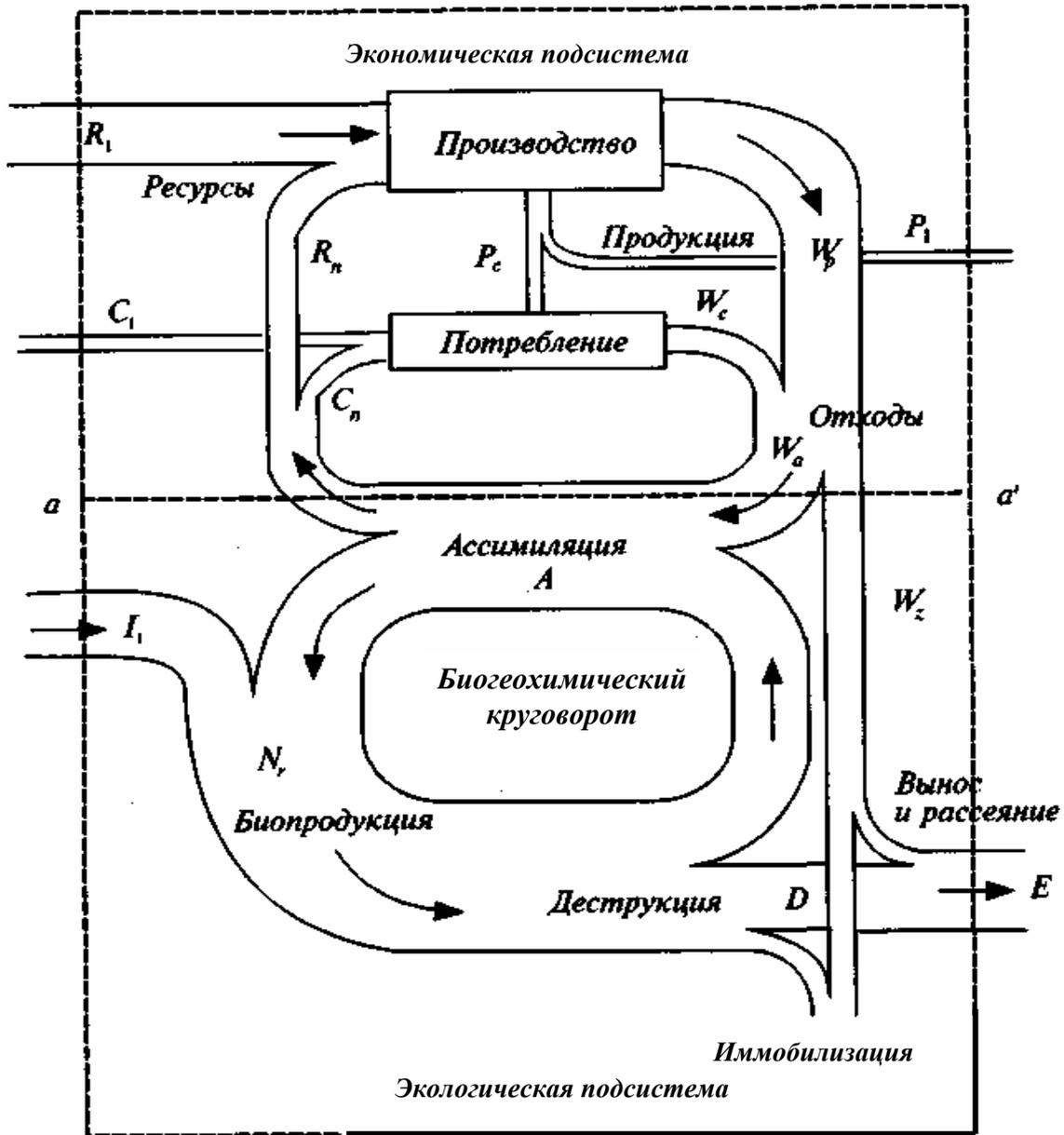


Рис. 2.2. Схема основных материальных потоков в эколого-экономической системе

ЭЭС представляет собой сочетание совместно функционирующих экологической и экономической систем, обладающее эмерджентными свойствами. Напомним, что *экосистема* — это сообщество живых организмов, так взаимодействующих между собой и со средой обитания, что поток энергии создает устойчивую структуру и круговорот веществ между живой и неживой частями системы. В свою очередь *экономическая система* является организованной совокупностью производительных сил, которая преобразует входные материально-энергетические потоки природных и производственных ресурсов в выходные потоки предметов потребления и отходов

производства. Таким образом, часть материальных элементов экологической системы, в том числе и элементов среды обитания человека, используется как ресурс экономической системы.

Общий вход производства — сумма производственных материальных ресурсов R_p — складывается из импортируемых в данную систему ресурсов R_I (к ним отнесены и невозобновимые местные ресурсы) и из возобновимых местных ресурсов R_n . Причем к последним относится часть биопродукции экологической подсистемы, включая продукцию агроценозов и самого человека — и как ресурса, и как субъекта производства и потребления.

$$\text{Итак, } R_p = R_I + R_n.$$

Потребление C складывается из части местной нетто-продукции производства P_G , идущей на потребление (поток продукции, возвращающийся в цикл производства и цикл вторичной продукции на схеме не показаны), а также из части местных биоресурсов C_n и импортируемых продуктов C_I .

$$C = P_G + C_n + C_I$$

Местные ресурсы производства и потребления в сумме образуют поток изъятия ресурсов из экологической подсистемы:

$$U_n = R_n + C_n$$

Эффективность производства определяется отношением P/R_p , где $P = P_I + P_G$, а отходность производства — отношением $(R_p - P)/R_p = W_p/R_p$.

Отходы производства W_p и потребления W_c поступают в окружающую среду как сумма отходов экономической подсистемы:

$$W = W_p + W_c$$

Часть из них W_a включается в биогеохимический круговорот экологической подсистемы, а другая часть — W_z — накапливается и рассеивается с частичным выносом за пределы системы.

Часть отходов потока W_a подвергается ассимиляции и биотической нейтрализации в процессе деструкции; другая часть после биологической и геохимической миграции присоединяется к фракциям W_z и вместе с ними подвергается иммобилизации, рассеянию и выносу.

Таким образом, часть отходов выступает как техногенные загрязнения $M = K \cdot W$, где K — общий коэффициент агрессивности или вредности отходов для системы. В свою очередь вред, наносимый загрязнением среды объектам системы, можно представить как косвенное изъятие части ресурсов экологической подсистемы, аналогичное U_n . Тогда U_m

$= LM$, где L — интегральный коэффициент зависимости «загрязнение — ущерб». Сумма $U = U_n + U_m$ представляет собой общий убыток экологической подсистемы, обусловленный ее взаимодействием с экономической подсистемой.

Соотношение между промежуточными и конечными потоками загрязнений и их совокупный вредный эффект зависят не только от их массы и химического состава, но и от видового состава, биомассы, плотности реципиентов, продуктивности и устойчивости экосистемы, в частности, по отношению к техногенным воздействиям. Эти качества в наибольшей мере зависят от входного потока обновления биогеохимического круговорота I_1 , его продуктивной емкости и масштаба деструкции D .

Круговороты обеих подсистем ЭЭС образуют вместе своего рода *технобиогеохимический круговорот*, а всю ЭЭС можно обозначить как *технобиогеоценоз*. Потокам вещества в ЭЭС могут быть приписаны константы равновесия и скорости, что позволяет осуществить кинетический анализ системы и выявить условия ее уравнивания и стабильности.

В сбалансированной эколого-экономической системе совокупная антропогенная нагрузка не должна превышать самовосстановительного потенциала природных систем.

2.2. Соизмерение производственных и природных потенциалов

Экологические нормативы соизмерения. В § 2.1. в качестве основного условия экологической безопасности территориальных комплексов было названо главное условие соизмерения: техногенная нагрузка на территорию не должна превышать экологическую *техноемкость* территории. Экономический рост, превышающий порог допустимых нагрузок, выступает как основной дестабилизирующий фактор для окружающей среды. Именно поэтому соизмерение и согласование экономических и природных потенциалов и формирование эколого-экономической системы должны быть предметом экономической теории и практики.

Сама по себе процедура соизмерения основана на определении и сопоставлении *экологической техноемкости территории* (ЭТТ или ПДТН) и *природоемкости хозяйства территории*. Эта процедура практически совпадает с оценкой безопасности территориальных комплексов.

Экологическая техноемкость территории и предельно допустимая техногенная нагрузка по существу являются фундаментальными экологическими нормативами, предназначенными для *регламентации территориальной хозяйственной деятельности*. Но именно ЭТТ и ПДТН законодательно не утверждены как нормативы.

Санитарно-гигиенические нормативы как критерии соизмерения. Вся сфера экологического нормирования и стандартизации, особенно связанная с техногенным загрязнением среды, так или иначе опирается на гигиенические нормы и использует установленные *предельно допустимые концентрации (ПДК)* или *предельно допустимые дозы (ПДД)* вредных агентов. ПДК — *это та наибольшая концентрация вещества в среде и источниках биологического потребления (воздухе, воде, почве, пище), которая при более или менее длительном действии на организм (контакте, вдыхании, приеме внутрь) не оказывает влияния на здоровье и не вызывает отставленных эффектов (не сказывается на потомстве и т.п.)*. Поскольку возможный эффект зависит от длительности действия, особенностей обстановки, чувствительности реципиентов и других обстоятельств, различают ПДК среднесуточные (ПДК_{сс}), максимальные разовые (ПДК_{мр}), ПДК рабочих зон (ПДК_{рз}), ПДК для растений, животных и человека. В настоящее время установлены ПДК нескольких тысяч индивидуальных веществ в разных средах и для разных реципиентов. ПДК не являются международным стандартом и могут несколько различаться в разных странах, что зависит от методов определения и спецификации.

На основании величин ПДК с помощью специальных алгоритмов (см., например, 2) и программ вычисляются значения предельно допустимых эмиссий — *предельно допустимые выбросы в атмосферу (ПДВ)*, *предельно допустимые сбросы* в водоемы (ПДС) тех или иных веществ, выделяемых конкретными источниками (предприятиями) данной территории. При этом учитываются характеристики источников и условия распространения эмиссий. Например, для того чтобы в ближайшем к заводским трубам жилом квартале города при наименее благоприятных условиях рассеяния не превышались ПДК определенных аэрополлютантов, нужно ограничить выброс этих веществ постоянной предельной величиной — ПДВ. Подобная ситуация схематически отображена на рис. 2.3.

ПДВ и ПДС уже непосредственно регламентируют интенсивность и качество технологических процессов, являющихся источником загрязнения, и приобретают свойство экологических нормативов. Сверхнормативные эмиссии влекут за собой экономические и административные санкции. Часто бывает, однако, что предприятие по техническим причинам не может соблюдать предписанные ему ПДВ, санкции безрезультатны, а сокращение или остановка производства чревато экономическими и социальными коллизиями. В таких случаях применяется практика временного согласования выбросов и сбросов на уровне фактических эмиссий (ВСВ и ВСС), что по существу является отказом от нормирования и приводит к ухудшению экологической обстановки. Но и соблюдаемые ПДВ и ПДС не удовлетворяют многим требованиям экологического

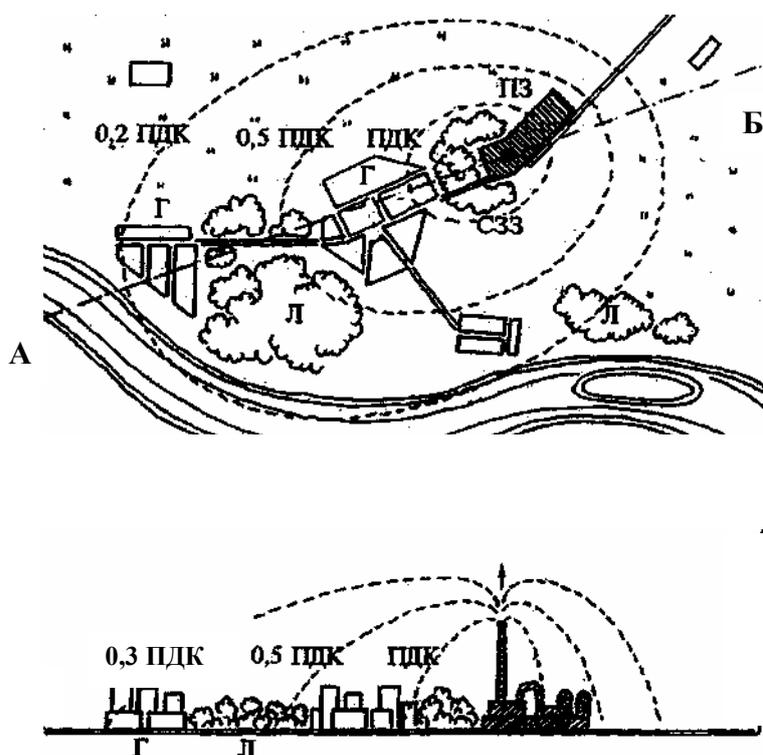


Рис. 2.3. Схема зоны загрязнения в районе мощного промышленного источника.

Верхняя часть - план-схема территории, нижняя часть - профиль территории по линии *АВ*. *ПЗ* - промышленная зона с источником выбросов; *Г* - районы города; *Л* - лесопарковые насаждения; *СЗЗ* - санитарно-защитная зона. Пунктиром обозначены профили рассеяния и выпадения выбросов и соответствующие изолинии концентрации загрязнителей в приземном слое воздуха. Отображена ситуация, когда благодаря соблюдению ПДВ в жилой зоне города не превышает ПДК

нормирования, так как существуют серьезные сомнения в пригодности ПДК в качестве основы этих нормативов. Вообще частно-нормативный подход не соответствует потребностям решения экологических проблем:

- далеко не для всех реальных загрязняющих веществ установлены ПДК;
- нет ПДК для множества разнообразных сочетаний различных агентов; возможные взаимодействия между ними, образование вторичных продуктов и совмещенные эффекты не позволяют рассчитать «комплексы» ПДВ;
- ПДК одного и того же вещества для ценных растений и животных могут быть существенно меньше, чем для человека; это вынуждает делать очень ответственный выбор. Наконец, расчет большинства ПДВ делается на основании максимальных разовых ПДК, которые могут быть на порядок выше среднесуточных. Ясно, что регламентация должна строиться на другой основе. Если все же использовать ПДК, то для целей экологического нормирования и расчета ПДВ, в отличие от существующего ГОСТа, правильным следовало бы считать не соотношение:

$$C + C_{\phi} \leq \alpha \cdot \text{ПДК}_{\text{МР}}, \quad (2.1)$$

где C — нормативно предельная концентрация, используемая для расчета ПДВ;

C_{ϕ} — фоновая концентрация;

α для расчета ПДВ принимается равным единице, а для ВСВ допускается более единицы,

а соотношение:

$$C + C_{\phi} \leq (\lg \beta) \cdot ПДК_{СС} \quad (2.2)$$

где β – безразмерный, лежащий между 0 и 1, интегральный показатель опасности вещества, устанавливаемый по нескольким основным параметрам токсикометрии.

В настоящее время очень немногие промышленные источники загрязнения среды отвечают этому требованию. Отсюда вытекает необходимость перестройки отраслевой структуры и масштабного технологического перевооружения энергетики и промышленности. Но не менее важны *опережающая регламентация количественного роста производства, запрет на размещение предприятий выше определенного для данной территории уровня природоемкости.*

Экологическое нормирование не ограничивается лишь регламентацией хозяйственной деятельности. В его задачи входит создание системы экологических кадастров территорий, которые учитывают природные ресурсы, устойчивость природных комплексов, их экологическую ценность, биоразнообразие, способность быть резерватами чистой природной среды. Это сближает экологическое нормирование с целями и задачами контроля экологической регламентации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акимова Т.А., Хаскин В.В.* Экология: Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 455.
2. *Афанасьев Ю.А., Фомин С.А. и др.* Мониторинг и методы контроля окружающей среды. Часть 2. – М.: МНЭПУ, 2001.

Раздел 3. ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

3.1. Виды технологий

Технология – это совокупность способов, приемов для получения из исходного материала (сырья) некоторого практически ценного продукта.

Примеры:

- Получение стула или стола (продукты) из березы (сырье)
- Получение электрической энергии (продукт) из каменного угля (сырье)
- Получение полиэтиленовых пакетов (продукт) из природного газа (сырье)
- Получение удобрения аммиачной селитры (продукт) из воздуха и природного газа (сырье)
- Получение молока (продукт) из травы (сырье)
- Получение спирта из сахара
- Получение дрожжей из сахара
- Получение кефира из молока.

Очень часто для получения одного продукта требуется не один, а несколько источников сырья, не один, а последовательность нескольких способов, приемов.

Обычно название той или иной технологии состоит из двух слов: первое – технология, второе – наименование продукта. Например: технология аммиачной селитры, технология молока, технология дрожжей и т. д.. Неправильно говорить «Технология получения продукта», например «технология получения спирта», т.к. получается тавтология: слово «технология» – это уже и так обозначает «получение», незачем ставить рядом два слова, имеющих сходный смысл.

Основные классы технологий. Хотя технологий в природе, а вернее в человеческом обществе, существует по крайней мере столько же, сколько и разных видов созданных человеком продуктов (а многие продукты имеют и по множеству разных технологий), все это многообразие технологий можно подразделить на 3 основных класса:

1. Физико-механические технологии
2. Химические технологии
3. Биотехнологии.

Рассмотрим более подробно названные классы технологий.

Физико-механические технологии. Как следует из названия, в таких технологиях исходный материал (сырье) в процессе получения продукта меняет форму или агрегатное

состояние, но не изменяет своего химического состава. Из приведенных выше примеров можно указать на технологию переработки древесины для производства деревянной мебели или различные методы получения металлических изделий, например, гвоздей или деталей машин.

Химические технологии. В процессе получения продукта в химических технологиях сырье претерпевает изменения химического состава. Можно привести множество примеров:

- Получение полиэтилена из природного газа.
- Получение удобрения аммиачной селитры из воздуха и природного газа.
- Получение спирта из природного газа или древесины.
- Получение спирта из природного газа или древесины
- Получение синтетического каучука из природного газа
- Получение красителей и многих лекарств из простых химических соединений (кислоты, щелочи, бензола и других простых веществ).

Ассортимент продуктов, получаемых с помощью химических технологий, весьма велик.

Биотехнология. Есть много определений, что такое биотехнология. Наиболее распространенным является следующее.

Биотехнология – это целенаправленное получение ценных для народного хозяйства и различных областей человеческой деятельности продуктов, в процессе которого используется биохимическая деятельность микроорганизмов⁷, изолированных клеток или их компонентов. [1]

Биотехнологические процессы занимают особое место в природоохранных технологиях, поскольку в основе своей являются экологически чистыми производствами. Последнее понятие будет подробно обсуждаться в следующей теме.

В качестве примера можно привести микробиологическую очистку сточных вод предприятий и почв от нефти и нефтепродуктов, компостирование бытовых отходов, аэробную очистку сточных вод и многое другое.

⁷ Антони ван Левенгук (1676 г.) – впервые увидел бактерии с помощью созданных им линз – «микроскопий». Он считал их «маленькими живыми зверушками». В течении 50 лет к этому открытию относились с подозрением. И только во второй половине XIX века немецкий биолог Геккель приходит к заключению, что микроорганизмы это не животные и не растения. Он предложил все организмы, у которых отсутствует дифференцировка на органы, выделить в класс – протист.

Какие виды биохимической деятельности микробиообъектов используются в биотехнологии, иначе говоря, что является **целевым** при использовании микроорганизмов.

Перечислим их, не вдаваясь в подробности.

1. Нарращивание клеточной массы, которая и представляет собой продукт. К такому классу технологий относится получение пекарских дрожжей, кормовых дрожжей, в общем, экологически чистой биомассы и др.

2. Образование (биосинтез) в процессе роста и развития клеток ценных биохимических продуктов – некоторые из них выделяются в среду (внеклеточные продукты), некоторые накапливаются в биомассе (внутриклеточные продукты). В этих случаях производство существует ради получения таких продуктов, а не самой биомассы, которая часто является балластом.

3. Биотрансформация. Этим красивым словом называется процесс, в результате которого под воздействием биохимической деятельности микроорганизмов или ферментов происходит изменение химического состава исходного химического вещества. Отличие от рассмотренного выше процесса биосинтеза состоит в том, что при этом обычно происходят относительно небольшие изменения в химической структуре вещества, оно не синтезируется заново из относительно более простых веществ. Кроме того, в процессе биотрансформации используется обычно уже готовый биологический агент – клетки микроорганизмов или ферменты, в ходе самого процесса биотрансформации они не образуются.

Пример процесса биотрансформации – превращение глюкозы во фруктозу под воздействием фермента глюкоизомеразы. Оба сахара имеют одну формулу $C_6H_{12}O_6$ но имеют только пространственные отличия в структуре молекулы.

Интересно, что подобный процесс в природе осуществляют пчелы (если кормить их глюкозой). Но здесь в операции принимает участие макроорганизм – пчела, и мы не можем данный процесс назвать биотехнологическим.

Или другой пример. Глицерин, представляющий собой трехатомный спирт, под воздействием клеток глюконобактерий, превращается в диоксиацетон:

Изменение в структуре молекулы вроде бы небольшое – уходят два атома водорода, т.е. происходит дегидрирование. Между тем новое вещество по своим свойствам заметно отличается от исходного – глицерина.

4. Потребление микроорганизмами из жидких сред различных веществ, которые являются нежелательными примесями (загрязнениями). Здесь биомасса микроорганизмов служит промежуточным агентом, сама по себе она не нужна. Такие процессы применяются в процессах биологической очистки сточных вод. Продуктом здесь является очищенная вода, а биомасса активного ила, которая потребляет загрязнения, все время отводится от системы и затем обезвреживается или перерабатывается для получения из нее других полезных продуктов.

5. Выщелачивание с помощью микроорганизмов, т.е. перевод в растворенное состояние некоторых веществ, находящихся в твердых телах. Примером является микробиологическое выщелачивание ценных металлов из руд – меди, цинка, урана и др..

6. Особым случаем является использование биохимической деятельности микроорганизмов с целью образования газов и за счет этого – создания, например, пористых материалов. Для этого, в основном, используют дрожжи при приготовлении хлеба. Одно из назначений дрожжей при получении пива или шампанского – также создать в среде высокую концентрацию растворенного углекислого газа, чтобы вино или пиво хорошо пенилось.

Рассмотренные шесть основных направлений биохимической деятельности микроорганизмов являются основой для получения широкого класса продуктов биотехнологии.

Преимущества биотехнологических процессов. По сравнению с химической технологией биотехнология обеспечивает следующие основные преимущества:

- Возможность получения специфичных и уникальных природных веществ, часть из которых (например, белки, ДНК) еще не удастся получить путем химического синтеза.
- Проведение биотехнологических процессов при относительно невысоких температурах и давлениях.
- Микроорганизмы имеют потенциально значительно более высокие скорости роста и накопления клеточной массы, чем другие организмы.

Например, с помощью микроорганизмов в ферментере объемом 300 м³ за сутки можно выработать 1 т белка. Чтобы такое же количество белка в сутки выработать с помощью крупного рогатого скота, нужно иметь стадо 30000 голов. Если же использовать

для получения такой скорости производства белка бобовые растения, например, горох, то потребуется иметь поле гороха площадью 5400 гектаров.

- В качестве сырья в процессах биотехнологии можно использовать дешевые отходы сельского хозяйства и промышленности.
- Биотехнологические процессы по сравнению с химическими обычно более экологичны, имеют меньше вредных отходов, близки к протекающим в природе естественным процессам.
- Как правило, технология и аппаратура в биотехнологических производствах более просты и дешевы.

3.2. Природоохранные технологии

Особую важность для экологии представляют природоохранные технологии. То есть не технологии вообще, а конкретные технологии, направленные на ликвидацию того или иного вредного воздействия на окружающую среду.

Не претендуя на широту обобщений, можно предложить некоторый перечень видов природоохранных технологий [2,3]:

1. Очистка и обезвреживание отходящих газов.
2. Очистка сточных вод.
3. Переработка, обезвреживание и утилизация твердых отходов.
4. Рекультивация загрязненных территорий и акваторий.
5. Стабилизация окружающей среды при сельскохозяйственном производстве.
6. Замещение энергетических ресурсов новыми экологически чистыми источниками энергии из возобновляемого сырья.
7. Реализация систем замкнутого водопользования.
8. Замещающие технологии экологически чистых материалов и продуктов.
9. Экологически чистая геотехнология.
10. Экологический мониторинг техногенных воздействий на окружающую среду.

Многие из перечисленных природоохранных технологий могут быть реализованы с использованием способов и процессов биотехнологии. В силу специфики

биотехнологических процессов, остановимся более подробно на роли биотехнологии в осуществлении перечисленных выше природоохранных технологий.

1. Очистка сточных вод. Здесь биотехнология практически вне конкуренции. Наряду с открытыми еще в начале века системами аэробной и анаэробной очистки с использованием аэротенков, других специальных видов биоокислителей, биофильтров и метантенков, работающих на естественных биоценозах, разрабатываются адаптированные к различным загрязнениям консорциумы микроорганизмов, пригодные для переработки особо токсичных отходов, системы биосорбции тяжелых металлов и многое другое.

2. Переработка, обезвреживание и утилизация твердых отходов. Начало этим технологиям было положено способами переработки избыточного активного ила, накапливающегося при работе станций биологической очистки стоков. Такой ил часто сам является серьезным источником загрязнения окружающей среды. Методы метанового брожения с получением горючего биогаза и удобрений, а также методы биокомпостирования в аэробных условиях, используемых для переработки активного ила, были затем использованы для переработки навоза, окультуривания свалок и превращения их в установки по биопереработке отходов. Разрабатываются также методы биологической переработки отработанных полимерных материалов, таких как сельскохозяйственные пленки, биодеградация нефтесодержащих осадков, биорегенерации резины отработанных шин с получением каучука-регенерата. Перечень перерабатываемых с помощью биотехнологии отходов растет, т.к. почти для каждого вещества можно подыскать микроб, для которого это вещество является субстратом.

3. Очистка и дезодорация газовых выбросов и глобальное кондиционирование атмосферного воздуха. Наряду с традиционными системами для очистки газовых выбросов все чаще используются биоскрубберы в жидкофазном и твердофазном исполнении с использованием иммобилизованных микроорганизмов. Разрабатываются также «превентивные» системы, снижающие содержание серы в используемом топливе, чтобы не допустить выброса в атмосферу окислов серы. Среди таких систем – биотехнологические способы обессеривания каменного угля и нефти, которые интенсивно разрабатываются в ряде стран. Важной экологической проблемой является снижение содержания углекислоты и повышение содержания кислорода в атмосферном воздухе (борьба с пресловутым «парниковым эффектом»). Сегодня мы с горечью констатируем, что зеленый покров планеты, который помогает

в решении этой проблемы, неумолимо сокращается. Надо думать о новых способах восстановления газового баланса. В космических системах жизнеобеспечения уже опробовано применение для этих целей культивирования микроводорослей хлореллы. Может быть, будут найдены и другие разновидности водорослей, что позволит вместо зеленых насаждений организовывать плантации микроводорослей, очищающих атмосферу и одновременно дающих кормовой или даже пищевой продукт.

4. Биоремедиация загрязненных территорий. Развитие цивилизации часто сопровождается образованием техногенных пустынь – территорий, загрязненных различными вредными веществами. На слуху прежде всего нефтяные загрязнения, но список загрязнителей достаточно велик. Смыслом биоремедиации является очистка этих загрязнений с помощью микроорганизмов, вносимых в почву, или путем активизации деятельности аборигенной почвенной микрофлоры. Это – специальный вид технологии, несколько напоминающий сельскохозяйственные. Они включают рыхление и вспашку почвы, увлажнение или осушение, внесение удобрений и структураторов почвы. Выполняются работы либо по месту загрязнения, либо с вывозом грунта на специально оборудованные участки. В 1997г. в Германии состоялась первая международная конференция по биоремедиации. Спектр загрязняющих веществ, по которым проводятся работы, весьма велик. Это нефтепродукты, полиароматические углеводороды, нитроароматика, нитроцеллюлоза, тринитротолуол, нафталин, антрацен, фенантрен, полиалкилводород, бифенилы, иприт и другие ОВ, гептил, ионы металлов – хром, свинец, никель, цинк и многое другое.

5. Стабилизация окружающей среды при сельскохозяйственном производстве. При выращивании сельскохозяйственных растений современные технологии оказывают серьезное воздействие на окружающую среду. Минеральные удобрения, например, вымываются из почвы и приводят к эвтрофикации водоемов. Еще хуже ситуация с химическими пестицидами и инсектицидами, которые могут оставаться и в конечных продуктах сельского хозяйства – зерне, овощах, фруктах. Не решена окончательно проблема утилизации больших количеств накапливающейся соломы. Биотехнология предлагает для решения этих вопросов биоудобрения, биоинсектициды, феромоны, технологии биоконверсии соломы с получением белкового корма твердофазной ферментацией, специальные силосные закваски для силосования трав. Имеются сообщения о биотехнологических способах деградации отработанных полимерных пленок и мульчи. С животноводством связаны биодеградация и метановое сбраживание навоза с

получением удобрений и биогаза, пробиотики и ростовые гормоны для животных, кормовые антибиотики и вакцины животных, кормовой белок, получаемый микробиологическим способом из различных источников сырья, в основном отходов. Современная биотехнология и генная инженерия позволяет использовать получаемую из изолированных культур ткани безвирусную рассаду картофеля и других культур, трансгенные растения и животных с измененными характеристиками, обеспечивающих высокую хозяйственную продуктивность и экологичность сельскохозяйственного производства.

6. Замещение энергетических ресурсов. В этой области можно отметить следующие возможности биотехнологии:

- Получение биогаза путем биоконверсии различных органических отходов или специально выращиваемых быстрорастущих растений.
- Получение моторного топлива с использованием «биоспирта» – технического спирта, полученного путем биоконверсии сельскохозяйственных отходов, содержащих сахара, крахмал или лигноцеллюлозу. В Бразилии уже сейчас в качестве моторного топлива используют газохол – смесь бензина со спиртом.
- Получение водорода из отходов органического происхождения.
- Есть информация о культивировании специальных видов микроводорослей, накапливающих углеводороды, Пока что их эффективность невелика. Но нельзя исключать, что с помощью геной инженерии будут созданы хозяйственно рентабельные биотехнологические производства углеводородов, что позволит заместить убывающие запасы нефти возобновляемым углеводородным топливом.
- Особенно блестящие экологические перспективы сулит промышленное использование биофотолиза воды цианобактериями или их ферментными системами с получением водорода, хотя и здесь для практического решения задачи нужно решить много технических и биологических вопросов.

7. Реализация систем замкнутого водопользования. В таких системах отработанные водные потоки очищаются внутри самого производства, и очищенные – вновь используются в производстве. На Киришском биохимическом заводе, например, за счет такого решения удалось полностью исключить сброс промышленных стоков в водоемы. Интересно, что при этом снизились расходы и другого сырья – аммонийных и фосфорных солей, которые не сбрасывались в водоемы, а повторно использовались. При достаточно больших концентрациях органических загрязнений в отработанных потоках в

системах замкнутого водопользования должна быть биотехнологическая стадия обработки воды.

8. Замещающие технологии экологически чистых материалов и продуктов.

Этот раздел по существу касается многих продуктов разного назначения, производимых биотехнологией и имеющих свойства, снижающие экологическую нагрузку на природу. В качестве первого примера можно привести биоразлагаемые полимеры (полиоксибутират, полилактат), разлагающиеся с помощью почвенной микрофлоры и тем самым выгодно отличающиеся от полиэтилена, полипропилена, упаковка из которых создает ясно выраженную экологическую нагрузку на окружающую среду.

Можно также отметить биоудобрения и биоинсектициды, стиральные порошки с ферментами. Созданы биопрепараты против комаров, которые заражают их личинки и препятствуют размножению, и в то же время не оказывают воздействия на человека и окружающую среду, чем выгодно отличаются от химических средств. Конкурируют с обычными пищевыми продуктами такие продукты биотехнологического происхождения, как глюкозо-фруктозные сиропы, получаемые ферментативной обработкой крахмалистого сырья, подкислители – лимонная, молочная и другие органические кислоты, пищевые красители и биоконсерванты микробного происхождения (низин, дигидроксиацетон), пищевкусовая добавка – глутамат натрия, подсластители типа аспартама (в 200 раз слаще сахара), есть даже попытки создать мясо из мицелиальной биомассы съедобных грибов.

9. Биогеотехнология. При добыче природных ископаемых биотехнология также имеет ряд точек приложения.

- Биометаллургия – бактериальное выщелачивание цветных и драгоценных металлов из сульфидных руд вместо пиролитических процессов или использование аминокислотных гидролизатов микробных масс для выщелачивания золота из оксидных руд вместо неэкологичного процесса цианирования.
- Использование биополисахаридов (ксантанов), получаемых биотехнологическим путем, для повышения нефтеотдачи пластов при добыче нефти.
- Микробиологические методы борьбы с метаном в шахтах.
- Биосорбция благородных и редких металлов из морской воды.

10. Биомониторинг воздействия техногенных факторов на окружающую среду.

Чаще всего с помощью биологических методов мониторинга контролируют интегральное воздействие загрязнителей на окружающую среду. Наиболее известным примером такого

мониторинга является определение БПК – биологической потребности в кислороде, характеризующего собой «обобщенный субстрат» для активного ила или «обобщенный загрязнитель» с точки зрения чистоты воды. Подобного рода интегральных биотестов существует множество, и они продолжают разрабатываться. В иммунодиагностикумах, например, используются свойства антител животных клеток связывать строго определенные виды белков и других биополимеров.

Наконец, концентрации многих загрязняющих веществ определяются с помощью биосенсоров, основанных на специфических реакциях ферментов с измеряемым веществом. Здесь уже определяется не интегральное воздействие, а конкретная концентрация конкретного вещества.

3.3. Технологические системы

Технологическая система (ТС) – совокупность взаимосвязанных материальными, энергетическими и информационными потоками аппаратов, в которых осуществляется определенная последовательность операций для получения товарного продукта [2].

Элементами ТС являются условно неделимые единицы – технологические аппараты, в которых осуществляется целенаправленное протекание технологических процессов физической, химической и биологической природы.

Между элементами ТС имеется функциональная связь. Они взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой в виде материального, энергетического и информационного обмена.

Технологическая система изображается в виде технологической схемы. В качестве примера на рис. 3.1 приведена упрощенная технологическая схема производства белково-витаминного концентрата (БВК) из n-парафинов нефти⁸. Схема включает в себя ряд основных стадий производства, в которых происходит последовательная переработка исходного сырья в целевой продукт.

⁸ Лет 20- 30 тому назад БВК широко использовался для откорма скота. Под девизом «Зачем выращивать корма – давайте получать их из нефти», открывались все новые и новые заводы по производству БВК. Однако, скоро стало ясно, что получаемый белково-витаминный концентрат не безвреден для людей и животных, к тому же цены на нефть резко возросли и нефть стало выгодно продавать за границу. Часть заводов были закрыты.

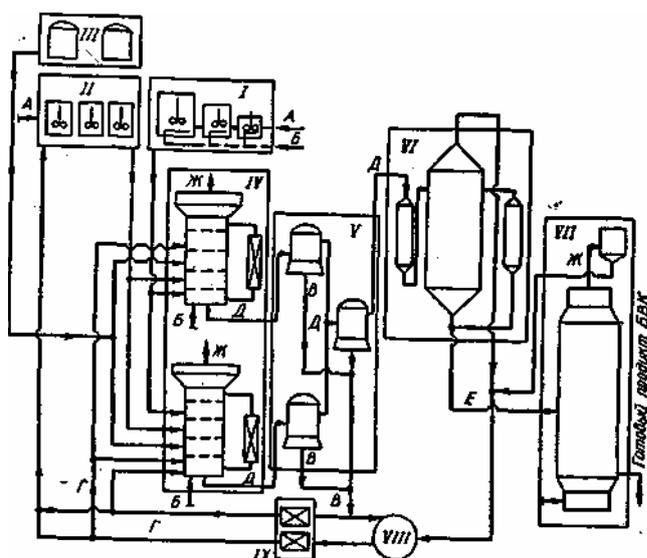


Рис. 3.2. Упрощенная технологическая схема производства белковой биомассы дрожжей из

н-парафинов нефти:

А — свежая вода; *Б* — воздух; *В* — культуральная жидкость; *Г* — биологически очищенная вода; *Д* — суспензия микроорганизмов; *Е* — сгущенная биомасса; *Ж* — отработанный газ;

I — подготовка засевной биомассы; *II* — подготовка питательной минеральной среды; *III* — подготовка субстрата; *IV* — ферментация; *V* — сепарационные сгущение; *VI* — термообработка и выпарка; *VII* — сушка; *VIII* — биохимическая очистка; *IX* — стерилизация

Стадия подготовки засевной биомассы обеспечивает подачу в производственные биореакторы необходимого количества посевного материала — активной культуры микроорганизмов, выращенной в периодических или непрерывно работающих инокуляторах. На стадии подготовки минеральной питательной среды осуществляется растворение минеральных солей, фильтрация растворов и доведение концентраций элементов в них до заданных соотношений. В качестве минеральных источников питания используют сернокислые соли калия, магния, железа, аммофос, сульфат аммония, а также микроэлементы — соли марганца, цинка, железа и меди. Подготовка углеводородного субстрата (стадия *III*) включает процессы подогрева, перемешивания жидких парафинов и их дозированной подачи в производственные биореакторы.

Основной стадией биохимического производства является *IV* — ферментация, представленная несколькими (в зависимости от мощности производства) параллельно работающими биореакторами, в которых осуществляется непрерывный процесс выращивания биомассы микроорганизмов в условиях аэрации и перемешивания ферментационной среды. Отбираемая суспензия микроорганизмов поступает на стадию сгущения *V*, где с помощью сепараторов концентрируется (в одну или две стадии) и затем поступает на стадию теплообработки и выпарки *VI* для дальнейшего концентрирования. Готовый продукт — белковая биомасса микроорганизмов — получается на стадии сушки *VII*, куда подается упаренная суспензия микроорганизмов. Одновременно с сушкой может осуществляться гранулирование продукта в сушилках — грануляторах. Культуральная жидкость или непосредственно, или после стадии биохимической очистки *VIII* может повторно использоваться в процессе после осуществления химической или тепловой стерилизации (стадия *IX*).

В представленной схеме наглядно видно многообразие технологических элементов, их взаимосвязь и целенаправленное функционирование. Так, из схемы ясно, что одна из основных стадии — стадия ферментации — будет работать эффективно лишь в том случае, если качественно функционируют стадии подготовки сырья и засевной биомассы. В то же время работа стадии ферментации во многом определяет работу последующих стадий — сгущения, сушки, очистки. Имеющиеся замкнутые циклы по жидкостным и газовым потокам создают возможность обратного влияния на процессе ферментации процессов подготовки сырья, сгущения и обработки биомассы. Использование, например, отработанной культуральной жидкости на стадии ферментации представляется выгодным и целесообразным с точки зрения минимизации потребления свежей воды.

Из рассмотренного примера следует, что анализ и синтез оптимальной технологической схемы, отвечающей высоким требованиям современного производства, невозможен без рассмотрения работы системы в целом, без учета взаимодействия элементов системы. Последнее возможно только при высокой степени формализации функционирования системы с использованием количественных оценок. При этом эффективность производства будет определяться как условиями взаимодействия между элементами системы — технологическими аппаратами, так и качеством функционирования самих аппаратов.

Условное графическое изображение последовательности технологических стадий при получении продукта называется блок – схемой.

Рассмотренная выше технологическая схема производства БВК может быть представлена в виде следующей блок-схемы (рис. 3.3):

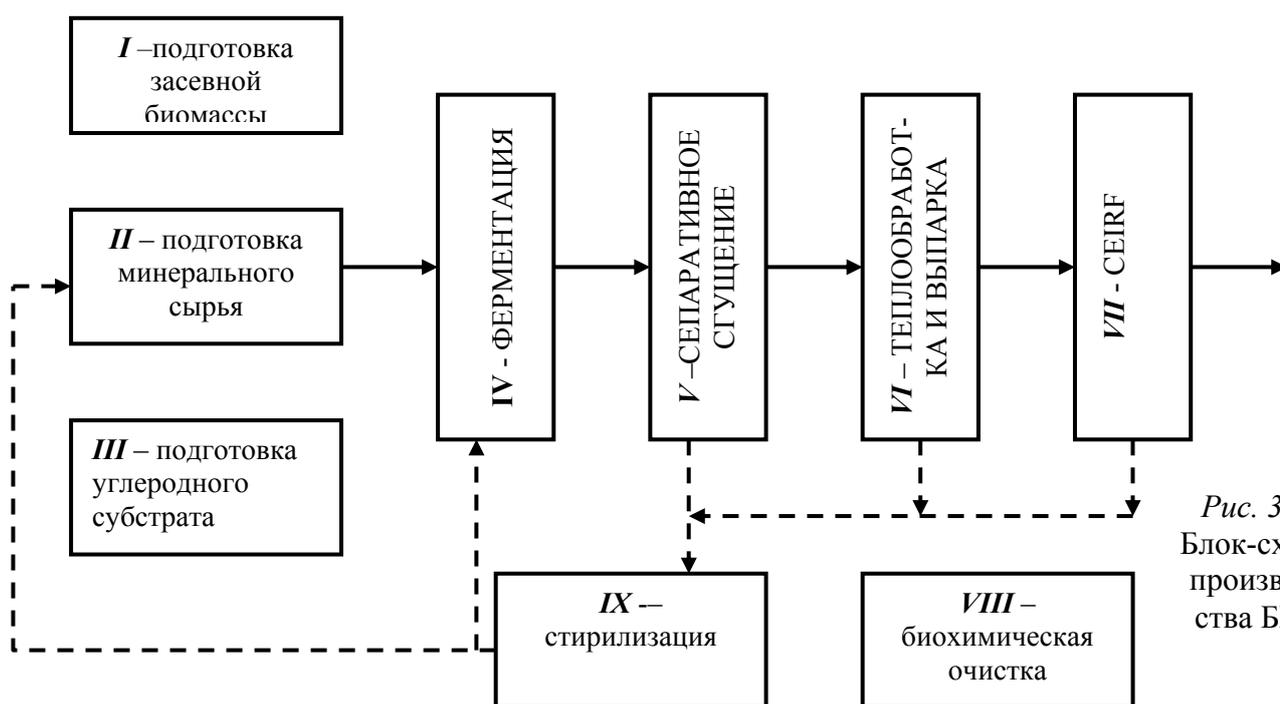


Рис. 3.3.
Блок-схема
производства БВК

Современные технологические линии и производства, характеризующиеся сложной многоуровневой структурой взаимосвязей эффектов физической, химической и биологической природы, наличием прямых и обратных потоков между технологическими аппаратами, могут рассматриваться как сложные кибернетические системы, при изучении которых используется стратегия системного анализа. На этой основе осуществляется синтез схем с применением методов автоматизированного расчета и оптимального проектирования ТС.

С позиций системного анализа решаются задачи математического моделирования на ЭВМ, при этом полная математическая модель системы может быть представлена в виде иерархической структурной модели, где на каждом уровне имеется описание своего класса явлений. Применение такого подхода к изучению сложных ТС позволяет целенаправленно использовать и систематизировать исследования, получаемые в лабораторных, опытных и промышленных условиях для разработки модели ТС в целом. Полученная таким образом математическая модель используется затем для оптимизации производства при его функционировании, а также на стадии проектирования производств

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бирюков В.В.* Роль биохимических технологий в задачах экологии. В кн. Материалы конференции «Основы экологической безопасности» /Под ред. *Г.А. Богдановского, Н.А. Галактионовой.* «Научные труды МНЭПУ». Вып. 4. Серия: «Реймерсовские чтения». – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – с. 45 – 51.
2. *Кафаров В.В.* и др. Моделирование и системный анализ биохимических производств. – М.: Лесн. Пром-сть, 2985. – 280 с.
3. *Радионон А.И.* и др. Технологические процессы экологической безопасности /Основы энвайронменталистики/: Учебник для студентов технических и технологических специальностей. 3-е изд. Перераб. И доп. – Калуга: Изд-во Технологические процессы экологической безопасности /Основы энвайронменталистики/: Учебник для студентов технических и технологических специальностей. 3-е изд. Перераб. И доп. – Калуга: Изд-во . Бочкаревой, 2000. – 800 с.

Раздел 4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Из чрезвычайно большого числа технологических процессов⁹ путем группирования выделяется ограниченное число основных процессов, включающих гидромеханические, тепловые, массообменные, химические (биохимические), механические процессы.

4.1. Классификация основных технологических процессов

Технологические процессы разделяют в зависимости от закономерностей, характеризующих их протекание, на пять основных групп.

Первая группа — *гидромеханические процессы*, скорость которых определяется только законами гидродинамики. К ним относятся осаждение взвешенных в жидкой или газообразной среде частиц под действием силы тяжести, центробежной силы или сил электрического поля, фильтрование жидкостей или газов через слой зернистого материала, происходящее под действием разности давлений, перемешивание в жидкой среде и др.

Вторая группа — *тепловые процессы*, скорость которых определяется законами теплопередачи. В эту группу входят процессы нагревания, вышаривания, охлаждения и конденсации.

Третья группа — *массообменные (диффузионные) процессы*. Скорость этих процессов определяется скоростью перехода веществ из одной фазы в другую, т. е. законами массопередачи. К диффузионным процессам относятся абсорбция, экстракция, ректификация, адсорбция, сушка и др.

Четвертая группа — *химические (биохимические) процессы*, связанные с превращением веществ и изменением их химических свойств. Скорость этих процессов определяется закономерностями химической (биохимической) кинетики.

Пятая группа — *механические процессы* — включает измельчение материалов, классификацию однородных сыпучих материалов и смешение их.

Как видно из изложенного, в основе классификации технологических процессов лежат *кинетические закономерности*¹⁰. В соответствии с указанным делением процессов целесообразно классифицировать и аппаратуру по следующим группам:

1. Гидромеханические аппараты.
2. Тепловые аппараты.

⁹ Здесь и далее речь идет об аппаратурно оформленных процессах химической, нефтехимической и биохимической технологий.

¹⁰ Кинетика – учение о процессе, его механизме и закономерностях протекания во времени [5].

3. Массообменные аппараты.

4. Реакторы — аппараты для осуществления собственно химических (биохимических) превращений.

Вне зависимости от кинетических закономерностей должна быть выделена группа машин и аппаратов для проведения механических процессов (измельчение, классификация и смешение твердых тел).

4.2. Кинетические закономерности основных технологических процессов

Особое значение имеет изучение кинетических закономерностей процессов, так как без знания их не представляется возможным рассчитать основные размеры аппаратов.

Кинетические закономерности перечисленных выше групп основных технологических процессов могут быть сформулированы в виде общего закона: *скорость процесса прямо пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению*. Назвав величину, обратную сопротивлению, *коэффициентом скорости*, запишем основные кинетические уравнения.

Для движения потока материалов (жидкости или газа) через аппарат:

$$\frac{dV}{f \cdot d\tau} = \frac{\Delta P}{R_1} = K_1 \Delta P, \quad (4.1)$$

где V — объем протекающей жидкости; f — площадь сечения аппарата; τ — время; K_1 — коэффициент скорости процесса (величина, обратная гидравлическому сопротивлению R_1); ΔP — перепад давления в аппарате. Для движения (переноса) тепла:

$$\frac{dQ}{F \cdot d\tau} = \frac{\Delta t}{R_2} = K_2 \Delta t, \quad (4.2)$$

где Q — количество переданного тепла; F — поверхность теплообмена; τ — время; K_2 — коэффициент теплопередачи (величина, обратная термическому сопротивлению R_2); Δt — средняя разность температур между обменивающимися теплом материалами. Для переноса вещества из одной фазы в другую:

$$\frac{dM}{F \cdot d\tau} = \frac{\Delta c}{R_3} = K_3 \Delta c, \quad (4.3)$$

где M — количество вещества, перенесенного из одной фазы в другую; P — поверхность контакта фаз; τ — время; K_3 — коэффициент массопередачи (величина, обратная диффузионному сопротивлению R_3); Δc — разность концентраций вещества в фазах.

Коэффициенты скорости различных процессов зависят главным образом от условий движения потоков материалов, поэтому вывод всех кинетических закономерностей основывается на законах движения материальных потоков.

Изучение законов движения реальных газов и жидкостей дает возможность познать не только эти законы, но попутно усвоить и метод изучения таких сложных технологических процессов, как теплообмен и массообмен. Все это является предметом изучения инженерного курса «Процессы и аппараты» (см., например, [1, 3, 4] и, естественно, в настоящем пособии не рассматривается.

Современный метод изучения сложных технологических процессов, разработанный школой отечественных ученых, объединяет теоретический анализ с практическим опытом. Описывающие процесс дифференциальные уравнения, которые выводятся теоретическим путем, на основе теории подобия преобразовываются в *обобщенные (критериальные)* уравнения. Последние по опытным данным приводятся к расчетному виду.

4.3. Процессы периодические, непрерывные, полупериодические.

По организационно-технической структуре процессы делятся на периодические, непрерывные и полупериодические (полунепрерывные).

В *периодическом процессе* отдельные его стадии (или операции) осуществляются в одном месте (в одном аппарате или машине), но в разное время. Загрузка-выгрузка – единовременная.

В *непрерывном процессе* отдельные его стадии осуществляются одновременно, но в разных местах (в разных аппаратах или машинах). Загрузка-выгрузка – непрерывная.

Полупериодические процессы являются промежуточным вариантом между периодическими и непрерывными процессами. Загрузка (выгрузка) – единовременная, а выгрузка (загрузка) – непрерывная. Эти процессы получили большое распространение в биохимических технологиях, когда, например, единовременная загрузка всего исходного сырья (субстрата) не возможна в силу специфической особенности утилизации субстрата – субстратному ингибированию роста микроорганизмов.

Для примера рассмотрим процесс, который складывается из стадий загрузки перерабатываемого материала в установку, нагревания его, перемешивания, охлаждения и выгрузки из установки готового продукта. Этот процесс может осуществляться периодически или непрерывно.

При периодическом осуществлении процесса все перечисленные стадии протекают в разное время в одном аппарате, который соответствующим образом приспособлен для

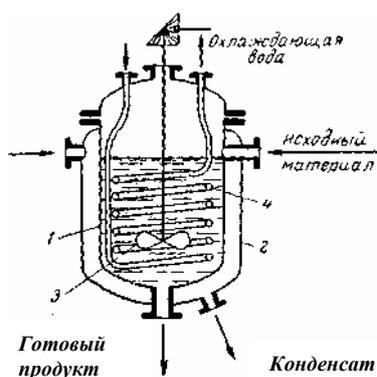


Рис. 4-1. Аппарат для осуществления периодического процесса:
1 — корпус; 2 — паровая рубашка; 3 — мешалка; 4 — змеевик

этого. Исходный материал загружается (рис. 4.1) внутрь аппарата. После загрузки материал нагревается водяным паром, который подается в рубашку 2. Пар отдает тепло перерабатываемому материалу через стенку корпуса 1 и при этом конденсируется; конденсат отводится через нижний патрубок в рубашке. Стадия перемешивания осуществляется при вращении мешалки 3. После перемешивания следует охлаждение материала водой, которая подается в змеевик 4. Готовый продукт выгружается через патрубок в днище аппарата.

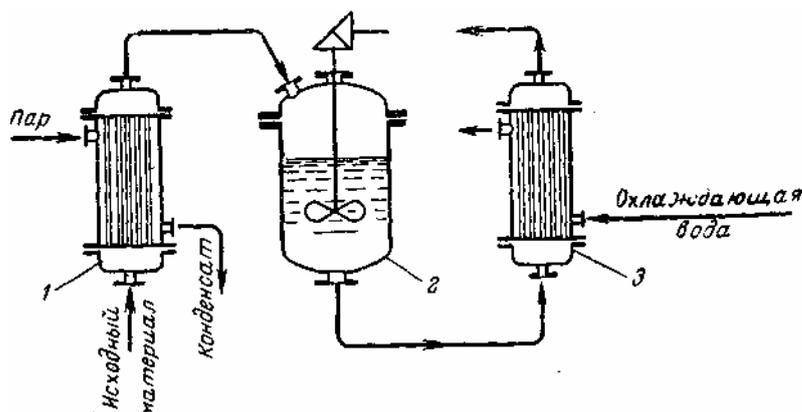


Рис. 4.2. Схема установки для осуществления непрерывного процесса:
1 — теплообменник-нагреватель; 2 — аппарат с мешалкой; 3 — теплообменник-холодильник.

При непрерывном осуществлении процесса все стадии протекают одновременно в различных аппаратах (рис. 4.2). Материал непрерывно загружается в установку, состоящую из ряда специализированных аппаратов. Нагревание его происходит в теплообменнике 1, перемешивание в аппарате с мешалкой 2, охлаждение в холодильнике 3. Готовый продукт непрерывно выводится из холодильника.

Для более четкой характеристики периодических и непрерывных процессов используют следующие понятия и обозначения.

Непрерывные процессы имеют значительные преимущества перед периодическими: возможность специализации аппаратуры для каждой операции (стадий) непрерывного процесса, стабилизация процесса во времени, улучшение качества продукта, легкость

регулировки и, главное, возможность автоматизации. Этими преимуществами объясняется неизменная тенденция перехода от периодических процессов к непрерывным.

Непрерывно действующие аппараты в зависимости от характера движения и изменения параметров перерабатываемых материалов делят на *аппараты полного смешения*, *аппараты полного вытеснения* и *аппараты промежуточного типа*.

При проведении процессов в любом из перечисленных аппаратов изменяются значения параметров перерабатываемых материалов. Параметрами, характеризующими процесс, являются давление, плотность, скорость потока перерабатываемого материала, концентрация, температура, энтальпия и другие.

Проанализируем характер изменения значений параметра, обуславливающего движущую силу процесса, в непрерывно действующих аппаратах полного смешения, полного вытеснения и промежуточного типа. Рассмотрим в качестве примера процесс нагревания жидкости (от температуры t_n до t_k) конденсирующимся паром (имеющим температуру t_s) через разделяющую их стенку. Определим характер изменения температуры нагреваемой жидкости в непрерывно действующих аппаратах различных типов.

В аппарате полного вытеснения (рис. 4-3, *а*) температура жидкости плавно меняется по длине (высоте) l аппарата от начальной t_n до конечной t_k в результате того, что протекающие через аппарат последующие объемы жидкости не смешиваются с предыдущими, полностью вытесняя их.

В аппарате полного смешения (рис. 4.3, *б*) последующие и предыдущие объемы жидкости идеально смешаны, температура жидкости в аппарате постоянна и равна конечной величине t_k .

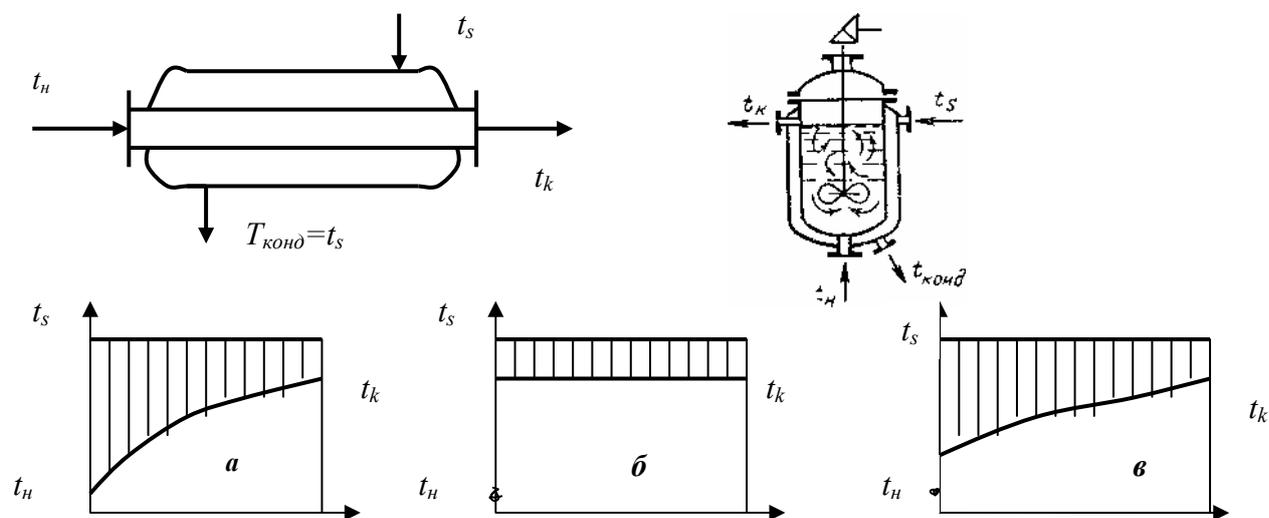


Рис. 4.3. Характер изменения температуры при нагревании жидкости в аппаратах *а* – полного вытеснения; *б* – полного смешения; *в* – промежуточного типа.

Как видно из изложенного, в аппаратах перечисленных типов различен характер изменения температур нагреваемой жидкости.

Движущая сила процессов представляет разность между предельным численным значением параметра и действительным значением его, например, разность между предельной в рассматриваемом процессе температурой и действительной — рабочей. Пусть это предельное значение температуры равно t_s , а действительное t , тогда движущая сила процесса может быть выражена разностью $t - t_s$.

На рис. 4.3 показано изменение движущей силы (разности температур) в непрерывно действующих аппаратах различных типов. Среднее для процесса значение движущей силы пропорционально величинам заштрихованных площадей.

Как видно из рисунка, наибольшая величина движущей силы соответствует аппаратам полного вытеснения, наименьшая — аппаратам полного смешения и промежуточная — аппаратам промежуточного типа.

4.4. Гидромеханические процессы

В различных химических и нефтехимических производствах многие процессы приводят к образованию неоднородных смесей, подлежащих разделению, с целью очистки газовой или жидкой фазы от взвешенных в них загрязняющих частиц или выделения ценных продуктов. Часто встречаются задачи противоположного характера — получение смесей веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях.

Решение обеих задач основывается на законах гидродинамики.

Гидромеханические процессы — технологические процессы, скорость протекания которых определяется законами гидродинамики. К ним относятся осаждение взвешенных в жидкой или газообразной среде частиц под действием сил тяжести, центробежной силы или сил электрического поля, фильтрование жидкостей или газов через слой зернистого материала, происходящей под разностью давлений, перемешивание в жидкой среде, псевдооживление твердого зернистого материала.

4.4.1. Классификация неоднородных систем

Неоднородные системы состоят, по меньшей мере, из двух фаз: внутренней или **дисперсной** фазы, находящейся в тонко раздробленном состоянии, и внешней фазы или дисперсионной среды, окружающей частицы внутренней дисперсной фазы.

В процессах осаждения и фильтрования обрабатываются следующие неоднородные системы:

1. АЭРОЗОЛИ (системы, в которых дисперсионной средой служит газ, а дисперсной — твердые или жидкие частицы):

- **Пыль** – система, состоящая из газа и распределенных в нем твердых частиц, размером **5-50** мкм ($1\text{мкм}=10^{-3}\text{мм}$), она образуется преимущественно при дроблении и транспорте твердых материалов.
- **Дым** – система, состоящая из газа и распределенных в нем твердых частиц размерами **0,3-5** мкм, получающихся при конденсации и отвердевании.
- **Туман** - система, состоящая из газа и распределенных в нем капель жидкости размерами **0,3-3** мкм, образовавшихся в результате конденсации.

2. СУСПЕНЗИЯ – система, состоящая из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц. В зависимости от размеров взвешенных частиц различают суспензии: *грубые* с частицами размером **>100** мкм; *тонкие*, твердые частицы которых имеют размеры **100-0,1** мкм, и *коллоидные растворы*, содержащие твердые частицы размерами **0,1** мкм и меньше.

3. ЭМУЛЬСИЯ – система, состоящая из жидкости и распределенных в ней капель другой жидкости, не растворяющейся в первой. Величина частиц дисперсной фазы колеблется в довольно широких пределах.

3, ПЕНА - система, состоящая из жидкости и распределенных в ней пузырьков газа.

Неоднородные системы характеризуются весовым или объемным соотношением дисперсной и дисперсионной фаз и размерами частиц дисперсной фазы. Принято использовать характеристику, называемую *фракционный или дисперсный состав* (процент содержания частиц различного размера).

4.4.2. Осаждение

Осаждение – разделение жидких или газовых неоднородных систем путем выделения из жидкой или газовой фазы твердых или жидких взвешенных частиц; такое выделение может осуществляться под действием сил тяжести (*отстаивание*), центробежной силы (*циклонный процесс* или *отстойное центрифугирование*), а также под действием сил электрического поля (*электроочистка*).

ОТСТАИВАНИЕ

Отстаивание (**О**) применяют для разделения пылей, суспензий и эмульсий. Из-за небольшой скорости осаждения взвешенных частиц **О** применяют для частичного разделения неоднородных систем (**НС**): пылей, суспензий и эмульсий. Преимущества процесса – простое аппаратное оформление и малые энергетические затраты.

Движущая сила процесса – сила тяжести.

Сущность **О** заключается в том, что **НС** пропускается через камеру (рис. 4.4), на дно которой под действием сил тяжести осаждаются взвешенные частицы. При отстаивании

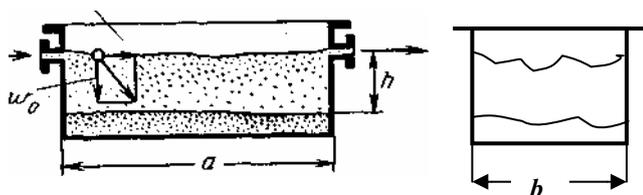


Рис. 4.4. К определению производительности отстойника

должны соблюдаться два основных требования: 1) время пребывания элементов потока в аппарате должно быть равно или больше времени осаждения частиц; линейная скорость потока в аппарате должна быть значительно меньше, чем скорость осаждения.

Несоблюдение первого приводит к тому, что частицы не успевают осесть, а второго – к тому, что возникающие вихревые токи поднимают осаждающиеся частицы.

Установим связь между производительностью отстойной камеры и ее размерами. Обозначим (рис. 4.4):

$V_{сек}$ – производительность камеры м³/сек;

ω_0 – скорость осаждения частицы в м/сек;

τ_0 – время осаждения частицы в сек;

ω – линейная скорость потока в аппарате в м/сек;

a, b, h – размеры камеры в м.

Рабочий объем аппарата может быть определен по уравнению:

$$V_p = a \cdot b \cdot h = V_{сек} \cdot \tau_0 \quad (4.1)$$

Но $\tau_0 = h/\omega_0$, тогда

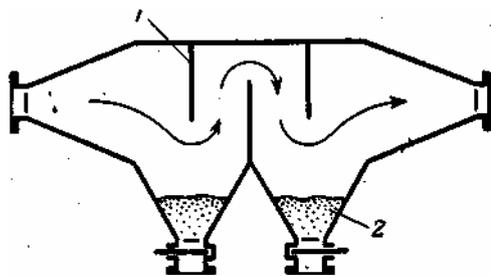
$$V_{сек} = a \cdot b \cdot \omega_0 \quad (4.2)$$

Произведение $a \cdot b = F$ есть площадь осаждения и, следовательно, производительность отстойного аппарата равна произведению площади осаждения на скорость осаждения. Скорость осаждения, необходимая для расчета определяется закономерностями гидродинамики через критериальное уравнение, связывающее критерии Рейнольдса и Архимеда.

Аппараты, предназначенные для проведения процессов отстаивания, обычно называются отстойниками.

Отстойники для пылей. Все отстойники для пылей являются непрерывно действующими или полунепрерывно действующими аппаратами. Газовый поток проходит через аппарат непрерывно, а осевшая пыль выгружается из него или непрерывно, или периодически.

Простейшим отстойником является отстойный газоход — расширенная часть



-Рис. 4.5. Отстойный газоход: 1 — перегородка; 2 — сборник пыли.

газопровода (рис. 4.5.). Отстойный газоход снабжается перегородками 1 и сборниками пыли 2. Благодаря наличию перегородок газовый поток завихряется и возникающие при этом центробежные силы способствуют осаждению частиц пыли. Из сборников пыль выгружается периодически.

Отстойники для суспензий. Отстойники для суспензий работают как полуперенно действующие или непрерывно действующие аппараты.

На рис. 4.6. показан непрерывно действующий отстойник с гребками. В производственных условиях такой отстойник является наиболее рентабельным. Суспензия поступает в верхнюю часть аппарата, осветленная жидкость выводится через кольцевой желоб 2, осадок собирается в нижней части аппарата. Гребок 1, совершающий

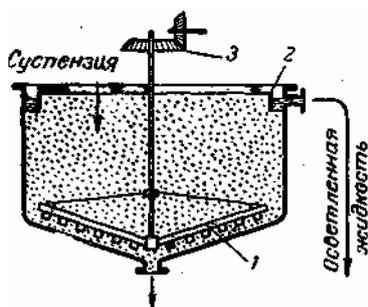


Рис. 4.6. Непрерывно действующий отстойник с гребком: 1 — гребок; 2 — кольцевой желоб; 3 — привод

0,02—0,5 оборота в 1 мин, разрыхляет осадок и перемещает его по дну к разгрузочному штуцеру в центре отстойника.

Удаляемый из отстойников осадок содержит много жидкости. Эта жидкость в большинстве случаев является ценным продуктом, поэтому ее необходимо извлекать из осадка. Извлечение жидкости из осадка в процессе непрерывного отстаивания достигается в установке для противоточной промывки

Отстойники для амальсий различают периодического и непрерывного действия.

Непрерывно действующий отстойник для эмульсий представляет собой цилиндрическую емкость, снабженную вводным и выводным патрубками. Эмульсия вводится в среднюю часть аппарата между двумя перфорированными перегородками. После расслаивания легкая жидкость удаляется из аппарата через верхний отводный патрубок, а тяжелая — через нижний.

В заключение отметим, что конструктор отстойной аппаратуры имеет незначительные возможности для интенсификации процесса. Единственным путем интенсификации является увеличение площади осаждения, что достигается размещением в аппарате большого числа полок.

ОСАЖДЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ (ОЦС)

ОЦС применяется для разделения пылей, суспензий и эмульсий. Чтобы осуществить этот процесс, к осаждаемым частицам необходимо приложить центробежные силы, что достигается введением разделяемого потока в поле действия центробежных сил.

Для создания поля центробежных сил в технике используется два приема: 1) обеспечивают вращательное движение потока жидкости (газа) в неподвижном аппарате; 2) поток направляют во вращающийся аппарат, где перерабатываемые продукты вращаются вместе с аппаратом. В первом случае происходит *циклонный процесс*, а во втором – *отстойное центрифугирование*.

Физическая сущность ОЦС заключается в том, что во вращающемся потоке на взвешенную частицу действует центробежная сила, направляющая ее к периферии от центра по радиусу со скоростью, равной скорости осаждения $\cdot\omega_0$ (рис.4.7). Окружная скорость несущего частицу потока $\cdot\omega_r$. Частица движется а результирующей скоростью $\cdot\omega_p$ по траектории *abc* и оседает на стенках аппарата.

Процесс осаждения протекает под действием центробежной силы

$$G_u = \frac{m \cdot \omega_r^2}{r}, \quad (4.3)$$

где m – масса частицы; $\cdot\omega_r$ – окружная скорость частицы; r – радиус вращения частицы.

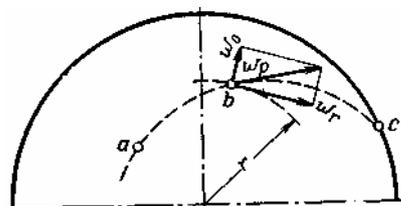


Рис. 4.7. К физической сущности процесса осаждения частиц под действием центробежной силы.

Если вспомнить, что сила тяжести без учета подъемных (архимедовых) сил составляет:

$$G_\gamma = m \cdot g \quad (4.4)$$

Из сопоставления уравнений (3) и (4) следует:

$$G_u = G_\gamma \cdot \frac{\omega_r^2}{g \cdot r}, \quad (4.5)$$

т.е. центробежная сила больше силы тяжести в $\omega^2 r/g$ раз. В производственных процессах соотношение между ω и r таково, что центробежная сила не меньше, чем на два порядка превышает силу тяжести.

Циклонный процесс используется преимущественно для разделения пылей, однако находит свое применение и для разделения суспензий (*гидроциклоны*).

Сущность циклонного процесса заключается в том, что поток, несущий взвешенные частицы, вводят в аппарат тангенциально через входную трубу (рис. 4.8) с рассчитанной скоростью 10 – 40 м/сек. В случае газов и 5 – 25 м/сек в случае жидкостей. Благодаря тангенциальному вводу и наличию центральной выводной трубы поток начинает вращаться вокруг последней, совершая при прохождении через аппарат несколько оборотов. Под действием возникающих центробежных сил взвешенные частицы отбрасываются к периферии, оседают на внутренней поверхности корпуса 1, а затем опускаются в коническое днище 2 и удаляются из аппарата через патрубок. Освобожденный от взвешенных частиц поток выводится из циклона через выводную трубу.

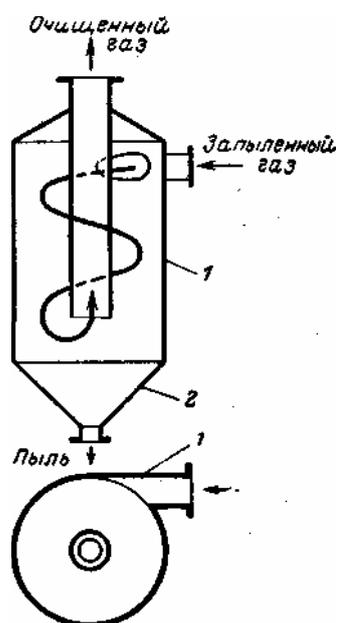


Рис. 4.8. Схема устройства циклона:

1 – корпус; 2 – коническое днище.

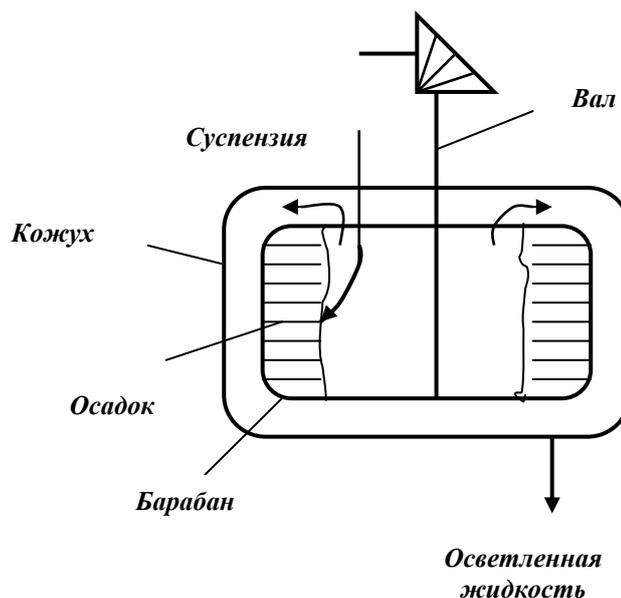


Рис. 4.9 Схема отстойной центрифуги периодического действия с ручной выгрузкой осадка.

Отстойное центрифугирование применяется преимущественно для разделения суспензий и эмульсий во вращающихся аппаратах, называемых *отстойными центрифугами*.

Процесс осаждения в центрифугах характеризуется теми же законами, что и осаждение в циклонах, а следовательно и все приведенные выше формулы справедливы и для них.

Центрифуги различают по *принципу действия* (периодические, непрерывные); по *способу выгрузки материала* (с ручной и механизированной выгрузкой) и по *расположению вала* (вертикальные, горизонтальные, наклонные).

Схема простейшей отстойной центрифуги с вертикальным расположением вала показана на рис.4.9. Центрифуга рассчитана на ручную выгрузку осадка.

Основные части этой центрифуги – сплошной барабан 2, насаженный на вращающийся вал 1, и кожух 3. Под действием центробежной силы твердые частицы осаждаются из суспензии, подаваемой в центрифугу, и отлагаются в виде сплошного осадка на стенке барабана; осветленная жидкость переливается в кожух и удаляется из него через расположенный внизу патрубок. По окончании отстаивания центрифугу останавливают и выгружают осадок вручную.

Непрерывно действующая горизонтальная отстойная центрифуга с механизированной выгрузкой осадка показана на рис. 4.10. Она оборудована коническим вращающимся барабаном 1 и разгрузочным шнеком 6, помещенным внутри барабана. Исходная суспензия вводится по трубе внутрь шнека и под действием центробежной силы выбрасывается через окна 3 во внутреннюю полость барабана 1. В барабане происходит отстаивание суспензии. Осветленная жидкость под действием центробежной силы

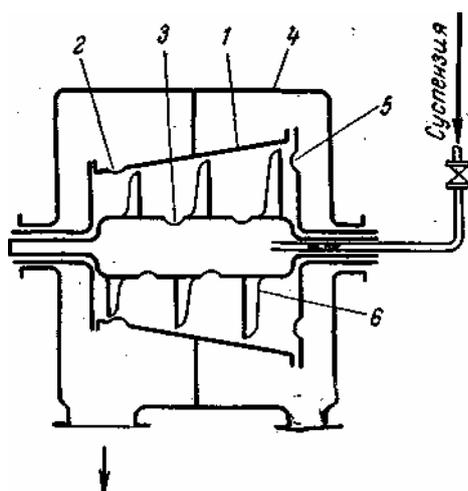


Рис. 4.10. Схема непрерывнодействующей горизонтальной отстойной центрифуги с механизированной выгрузкой осадка:
1 — барабан; 2, 3, 5 — окна; 4 — кожух; 6 — разгрузочный шнек.

перемещается к окнам 5, перетекает в кожух 4 и удаляется через нижний патрубок. Осадок непрерывно перемещается в барабане справа налево при помощи шнека, который вращается со скоростью, несколько меньшей, чем скорость вращения

барабана. Через окна 2 осадок выбрасывается в кожух и выводится из центрифуги через распо-ложенный внизу патрубков.

Отстойные центрифуги для разделения эмульсий называются *сепараторами*. В промышленности широко применяются *одно-* и *многокамерные*, а также *тарельчатые сепараторы*. Так же, как и центрифуги, они имеют барабан, насаженный на вертикальный вал с приводом.

Осаждение под действием электрического поля взвешенных в газе твердых и жидких частиц имеют существенные преимущества с другими способами осаждения. Так, при электрическом осаждении частиц небольших размеров им удастся сообщить значительный электрический заряд и благодаря этому осуществить процесс осаждения очень малых частиц, который невозможно провести под действием силы тяжести или центробежной силы.

Физическая сущность электроосаждения состоит в следующем. Газовый поток, содержащий взвешенные частицы, ионизируют. При этом они приобретают электрический заряд. При прохождении ионизированного газового потока в электрическом поле между двумя электродами заряженные частицы перемещаются к противоположно заряженным электродам и оседают на них.

В промышленности электроосаждение взвешенных частиц из газа проводится следующим способом. Газовый поток направляется внутрь трубчатых (или между пластинчатыми) положительных электродов, которые заземляются. Внутри трубчатых электродов (рис. 4.11, а) или между пластинчатыми электродами (рис. 4.11, б) натягиваются тонкие проволоки, являющиеся катодами.

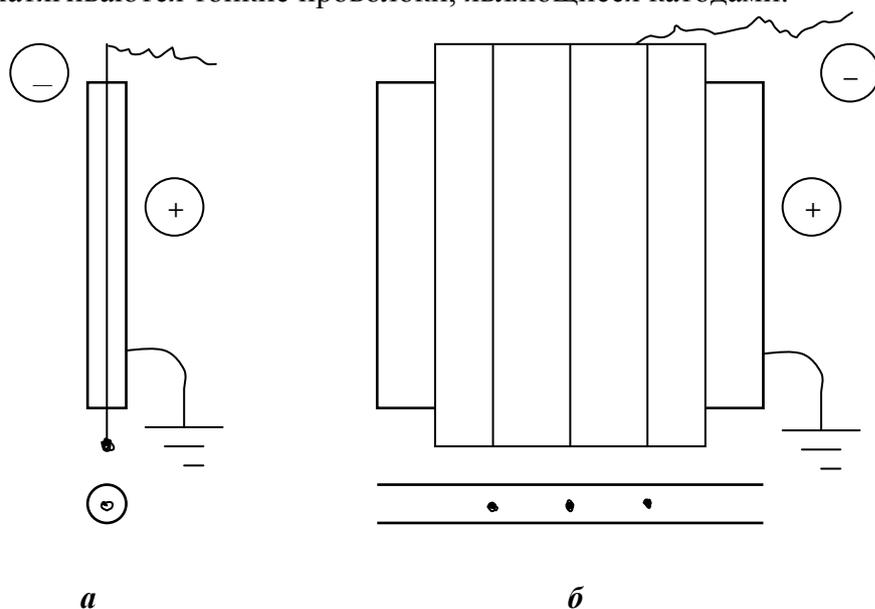


Рис. 4.11. Формы алектродов: а — трубчатые; б — пластинчатые

Если соединить электроды с источником постоянного тока, создающего на электродах разность потенциалов 4—6 кВ/см, и обеспечить плотность тока 0,05—0,5 мА/м длины катода, то запыленный газ при пропускании его между электродами почти полностью освобождается от взвешенных частиц.

В процессах электроосаждения происходят следующие электрические явления. Вследствие высокой разности потенциалов на электродах и неоднородности электрического поля (сгущение силовых линий у электрода с меньшей поверхностью — катода) в слое газа у катода образуется односторонний поток электронов, направленный к аноду. В этом слое в результате соударений электронов с нейтральными молекулами газ ионизируется. Внешним признаком ионизации является свечение слоя газа или образование «короны» у катода.

При ионизации образуются как положительные, так и отрицательные ионы; положительные ионы остаются вблизи «короны», а отрицательные направляются с огромной скоростью к аноду, встречая и заряжая на своем пути взвешенные в газе частицы.

Получившие отрицательный заряд взвешенные частицы под действием электрического поля перемещаются к аноду. Скорость движения взвешенных частиц, получивших заряд, невелика; она зависит от размера частиц и гидравлического сопротивления газовой среды. Обычно скорости электроосаждения колеблются в пределах от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров в секунду.

Скорость электроосаждения несколько увеличивается под влиянием «электрического ветра», возникающего вследствие передачи импульса движущихся ионов газа газовой среде и взвешенным частицам.

Аппарат для электроосаждения называют в технике *электро-фильтрами*. Электрофильтры по форме электродов делятся на *трубчатые* и *пластинчатые*. Трубчатый электрофильтр показан на рис. 4.12. Запыленный газ поступает в аппарат через газозабор и распределяется по трубчатым электродам 1, внутри которых находятся коронирующие электроды 2. Они подвешены на общей раме 3, опирающейся на изоляторы 5. Осаждающиеся на внутренней поверхности трубчатых электродов частицы стряхиваются ударным приспособлением 4 и собираются в нижней части аппарата. Очищенный газ удаляется через газозабор.

Аналогично предыдущему устроен пластинчатый электрофильтр (рис. 4.13). В этом аппарате коронирующими электродами служат проволоки 1, а осадительными — пластины 2, выполненные из проволочной сетки.

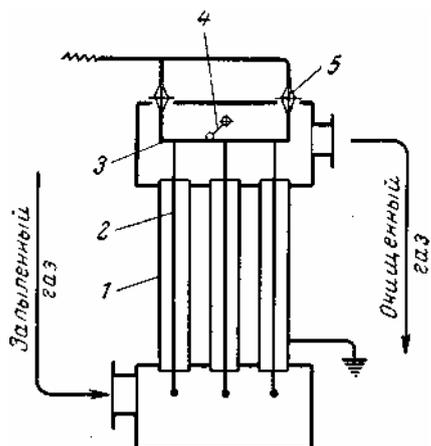


Рис. 4-12. Трубчатый электрофильтр:

1 — осадительный (трубчатый) электрод; 2 — коронирующий электрод; 3 — рама; 4 — встряхивающее приспособление; 5 — изоляторы

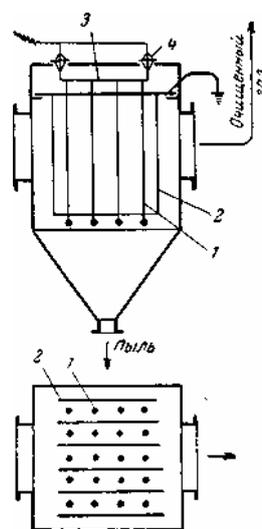


Рис. 4-13. Пластинчатый электрофильтр:

1 — коронирующие электроды; 2 — осадительные (пластинчатые) электроды; 3 — рама; 4 — изоляторы

В зависимости от характера осаждаемых из газа частиц, различают *сухие* и *мокрые электрофильтры*. Первые применяют для очистки газов от пыли, а вторые — от мельчайших капель жидкости, взвешенных в газе.

4.4.3. Фильтрация

Фильтрация - разделение жидких или газовых неоднородных систем путем пропускания их через пористую перегородку, способную пропускать жидкость или газ и задерживать взвешенные частицы.

Движущей силой процесса фильтрации является разность давлений перед фильтром и после него или центробежная сила, оказывающая давление на фильтр. Соответственно этому различают *фильтрацию под действием перепада давления*, или просто *фильтрацию*, и *центробежную фильтрацию*, или *центрифугирование*.

В качестве фильтрующих материалов в промышленных аппаратах применяют естественные и искусственно изготавливаемые зернистые и пористые тела: песок, гравий, ткани, сетки, пористую керамику, пористые пластические массы и т.д. Фильтры, работающие под давлением, называются нагнетательными, а под разрежением — всасывающими.

Схема фильтра, в котором осуществляется фильтрация под действием перепада давления с отложением осадка приведена на рис. 4.14.

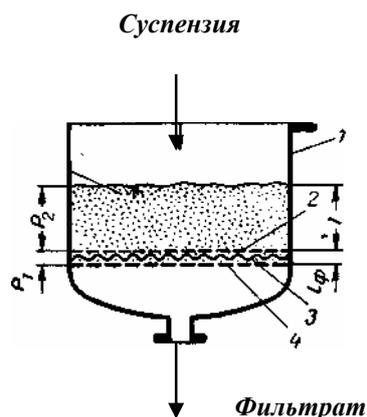


Рис. 4.14. Схема фильтра:
1 — емкость; 2 — фильтрующая ткань;
3 — дренажная сетка; 4 — опорная
решетка.

Фильтрация под действием центробежной силы проводится на *фильтрующих центрифугах*. Барабан этих центрифуг с перфорированной стенкой выкладывается изнутри мягким пористым материалом, выполняющим роль фильтрующей перегородки. При вращении барабана осадок откладывается на внутренней (боковой) поверхности барабана, а удаление осветленной жидкости осуществляется через фильтрующую перегородку и отверстия в барабане.

По технологическому признаку фильтрующую аппаратуру подразделяют на *газовые фильтры* (для очистки газов), *жидкостные фильтры* (для разделения суспензий) и *фильтрующие центрифуги* (также для разделения суспензий).

4.4.4. Перемешивание в жидкой среде

Перемешивание в жидкой среде – создание необходимого поля скоростей потоков жидкости в аппаратуре путем сообщения жидкости определенной энергии. Применяется для получения эмульсий и суспензий, а также для интенсификации тепловых, диффузионных и химических (биохимических) процессов. Преимущественное значение в химической и нефтехимической промышленности имеет *механическое перемешивание*. Интенсивность перемешивания определяется количеством энергии, вводимой в единицу объема перемешиваемой среды в единицу времени. Интенсивность перемешивания обуславливает характер движения данной жидкости в аппарате.

Механическое перемешивание осуществляется при помощи *мешалок* различного типа. Мешалка чаще всего представляет собой ту или иную комбинацию лопастей, насаженных на вращающийся вал. Различают *лопастные, пропеллерные и турбинные мешалки*. На рис. 4.15 показаны наиболее распространенные пропеллерные и турбинные мешалки.

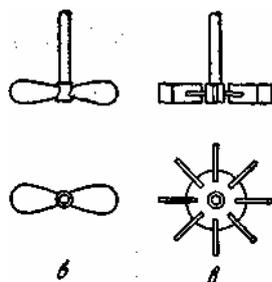


Рис. 4.15. Основные типы мешалок:
б — пропеллерная; в — турбинная.

Пневматическое перемешивание осуществляется путем пропускания газа через слой перемешиваемой жидкости. Сжатый газ (обычно воздух) поступает в аппарат наполненный жидкостью. Газ распределяется *барботером*, представляющим собой ряд горизонтально расположенных у дна аппарата перфорированных труб. Обычно трубы изогнуты по окружности или спирали.

Циркуляционное перемешивание проводится многократным прокачиванием жидкости через систему аппарат – циркуляционный насос – аппарат. Соответственно принятой кратности циркуляции (отношению секундной производительности циркуляционного насоса к объему жидкости в аппарате) обеспечивается та или другая интенсивность перемешивания.

4.4.5. Псевдооживление

Псевдооживление – П. твердого зернистого материала называют приведение его в такое состояние, при котором его свойства по многим показателям приближаются к свойствам жидкости; такое состояние достигается в результате пропускания через слой свободно лежащего твердого зернистого материала восходящего потока газа или жидкости. Псевдооживленный слой принимает форму вмещающего его аппарата, его поверхность гооризонтальна. Обнаруживаются и другие свойства, присущие жидкостям – текучность, «вязкость» и поверхностное натяжения. Тела, имеющие меньший удельный вес, чем псевдооживленный слой, в нем, а больший – тонут.

Широкое применение техника псевдооживления нашла в связи с рядом важных преимуществ. Твердый зернистый материал в псевдооживленном состоянии вследствие текучести можно перемещать по трубам, что позволяет многие периодические процессы осуществлять непрерывно. Благодаря интенсивному перемешиванию твердых частиц в псевдооживленном слое выравнивается поле температур, устраняется возможность значительных локальных перегревов, хотя при этом происходит уменьшение движущей силы процесса.

Процессы, в которых псевдооживление широко применяется:

- 1) Химические: каталитический крекинг нефтепродуктов, гетерогенные каталитические реакции, газификация топлива, обжиг сульфидных руд и т.д.

- 2) Физические и физико-химические: сушка мелкозернистых, пастообразных и жидких материалов, адсорбционная очистка газов, нагрев и охлаждение газов и др.
- 3) Механические: обогащение, классификация, гранулирование, смешение и транспортировка зернистых материалов.

Гидродинамическая сущность процесса псевдооживления заключается в следующем. Если через слой зернистого материала, расположенного на поддерживающей перфорированной решетке аппарата, проходит поток псевдооживляющего агента (газа или жидкости), то состояние слоя оказывается различным в зависимости от скорости этого потока.

При плавном увеличении скорости от «0» до некоторого первого критического значения происходит обычный процесс фильтрования, при котором твердые частицы неподвижны (рис. 4.16, а). На графике процесса псевдооживления (рис.4.17), называемом кривой псевдооживления и выражающем зависимость перепада статического давления в слое зернистого материала от скорости псевдооживляющего агента, процессу фильтрации соответствует восходящая ветвь ОА.

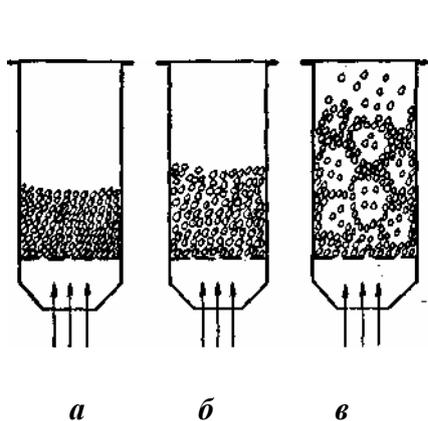


Рис. 4.16. Различные состояния слоя зернистого материала при прохождении через него потока газа (жидкости).

а – неподвижный слой (режим фильтрации); б – однородный псевдооживленный слой при $W \geq W_{пс}$; в – неоднородный псевдооживленный слой

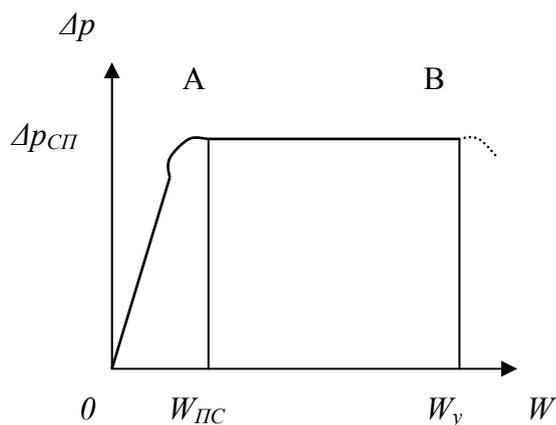


Рис. 4.17. Изменение перепада давления в зависимости от скорости потока, проходящего через слой (кривая идеального псевдооживления)

Переход от режима фильтрации к состоянию псевдооживления соответствует на кривой псевдооживления критической скорости псевдооживляющего агента $W_{пс}$ (точка А, рис. 4.17, называемой скоростью начала псевдооживления).

Начиная со скорости псевдооживления и выше сопротивление слоя $\Delta P_{сн}$ сохраняет практически постоянное значение и зависимость $\Delta P = f(W)$ выражается прямой АВ,

параллельной оси абсцисс. Это объясняется тем, что с ростом скорости псевдоожигающего агента контакт между частицами уменьшается и они получают большую возможность хаотического перемешивания по всем направлениям. При этом возрастает среднее расстояние (просветы) между частицами, т.е. увеличивается порозность слоя, а следовательно его высота h . Порозность неподвижного слоя ϵ_0 – это отношение

$$\epsilon_0 = (V_0 - V) / V_0,$$

где V и V_0 – объем неподвижного слоя и объем частиц.

В зависимости от свойств псевдоожигающего потока и его скорости можно наблюдать несколько стадий процесса псевдоожигания. При скоростях псевдоожигающего агента, незначительно превышающих критическую скорость W_{nc} , т.е. при $W \geq W_{nc}$, наблюдается так называемое *однородное («спокойное») псевдоожигание* (рис. 4.16,б).

По мере роста скорости при псевдоожигании газов в слое возникают компактные массы газа («пузыри», «каверны»), интенсивно турбулизирующие твердые частицы и образующие всплески зернистого материала на поверхности. При этом наблюдаются значительные пульсации статического и динамического напора псевдоожигающего агента. Такой характер гидродинамики слоя называется *неоднородным псевдоожиганием* (рис. 4.16, в).

Наконец, при достижении некоторого второго критического значения скорости W_u , называемой скоростью уноса, твердые частицы начинают выноситься из слоя и их количество в аппарате уменьшается. Порозность такого слоя стремится к 1, и сопротивление слоя правее точки В (рис. 4.16) также падает.

Рассмотренный нами график называют кривой *идеального псевдоожигания*.

На практике действительная кривая псевдоожигания отличается от идеальной кривой (крутизной восходящей ветви и всплеском давления при начале псевдоожигания, определяемых, в основном, плотностью упаковки твердых частиц).

В настоящее время в связи с огромной важностью процессов псевдоожигания разрабатываются все новые и новые аппараты, учитывающие специфические особенности взаимодействующих веществ.

Наряду с обычными цилиндрическими аппаратами нашли широкое применение конические аппараты. Значительная скорость псевдоожигающего агента внизу аппарата дает возможность работать без поддерживающей решетки, что особенно важно для высокотемпературных процессов, агрессивных сред, а также при использовании комкующихся и слипающихся материалов.

Аппараты с псевдооживленным слоем, как и все остальные технологические аппараты, могут быть периодического и непрерывного действия. В периодически действующих аппаратах твердые частицы не выводятся до своей полной отработки.

В аппаратах непрерывного действия осуществляется противоток зернистого материала, т.е. происходит постоянный вывод отработанных твердых частиц их замена их свежим зернистым материалом.

В тех случаях, когда нужно получить противоток зернистого материала и псевдооживляющего агента, в аппаратах непрерывного действия применяется последовательное секционирование на каскад последовательно расположенных слоев. В таких секциях происходит переход твердой фазы с верхних слоев на нижние под действием силы тяжести, либо через специальные перетоки, либо через отверстия в провальных тарелках, живое сечение которых составляет 15 – 30%.

4.4. Тепловые процессы

4.4.1. Общая характеристика тепловых процессов

Технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода тепла, называются *тепловыми процессами*, а аппаратура, предназначенная для проведения этих процессов, называется *тепловой*, или *теплоиспользующей*, *аппаратурой*. К тепловым процессам относятся нагревание, охлаждение, испарение и конденсация.

Нагревание — повышение температуры перерабатываемых материалов путем подвода к ним тепла.

Охлаждение — понижение температуры перерабатываемых материалов путем отвода от них тепла.

Конденсация — сжижение паров какого-либо вещества путем отвода от них тепла.

Испарение — перевод в парообразное состояние какой-либо жидкости путем подвода к ней тепла.

Частным случаем испарения является весьма широко распространенный в химической технике процесс *выпаривания* — концентрирования при кипении растворов твердых нелетучих веществ путем удаления жидкого летучего растворителя в виде паров.

В тепловых процессах взаимодействуют не менее чем две среды с различными температурами, при этом тепло передается самопроизвольно (без затраты работы) только от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой.

Среда с более высокой температурой, отдающая при теплообмене тепло, называется *теплоносителем*, среда с более низкой температурой, воспринимающая при теплообмене тепло, называется *холодильным агентом (хладоагентом)*.

В химической технике приходится осуществлять тепловые процессы при самых различных температурах — от близких к абсолютному нулю до нескольких тысяч градусов. Для каждого конкретного процесса, протекающего в определенном интервале температур, подбираются наиболее подходящие теплоносители и хладоагенты. Выбранные теплоносители и хладоагенты должны быть вполне химически стойкими в рабочих условиях процесса, не давать отложений на стенках аппаратов, не вызывать коррозии аппаратуры и легко транспортироваться по трубам.

Перечень наиболее распространенных в химической технике теплоносителей и хладоагентов с указанием условий их применения приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Наиболее распространенные теплоносители (хладоагенты)

<i>Теплоносители (хладоагенты)</i>	<i>Рабочие условия в установках</i>	
	<i>Температура, °С</i>	<i>Давление, атм.</i>
Азот, кислород, воздух	До – 210	До 200
Этан, этилен, фреоны	От – 70 до – 150	До 40
Вода	От 0 до 100	1
	От 100 до 374	1 – 225
Насыщенный водяной пар	От 0 до 250	От 1 до 40
Дымовые (топочные) газы	От 420 до 1000	1
Твердые теплоносители (шамот, и др)	До 1500	1

Основной характеристикой любого теплового процесса является количество передаваемого в процессе тепла; от этой величины зависят размеры тепловой аппаратуры. Основным размером теплового аппарата является *теплопередающая поверхность*, или *поверхность теплообмена*.

Часто в процессе теплообмена нагреваемые или охлаждаемые материалы изменяют агрегатное состояние: испаряются, конденсируются, плавятся или кристаллизуются.

Особенности таких процессов теплообмена заключаются в том, что тепло подводится к материалам или отводится от них *при постоянной температуре* и распространяется не в одной, а в двух фазах.

5.4.2. Нагревание

Нагревание широко применяется в химической технике для ускорения многих массообменных процессов и химических превращений. В зависимости от температурных и других условий проведения процесса применяются разнообразные методы нагревания. Для каждого конкретного процесса приходится выбирать наиболее оправданный в технологическом и экономическом отношении метод нагревания.

Наибольшее распространение в химической технике получили следующие методы нагревания: *водяным паром, топочными газами, промежуточными теплоносителями, электрическим током.*

НАГРЕВАНИЕ ВОДЯНЫМ ПАРОМ

Для нагревания применяется преимущественно насыщенный водяной пар при абсолютных давлениях до 10—12 *ат*. Использование пара большего давления требует сложной и дорогостоящей аппаратуры, что, как правило, экономически не оправдывается. Соответственно абсолютному давлению 10—12 *ат* нагревание насыщенным водяным паром ограничено температурой —180° С. В процессе нагревания насыщенный пар конденсируется, выделяя при этом тепло, равное теплоте испарения жидкости.

Довольно широкому распространению способа нагревания водяным паром способствовали преимущества этого метода обогрева, а именно:

1) большое количество тепла, выделяющегося при конденсации единицы водяного пара (539—476 *ккал* на 1 *кг* конденсирующегося пара при абсолютных давлениях соответственно 1—12 *ат*);

2) равномерность обогрева, так как конденсация пара происходит при постоянной температуре.

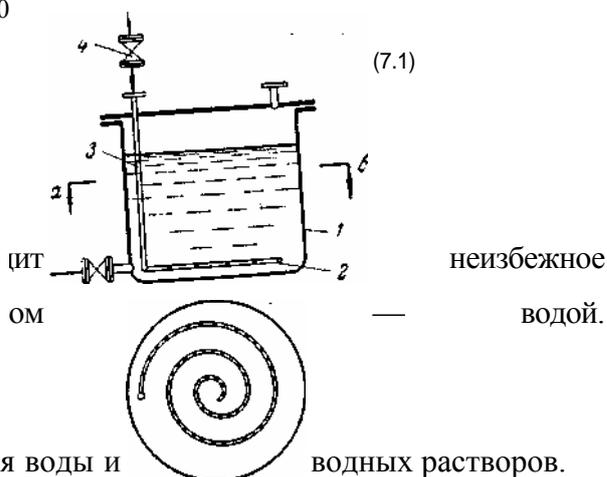
Нагревание «острым» паром. При нагревании «острым» паром водяной пар вводится непосредственно в нагреваемую жидкость; конденсируясь, он отдает тепло нагреваемой жидкости, а конденсат смешивается с жидкостью.

Для одновременного нагревания и перемешивания жидкости пар вводится через барботер — трубу с рядом небольших отверстий. Барботер располагают на дне резервуара в виде спирали (рис. 4.18)

Рис. 4.18. Паровой барбатер:

1 – резервуар; 2 – барбатер;
3 – паропровод; 4 – запорный
вентиль.

При
разбавленн



неизбежное
водой.

Обычно этот способ применяют для нагревания воды и водных растворов.

Нагревание «глухим» паром. Если нагреваемая жидкость взаимодействует с водой, контакт между ними недопустим или нельзя разбавлять нагреваемую жидкость, применяют нагревание «глухим» паром. В этом случае жидкость нагревается паром через разделяющую их стенку в аппаратах с рубашками, со змеевиками и т. д.

Греющий «глухой» пар целиком конденсируется и выводится из парового пространства нагревательного аппарата в виде конденсата. Температура конденсата может быть принята с достаточной точностью равной температуре насыщенного греющего пара.

На рисунке 4.19 схема аппарата с рубашкой для нагревания глухим паром.

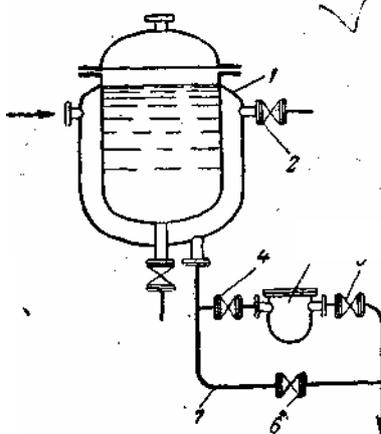


Рис. 4.19. Схема аппарата с рубашкой для нагревания глухим паром:

1 – нагревательный аппарат (рубашка);
2 – отдувочный вентиль;
3 – водоотводчик;
4,5 – запорные вентили;
6 – запорный вентиль;
7 – обводная линия.

НАГРЕВАНИЕ ТОПОЧНЫМИ ГАЗАМИ

Нагревание топочными газами — самый старый способ обогрева в химической промышленности. Этим способом осуществляется нагревание до температур 180—1000° С. Дымовые газы образуются при сжигании твердого, жидкого или газообразного топлива (преимущественно при атмосферном давлении) в топках или печах различной конструкции.

Особенностей нагрева дымовыми газами являются «жесткие» условия нагревания: значительные перепады температур. Благодаря большим температурным перепадам при

нагревании дымовыми газами достигаются высокие тепловые нагрузки. Однако при этом методе нагревания трудно регулировать процесс и избежать перегрева материалов из-за неравномерности обогрева; кроме того, при разбавлении дымовых газов большим количеством воздуха происходит окисление металлов. Следует отметить огнеопасность обогрева дымовыми газами.

Непосредственное нагревание топочными газами осуществляется в трубчатых печах, а также в печах для реакционных котлов или автоклавов.

Простейшая трубчатая печь изображена на рисунке 4.20. Топочные газы образуются в топке 1, куда вводится топлива (твердое, жидкое, газообразное) и необходимый для горения воздух. Для понижения температуры газов в топочном пространстве в топочную камеру 2 через окно 3 вентилятором 4 нагнетается воздух. Топочные газы омывают трубчатый змеевик 5, расположенный в шахте 6, а затем удаляется через боров 7.

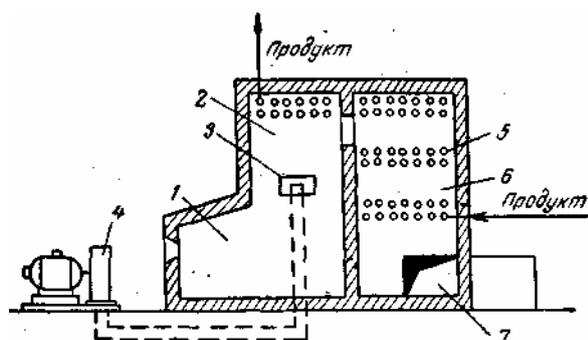


Рис. 4.20. Трубчатая печь:

- 1 – топка; 2 – топочная камера;
- 3 – окно; 4 – вентилятор;
- 5 – змеевик; 6 – шахта;
- 7 – боров.

НАГРЕВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

При нагревании многих материалов для сохранения качества продуктов или обеспечения безопасной работы недопустим даже кратковременный их перегрев. В этих случаях для обогрева применяют *промежуточные теплоносители*, которые сначала нагреваются топочными газами, а затем передают воспринятое тепло обрабатываемым материалам.

В качестве промежуточных теплоносителей применяют минеральные масла, перегретую воду, высокотемпературные органические теплоносители, расплавленные смеси солей и др.

Нагревание топочными газами через жидкостную баню относится к простейшим способам нагревания промежуточными теплоносителями. В этом случае аппарат снабжают рубашкой, заполненной, например, маслом. Топочные газы омывают рубашку и передают тепло маслу, а масло через стенки аппарата — обрабатываемым материалам.

Для повышения эффективности нагревания используют установки с циркулирующим жидким промежуточным теплоносителем. Принципиальная схема такой установки показана на

рис. 4.21 Жидкий теплоноситель нагревается в змеевике 2 печи 1. В результате уменьшения при нагревании удельного веса теплоносителя он перемещается по трубопроводу вверх к обогреваемому аппарату 3. Теплоноситель проходит по змеевику, расположенному вокруг этого аппарата, и отдает тепло нагреваемому материалу.

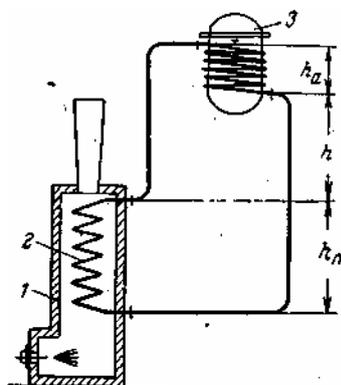


Рис. 4.21. Принципиальная схема нагревательной установки с естественной циркуляцией жидкого промежуточного теплоносителя: 1 — печь; 2 — змеевик; 3 — обогреваемый аппарат

Температура теплоносителя при этом

снижается, а удельный вес увеличивается, в результате чего он стекает по трубопроводу вниз. Таким образом осуществляется замкнутая циркуляция теплоносителя.

НАГРЕВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

В химической технике довольно широко применяется нагревание электрическим током в различных электрических печах. При нагревании электрическим током можно легко и очень точно регулировать процесс при равномерном обогреве.

По способу превращения электрической энергии в тепловую различают *электрические печи сопротивления индукционные и дуговые*. Электрические печи *сопротивления* делятся на *печи прямого действия* и *печи косвенного действия*.

В электрических печах прямого действия нагреваемое тело включается непосредственно в электрическую цепь и нагревается при прохождении через него электрического тока. Часто печь прямого действия представляет собой аппарат, корпус которого является одним из электродов; другой электрод размещают в аппарате. Между электродами помещают жидкие или расплавленные нагреваемые материалы.

Электрические печи сопротивления косвенного действия получили большое распространение. В них тепло выделяется при прохождении электрического тока по специальным нагревательным элементам; выделяющееся тепло передается материалу лучеиспусканием, теплопроводностью и конвекцией. В таких печах осуществляется нагревание до температур 1000—1100° С. Схема такой печи показана на рис. 4.22.

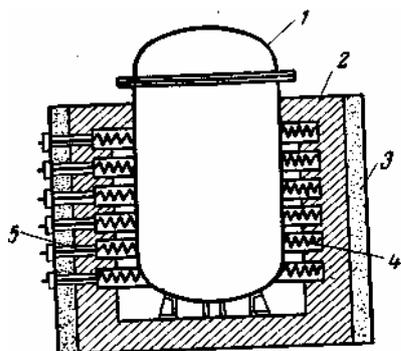


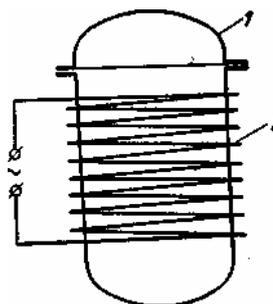
Рис. 4.22. Электрическая печь сопротивления косвенного действия:
 1 — обогреваемый аппарат;
 2 — футеровкапечи; 3 — тепловая изоляция; 4 — спиральные нагревательные элементы;
 5 — выводные электрошины.

Футеровка печи 2 выполнена из огнеупорного кирпича. В пазах футеровки уложены спиральные нагревательные элементы 4, к которым подводится ток через электрошины 5. Тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через спиральные нагревательные элементы, передается обогреваемому аппарату 1 лучеиспусканием и конвекцией. Тепловая изоляция В уменьшает потери тепла в окружающую среду.

Электрические индукционные печи (рис. 4. 23). Нагревание в этих печах осуществляется индукционными токами. Обогреваемый аппарат 1 является сердечником соленоида 2, охватывающего аппарат; по соленоиду пропускается переменный ток, при этом вокруг соленоида возникает переменное магнитное поле, которое индуцирует в стенках обогреваемого аппарата электродвижущую силу. Под действием возникающего вторичного тока нагреваются стенки аппарата.

Рис. 4.23.

Принципиальная схема электрической индукционной печи:
 1 — обогреваемый аппарат; 2 — соленоид.



Соленоид выполняется из медной или алюминиевой проволоки, имеющей малое омическое сопротивление.

Дуговые печи. В дуговых печах применяется нагревание электрической дугой до температур 1500 – 1300 °С. Электрическая дуга возникает в газообразной среде. В дуговых печах при возникающих больших температурных перепадах невозможны равномерный обогрев и точное регулирование температуры. Дуговые печи применяются

для плавки металлов, получения карбида кальция и фосфора, для переработки бытовых отходов.

5.4.3. Охлаждение до обычных температур

В химической технике очень часто возникает необходимость охлаждать газы, пары и жидкости. Для их охлаждения обычно используют наиболее распространенные и доступные теплоносители — воду и воздух. Охлаждение происходит в результате теплообмена между охлаждаемой и охлаждающей средами, при этом температура охлаждающей среды должна быть ниже температуры охлаждаемой.

В зависимости от времени года и климатических условий охлаждение воздухом осуществляется до 25—30° С. Водой удается охладить теплоносители до более низких температур. Обычно температуру охлаждающей воды, которая также зависит от времени года и климатических условий, принимают равной 15—25° С. Вода, отбираемая из артезианских скважин, имеет температуру 8—12° С.

Охлаждение водой и воздухом осуществляется в различных теплообменниках, при этом охлаждающая и охлаждаемая среды либо разделены стенкой (если контакт между этими средами по каким-либо причинам недопустим), либо непосредственно контактируют между собой.

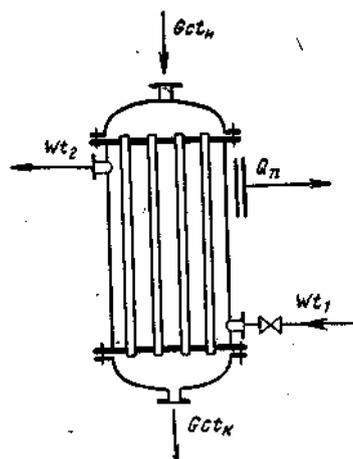
Кожухотрубчатый теплообменник, широко распространенный в химической технологии, в котором охлаждение водой производится через стенку, показан на рис. 4.24. Охлаждающая вода вводится в нижнюю часть межтрубного пространства теплообменника и выводится из верхней. Охлаждаемый теплоноситель вводится в верхнюю часть трубного пространства и выводится из нижней.

Охлаждение льдом проводят в тех случаях, когда необходимо достигнуть близкой к нулю температуры охлаждаемой жидкости.

Очень часто при охлаждении лед вносится непосредственно в охлаждаемую жидкость. При этом лед нагревается жидкостью до 0° С, а затем плавится, отнимая теплоту плавления от охлаждаемой жидкости. Такой метод охлаждения применяется для жидкостей, которые не взаимодействуют с водой и для которых допускается разбавление.

Время охлаждения льдом зависит от условий проведения процесса; оно уменьшается с уменьшением размеров кусков льда (вносимого в охлаждаемую жидкость) и с увеличением интенсивности перемешивания жидкости. Точный расчет времени охлаждения льдом затруднителен, поэтому время охлаждения принимают на основании опытных данных.

Рис. 4.24. Теплообменник для охлаждения теплоносителя водой.



5.4.4. Конденсация

Широкое распространение в химической технике имеют процессы конденсации (ожижения) паров различных веществ путем отвода от них тепла. Конденсация осуществляется в аппаратах, называемых *конденсаторами*.

Различают два вида конденсации:

1) *поверхностную* (или просто *конденсацию*), при которой конденсирующиеся пары и охлаждающий агент разделены стенкой, и конденсация паров происходит на внутренней или внешней поверхности холодной стенки;

2) *конденсацию смешением*, при которой конденсирующиеся пары непосредственно соприкасаются с охлаждающим агентом.

Поверхностная конденсация осуществляется в различных теплообменниках — *поверхностных конденсаторах*. В общем случае в поверхностный конденсатор поступает перегретый пар. Очень часто охлаждающим агентом является вода. В частности, кожухотрубчатый теплообменник, изображенный на рисунке 4.24, может быть использован и как конденсатор, когда в межтрубное пространство поступает перегретый пар.

Конденсация смешением. Если конденсации подвергаются пары нерастворимых в воде жидкостей или пар, являющийся неиспользуемым отходом того или иного процесса, охлаждение и конденсацию этих паров можно проводить путем непосредственного смешения с водой в аппаратах, называемых конденсаторами смешения. Эффективность работы таких аппаратов находится в прямой зависимости от поверхности соприкосновения охлаждающей воды и пара. Поэтому поверхность соприкосновения увеличивают, распыляя охлаждающую воду при помощи различных устройств.

5. ВЫПАРИВАНИЕ

5.4.5. Выпаривание

Выпаривание — процесс концентрирования растворов твердых нелетучих веществ путем удаления жидкого летучего растворителя в виде паров. Сущность выпаривания заключается в переводе растворителя в парообразное состояние и отводе полученного пара от оставшегося сконцентрированного раствора. Выпаривание обычно проводится при кипении, т. е. в условиях, когда давление пара над раствором равно давлению в рабочем объеме аппарата. Пар, образующийся над кипящим раствором, называется в технике выпаривания *вторичным паром*.

Процесс выпаривания относится к числу широко распространенных. Последнее объясняется тем, что многие вещества, например едкий натр, едкое кали, аммиачная селитра, сульфат аммония и др., получают в виде разбавленных водных растворов, а на дальнейшую переработку и транспорт они должны поступать в виде концентрированных продуктов.

Научный анализ процессов выпаривания был дан впервые в 1915 г. проф. И. А. Тищенко в монографии «Современные выпарные аппараты и их расчет»; ему же принадлежат работы, посвященные изучению свойств кипящих водных растворов.

Технические процессы выпаривания растворов. В химической технике используются следующие основные способы выпаривания: *простое выпаривание*, проводимое как непрерывным, так и периодическим методами, *многократное выпаривание*, осуществляемое только непрерывно, и *выпаривание с применением теплового насоса*. Два последних способа проведения процесса обеспечивают значительную экономию тепла и поэтому имеют преобладающее значение.

Все перечисленные процессы проводят как под давлением, так и под вакуумом, в зависимости от параметров греющего пара и свойств выпариваемых растворов.

Простое выпаривание. Простое выпаривание осуществляется на установках небольшой производительности, когда экономия тепла не имеет особого значения и может проводиться как периодически, так и непрерывно.

В периодическом процессе с единовременной загрузкой исходный раствор помещается в выпарной аппарат, где нагревается до температуры кипения и выпаривается. Образовавшийся вторичный пар поступает в конденсатор. Конденсат выводится из системы, упаренный раствор перекачивается в сборник готового продукта.

Многократное выпаривание. Многократное выпаривание — процесс, при котором в качестве греющего используют вторичный пар и, следовательно, достигается

значительная экономия тепла. Проведение подобного процесса возможно либо при использовании греющего пара высокого давления, либо при применении вакуума.

Сущность многократного выпаривания состоит в том, что процесс выпаривания проводится в нескольких соединенных последовательно аппаратах, давление в которых поддерживают так, чтобы вторичный пар предыдущего аппарата мог быть использован как греющий пар в последующем аппарате. Например (рис. 4.25), вторичный пар давлением P_{BT1} , образовавшийся в аппарате 1, используется как греющий пар давлением P_{GP2} в аппарате 2 ($P_{BT1} \approx P_{GP2}$).

Очевидно, что многократное выпаривание позволяет сокращать расход тепла на проведение процесса приблизительно пропорционально числу последовательно соединенных аппаратов или, как принято называть в технике выпаривания, числу корпусов. Установки для многократного выпаривания всегда имеют несколько корпусов поэтому называются *многокорпусными*.

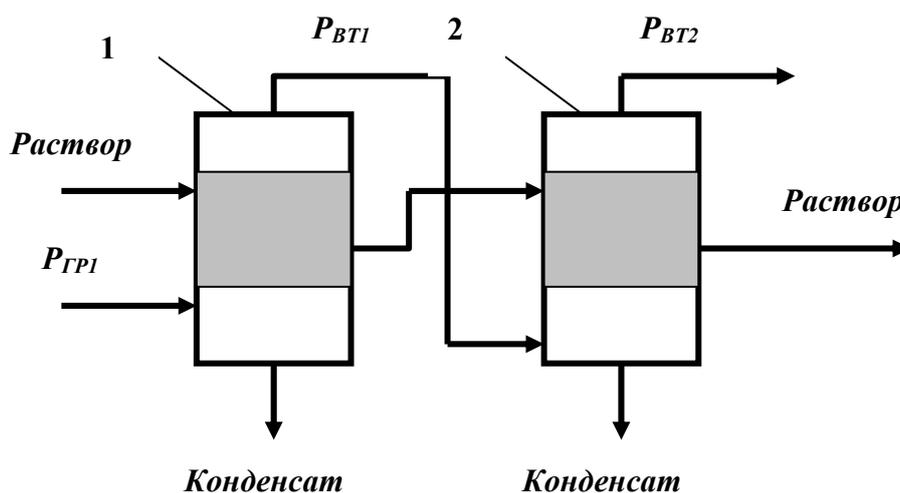


Рис. 4.25. Схема многократного выпаривания (прямоточная).

Сопоставим прямоточную и противоточную схемы. Очевидным преимуществом прямоточной схемы является возможность перемещения раствора из корпуса в корпус без применения насосов, работающих на горячих потоках. К недостаткам прямоточной схемы можно отнести неблагоприятные для теплопередачи условия.

В [3] показано, что преимуществом противоточной схемы является меньшая поверхность нагрева, а недостатком — необходимость включения в схему насосов, работающих на горячих потоках.

Недостатки прямоточных схем менее существенны, чем противоточных, поэтому первые получили значительно большее распространение в промышленности.

4.6. Массообменные процессы

Технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью переноса вещества (массы) из одной фазы в другую называются *массообменными* процессами, а аппаратура, предназначенная для проведения этих процессов, — массообменной аппаратурой.

Массообменные процессы занимают особое место среди химико-технологических процессов.

В подавляющем большинстве случаев производственные установки химической промышленности создают по схеме, приведенной на рис. 4.26. Исходное сырье поступает в реактор, где лишь частично превращается в продукты реакции. Выходящая из реактора смесь продуктов реакции и непрореагировавшего сырья направляется в массообменную разделительную аппаратуру, в которой производится разделение смеси на продукты реакции и непрореагировавшее сырье. Последнее возвращается в реактор, а продукты реакции поступают на дальнейшую переработку.

Из изложенного следует, что между реакционными и разделительными аппаратами существует тесная технологическая связь. Общий закон этой связи таков: чем меньше нагрузка на реакционный аппарат, т. е. чем меньше превращение исходного сырья в продукты реакции, тем больше нагрузка на разделительный агрегат, и наоборот.

Очевидно, что оптимальное сочетание нагрузок на реакционный и разделительный аппараты и приводит к минимальным производственным затратам — к оптимизированному процессу. Следовательно, основа химического производства — реакционный аппарат — работает оптимально только в сочетании с оптимально работающим разделительным агрегатом и работа последнего имеет в химической промышленности не меньшее значение, чем работа самого реакционного аппарата.

В разделительном агрегате могут производиться разнообразные процессы. Основными и важнейшими из них являются абсорбция, экстракция, ректификация, адсорбция и сушка.

Абсорбция – избирательное поглощение газов или паров жидкими поглотителями - *абсорбентами*. Процесс используется во многих производствах, где из смеси газов необходимо извлечь какой-либо компонент или группу компонентов. В этом процессе имеет место *переход вещества или группы веществ из газовой или паровой фаз в жидкую*.

*Экстракция*¹¹ — извлечение растворенного в одной жидкости вещества или группы веществ другой жидкостью. Процесс используется в случаях, когда из раствора

¹¹ Имеется в виду жидкостная экстракция.

необходимо извлечь растворенное вещество или группу веществ. В этом процессе имеет место *переход вещества из одной жидкой фазы в другую жидкую фазу*.

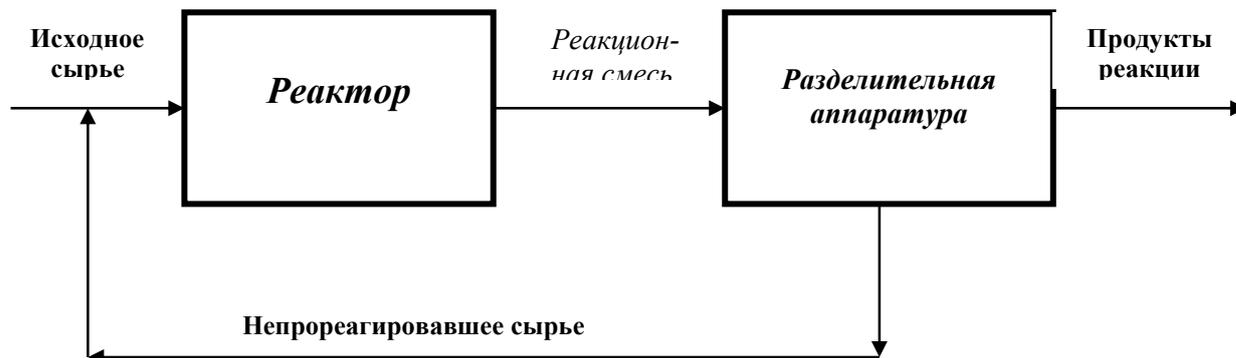


Рис. 4.26. Связь реактора с разделительной аппаратурой

Ректификация — разделение жидкой смеси на чистые или обогащенные составляющие в результате противоточного взаимодействия потоков пара и жидкости. Процесс имеет большое значение в тех производствах, где необходимо частичное или полное разделение жидких однородных смесей на чистые компоненты или их группы. Очевидно, в этом процессе имеет место *переход вещества из жидкой фазы в паровую, и наоборот*.

Адсорбция — избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкостях веществ твердым поглотителем — *адсорбентом*, способным поглощать одно или несколько веществ из их смеси. Процесс используется во многих производствах, где из смеси газов, паров или растворенных веществ необходимо извлечение того или другого вещества. В этом процессе *вещества переходят из газовой и жидкой фаз в твердую*.

Сушка — удаление влаги из твердых влажных материалов путем испарения. Процесс имеет большое значение во многих производствах, где влажные природные вещества до их переработки должны предварительно обезвожены или должен быть обезвожен готовый продукт, получающийся в последней стадии производства. Нетрудно видеть, что в этом процессе имеет место *переход влаги твердого влажного материала в паровую или газовую фазу*.

Из приведенной краткой характеристики следует, что для всех перечисленных процессов общим является переход вещества из одной фазы в другую, или *массопередача*. Переход вещества из одной фазы в другую связан с явлениями конвективного переноса и молекулярной диффузии, поэтому перечисленные выше процессы получили название *массообменных* или *диффузионных* процессов. *Массопередачей* называют *переход*

вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия.

В массообмене участвуют как минимум три вещества: *распределяющее вещество* (или вещества), составляющее первую фазу; *распределяющее вещество* (или вещества), составляющее вторую фазу; *распределяемое вещество* (или вещества), которое переходит из одной фазы в другую (рис. 4.27).

Назовем первую фазу G , вторую L , а распределяемое вещество M . Поскольку все рассматриваемые массообменные процессы обратимы, распределяемое вещество может переходить из фазы G в фазу L и наоборот, в зависимости от концентрации этого вещества в распределяющих фазах.

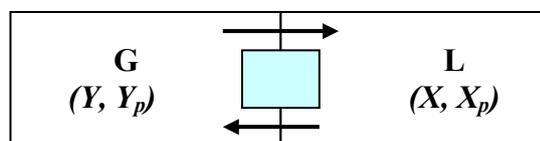


Рис. 4.27. Схема массообмена

G – распределяющее вещество 1-ой фазы; L – распределяющее вещество 2-ой фазы;

M – распределяемое вещество; $X (Y)$ – концентрация распределяемого вещества в фазе $L (G)$; $X_p (Y_p)$ – равновесная концентрация распределяемого вещества в фазе $L (G)$

Допустим, что распределяемое вещество находится вначале только в фазе G и имеет концентрацию Y . В фазе L в начальный момент распределяемого вещества нет и, следовательно, концентрация его в этой фазе $X = 0$.

Если распределяющие фазы привести в соприкосновение, начнется переход распределяемого вещества из фазы G в фазу L и в последней обнаружится определенная концентрация распределяемого вещества $X > 0$. С момента появления вещества M в фазе L начинается и обратный переход его в фазу G , но до некоторого момента число частиц M , переходящих в единицу времени через единицу поверхности соприкосновения из фазы G в фазу L , больше, чем число частиц, переходящих из фазы L в фазу G ; конечным итогом процесса является переход M из фазы G в фазу L .

Через определенный промежуток времени скорости перехода распределяемого вещества из фазы G в фазу L и обратно становятся одинаковыми. Такое состояние называется *равновесным*. В состоянии равновесия в каждом конкретном случае существует строго определенная зависимость между концентрациями распределяемого вещества, которые при равновесии системы называются *равновесными*, а достигнутые концентрации – *равновесными*.

Очевидно, что любой концентрации X соответствует равновесная концентрация Y_p , и наоборот, любой концентрации Y соответствует равновесная концентрация X_p , т.е.

$$X_p = f_1(Y)$$

или

$$Y_p = f_2(X)$$

Приведенные выше функциональные зависимости определяются в каждом случае особо, чему посвящен целый ряд специальной литературы по процессам и аппаратам.

Знание равновесных концентраций позволяет выяснить направление течения процесса, которое определяется стремлением к равновесию. Если $Y > Y_p$, и, следовательно, $X < X_p$, распределяемое вещество M будет переходить из фазы G в фазу L . При условии $Y < Y_p$ ($X > X_p$) распределяемое вещество будет переходить из фазы L в фазу G .

Так как концентрация пропорциональна числу частиц, то, следовательно, *скорость перехода распределяемого вещества из одной фазы в другую пропорциональна разности между фактической концентрацией распределяемого вещества в данной фазе и равновесной концентрацией*. Таким образом, движущей силой массообменных процессов являются разности концентраций $(Y - Y_p)$ и $(X - X_p)$.

4.6.1. Абсорбция

Абсорбция — поглощение газов или паров из газовых или паровых смесей жидкими поглотителями, называемыми *абсорбентами*. Этот процесс является избирательным и обратимым, что дает возможность применять его не только с целью получения растворов газов в жидкостях, но также и для разделения газовых или паровых смесей.

В последнем случае после избирательной абсорбции одного или нескольких компонентов из газовой или паровой смеси проводят *десорбцию* — выделение этих компонентов из жидкости — и таким образом осуществляют разделение. Регенерированный абсорбент вновь возвращается на абсорбцию (круговой процесс).

К факторам, улучшающим условия абсорбции, относятся повышенное давление и пониженная температура, а к факторам способствующим десорбции, пониженное давление и повышенная температура и прибавление к абсорбенту добавок, уменьшающих растворимость газов в жидкостях.

Различают *физическую абсорбцию* и *хемосорбцию*. При физической абсорбции растворение газа не сопровождается химической реакцией. При хемосорбции абсорбируемый компонент вступает в химическую реакцию в жидкой фазе.

Примерами использования процессов абсорбции в технике могут служить разделение углеводородных газов на нефтеперерабатывающих установках, получение соляной кислоты, получение аммиачной воды, очистка отходящих газов с целью улавливания ценных продуктов или обезвреживание газосбросов и другие.

Аппаратурно-технологическое оформление процессов сравнительно просто, поэтому процессы абсорбции широко используются в технике.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АБСОРБЦИИ

В химической технике используют следующие принципиальные схемы абсорбционных процессов: прямоточные, противоточные, одноступенчатые с рециркуляцией и многоступенчатые с рециркуляцией.

Прямоточная схема взаимодействия веществ в процессе абсорбции показана рис. 4.28, а. В этом случае потоки газа и абсорбента движутся параллельно друг другу; при этом газ с большей концентрацией распределяемого вещества приводится в контакт с жидкостью, имеющей меньшую концентрацию распределяемого вещества, а газ с меньшей концентрацией взаимодействует на выходе из аппарата с жидкостью, имеющей большую концентрацию распределяемого вещества.

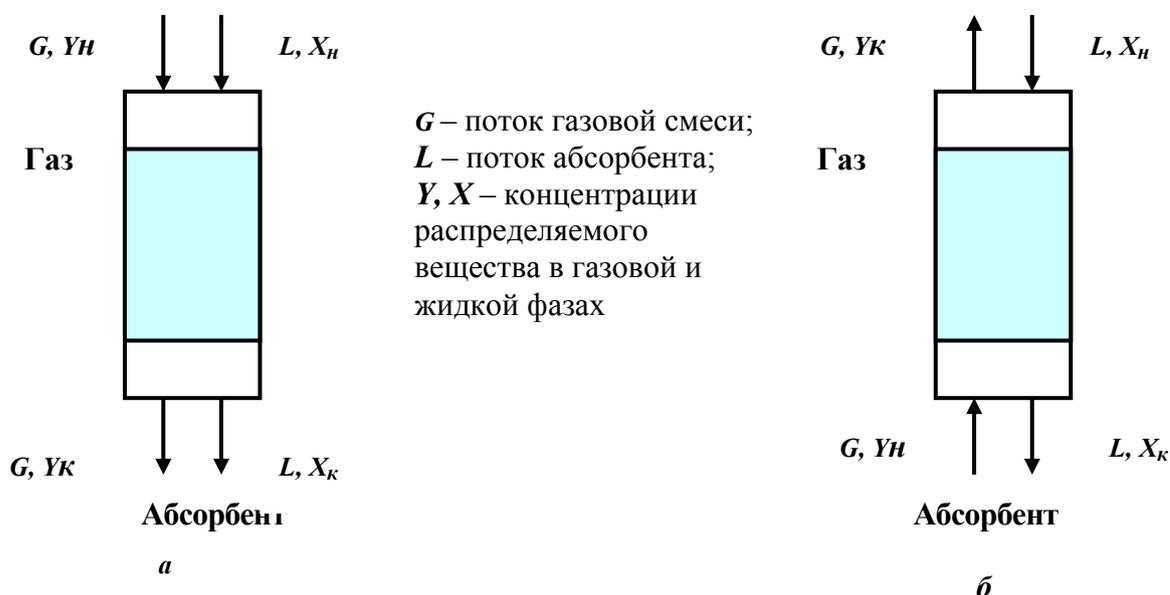


Рис. 4.28. Прямоточная и противоточная схемы абсорбции

Противоточная схема показана на рис. 4.28, б. По этой схеме в одном конце аппарата приводятся в контакт газ и жидкость, имеющие большие концентрации распределенного вещества, а в противоположном конце – меньшие.

Схемы с рециркуляцией предусматривают многократный возврат либо жидкости, либо газа.

Многоступенчатые схемы с рециркуляцией могут включать прямой ток, противоток, рециркуляцию жидкости и рециркуляцию газа. Большое практическое значение имеет многоступенчатая противоточная схема с рециркуляцией жидкости в каждой ступени.

Сопоставим рассмотренные схемы абсорбции, имея в виду следующие показатели процесса: удельный расход абсорбента и движущую силу процесса.

Принимая без доказательств, которые приведены в различной специальной литературе [1, 3], отметим, что противоточный процесс обеспечивает большую конечную концентрацию поглощаемого газа в абсорбенте, а вместе с этим и меньший расход абсорбента; движущая сила при противотоке меньше, поэтому при прочих равных условиях необходимы большие размеры аппарата. Указанное соотношение носит общий характер и его можно формулировать так: *изменение рабочих концентраций, приводящее к уменьшению расхода абсорбента, требует увеличения габаритов аппарата, и наоборот.*

4.6.2. Ректификация

Ректификация — разделение жидких однородных смесей на составляющие вещества или группы составляющих веществ в результате противоточного взаимодействия паровой смеси и жидкой смеси.

Этот процесс имеет большое значение в химической технике. В качестве примеров достаточно указать на разделение природных углеводородов нефти и синтетических углеводородов с целью получения моторных топлив, на выделение индивидуальных газов из их смесей путем предварительного ожижения и последующей ректификации жидкой смеси (разделение воздуха методом глубокого охлаждения).

Возможность разделения жидкой смеси на составляющие ее компоненты ректификацией обусловлена тем, что состав пара, образующегося над жидкой смесью, отличается от состава жидкой смеси в условиях равновесного состояния пара и жидкости. Известные равновесные данные для конкретной смеси позволяют проанализировать возможность разделения этой смеси, найти предельные концентрации разделения и рассчитать движущую силу процесса.

ПРИНЦИП РЕКТИФИКАЦИИ

Сущность процесса ректификации рассмотрим на простейшем примере разделения двухкомпонентной смеси. При ректификации (рис. 4.29) исходная смесь делится на две части: часть, обогащенную легколетучим компонентом, — дистиллят, и часть, обедненную легколетучим компонентом — остаток.

Обозначим: G_f — количество смеси, поступающей на ректификацию; G_p — количество поступающего дистиллята; G_w — количество получающегося остатка; X_f , X_p , X_w — содержание легколетучего компонента соответственно в исходной смеси, в дистилляте и в остатке.

При принятых обозначениях схема ректификации будет иметь, представленный на рис. 4.29.

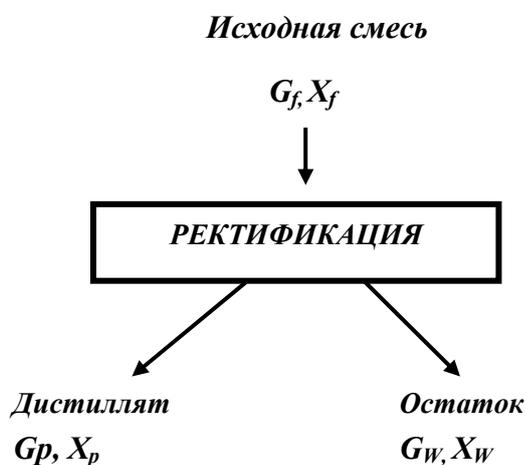


Рис. 4.29. Разделение смеси ректификацией.

Обычно ректификационный аппарат состоит из двух частей, или ступеней — верхней и нижней, каждая из которых представляет собой любым способом организованную поверхность контакта фаз между паром и жидкостью.

Сущность процесса ректификации можно характеризовать как *разделение жидкой смеси на дистиллят и остаток* в результате двухступенчатого взаимодействия жидкости с парами.

В нижней ступени исходная, подвергаемая разделению смесь взаимодействует с паром, начальный состав которого равен составу остатка; вследствие этого из смеси извлекается легколетучий компонент.

В верхней ступени пар начального состава, соответствующего составу исходной смеси, взаимодействует с жидкостью, начальный состав которой равен составу дистиллята; вследствие этого пар обогащается легколетучим компонентом до требуемого предела, менее летучий компонент извлекается из паровой фазы.

Пар для питания ректификационного аппарата получается многократным испарением жидкости, имеющей тот же состав, что и остаток, а жидкость – многократной конденсацией пара, имеющего состав, одинаковый с составом дистиллята.

РЕКТИФИКАЦИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ.

Задача разделения многокомпонентных смесей в практике встречается гораздо чаще, чем двухкомпонентных, поэтому ректификация многокомпонентных смесей является основным процессом ректификации в производствах (рис. 4.30).

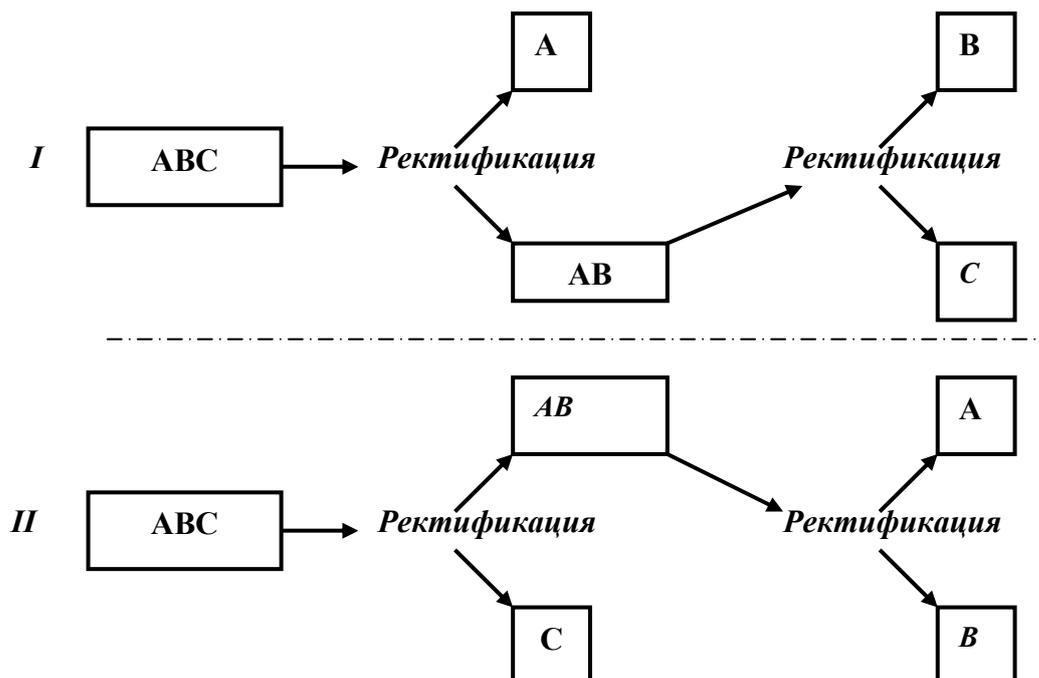


Рис. 4.30. Принципиальная схема ректификации многокомпонентной смеси.

Возможные схемы разделения многокомпонентных смесей. Схема разделения на составляющие двухкомпонентных смесей однозначна, в то время как для многокомпонентных смесей представляется некоторая свобода выбора схемы разделения. Пусть смесь состоит из трех компонентов A , B и C , причем относительные летучести их α_A , α_B и α_C .

На первый взгляд разделение указанной смеси на компоненты возможно двумя путями, показанными на рис. 4.30. Следует подчеркнуть, что первая схема разделения и аналогичные ей возможны всегда. Вторая схема и аналогичные ей возможны не всегда, и использование их ограничивается соотношением относительных летучестей компонентов и их содержанием в исходной смеси.

Так, в рассмотренном примере возможность отделения смеси компонентов A и B от C имеется лишь при условии $a_B > \sum ax$ (где $\sum ax$ — суммарная относительная летучесть остальных двух компонентов). Иными словами, отделение в паровой фазе f -го компонента возможно только в том случае, когда его относительная летучесть a_f больше средней относительной летучести всех компонентов:

$$\sum ax = a_A x_A + a_B x_B + a_C x_C + \dots$$

Из рассмотренного примера одновременно следует, что для *разделения многокомпонентных смесей непрерывным методом на n частей необходимо $n - 1$ ректификационных аппаратов.*

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ПРОЦЕССОВ РЕКТИФИКАЦИИ

В технике широко используются ректификационные установки, построенные на различных принципах; их целесообразно классифицировать путем разделения на периодически и непрерывно действующие.

Схема периодически действующей ректификационной установки приведена на

Рис. 4.31.
Принципиальная схема
ректификационной
установки
периодического
действия:

1 — куб; 2 — ректификационная колонна; 3 — дефлегматор; 4 — разделительный стакан; 5 — холодильник; 6, 7 — сборники.

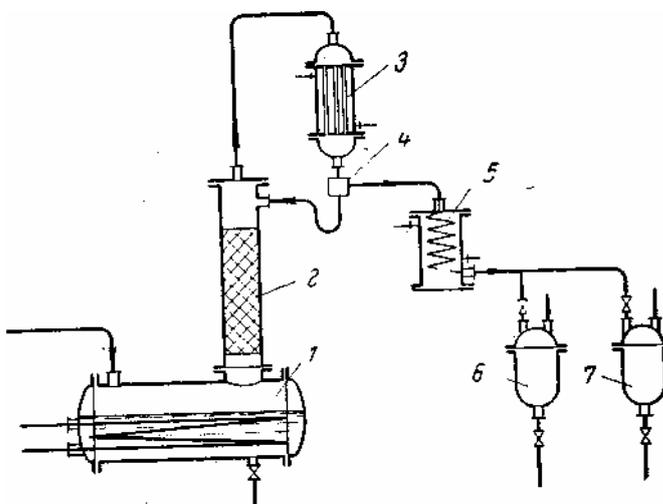
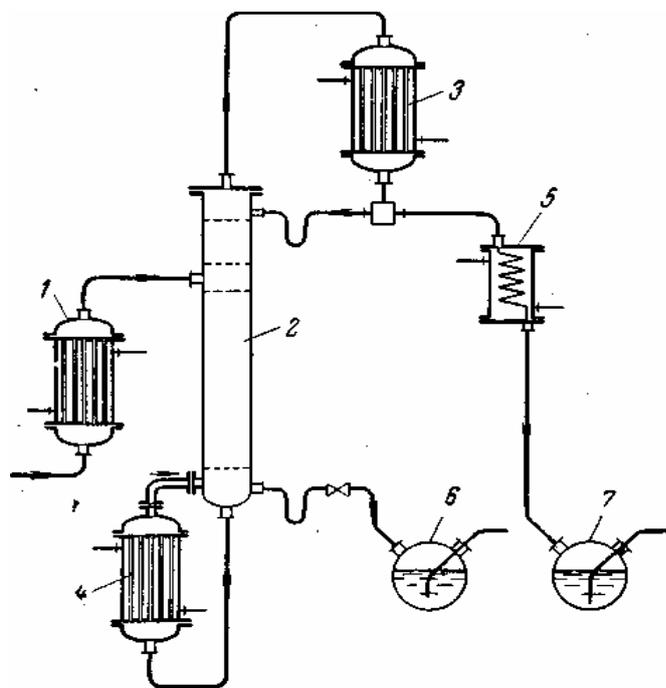


рис. 4.31. Исходная смесь загружается в куб 1 , где нагревается до температуры кипения и испаряется. Пары проходят через ректификационную колонну 2 , взаимодействуя в противотоке с жидкостью, возвращаемой из дефлегматора 3 . В дефлегматоре 3 , богатые легко летучим компонентом пары конденсируются и конденсат поступает в делитель потока 4 . Часть жидкости из делителя потока направляется на орошение ректификационной колонны, а другая часть — дистиллят — проходит через холодильник 5 и направляется в сборник 6 или 7 .

Установка непрерывного действия для разделения исходной смеси на две составляющие части приведена на рис. 4.32. Исходная смесь поступает в подогреватель 1, где ее температура повышается за счет тепла греющего водяного пара до температуры

Рис.4.32. Принципиальная схема
ректификационной установки
непрерывного действия:



1 — подогреватель; 2 — ректификационная колонна; 3 — дефлегматор; 4 — кипятильник; 5 — холодильник; 6 — сборник кубового остатка; 7 — сборник дистиллята.

кипения. Нагретая смесь поступает в питающую секцию ректификационной колонны 2, присоединяясь к орошению, которое обеспечивается конденсацией паров в дефлегматоре 3.

Необходимое для проведения ректификации многокомпонентное испарение жидкости осуществляется в кипятильнике 4. В дефлегматоре 3 происходит полная конденсация паров. Из делителя потока часть дистиллята, отвечающая флегме, возвращается в колонну, а оставшая часть проходит через холодильник 5 и направляется в сборник 7. Менее летучая часть исходной смеси непрерывно отбирается из нижней части ректификационного аппарата и поступает в сборник 6.

В рассмотренной схеме не учитывается возможность рационального использования тепла. Практически тепло отходящих потоков можно использовать для нагревания входящих и, в частности, нагревать исходную смесь за счет тепла жидкости, удаляющейся из нижней части колонны.

Ректификация многокомпонентных смесей непрерывным методом осуществляется в аппаратных агрегатах, построенных по типу многоколонных схем (рис. 4.33). Если

исходная смесь должна быть разделена на три части A , B и C , то одна колонна может обеспечить разделение либо на $A + BC$, либо на $AB + C$; для последующего разделения AB или BC необходима вторая колонна. Следовательно, для разделения исходной смеси на n частей необходим ректификационный агрегат, состоящий из $n - 1$ ректификационных аппаратов.

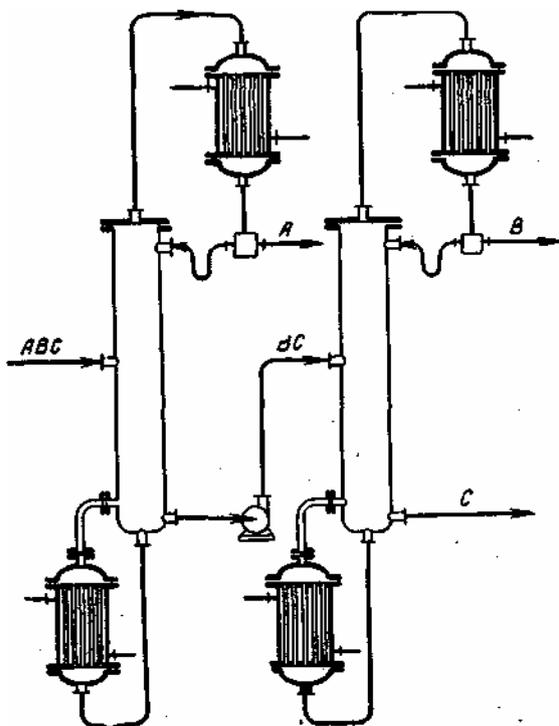


Рис. 4.33.
Принципиальная схема
разделения
многокомпонентной
смеси.

АБСОРБЦИОННАЯ И РЕКТИФИКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

Аппараты, предназначенные для проведения процессов абсорбции и ректификации, называются соответственно абсорберами или ректификационными колоннами.

Указанные аппараты можно подразделить на три основные группы:

- а) аппараты, в которых поверхностью фазового контакта является поверхность жидкости, растекающейся по специальной насадке;
- б) аппараты, в которых поверхность фазового контакта создается потоками газа (пара) и жидкости;
- в) аппараты, в которых поверхность фазового контакта создается вследствие разбрызгивания жидкости.

Аппараты, в которых поверхностью фазового контакта является поверхность жидкости, растекающейся по насадке. К аппаратам указанного типа относятся пленочные аппараты и аппараты со смоченной насадкой.

Пленочные аппараты выполняются преимущественно в виде трубчатых теплообменников и аппаратов с листовой насадкой. Взаимодействующая с газом (паром) жидкость поступает в верхнюю часть аппарата на трубную решетку, равномерно распределяется по трубам и в виде тонкой пленки и стекает по их внутренней поверхности.

Газ (пар) поступает в нижнюю часть аппарата и движется навстречу жидкости.

Аппараты со смоченной насадкой или просто насадочные колонны выполняются в виде цилиндрической колонны, заполненной насадочными телами.

Насадка, или насадочные тела, могут иметь самую разнообразную форму. Практическое значение имеют хордовая насадка, кольца, фасонные насадочные тела, спиральная и сетчатая металлическая насадка, а также дробленый кусковой материал.

Хордовая насадка (рис. 4.34), как правило, делается из деревянных брусьев, располагающихся правильными рядами друг над другом. Кольцевая насадка (рис. 4.35) состоит из керамических или стальных цилиндров, загружаемых в аппарат либо правильными рядами, либо навалом. Фасонная насадка (рис. 4.36) выполняется из керамики в виде седел, цилиндров с перегородками, пропеллеров и т. д., загружаемых в аппарат навалом.

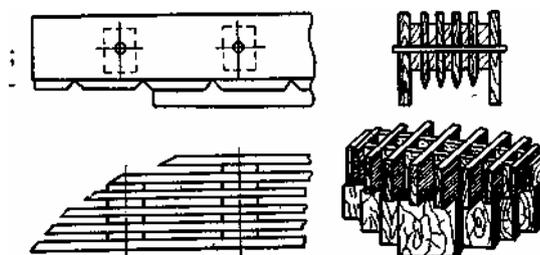
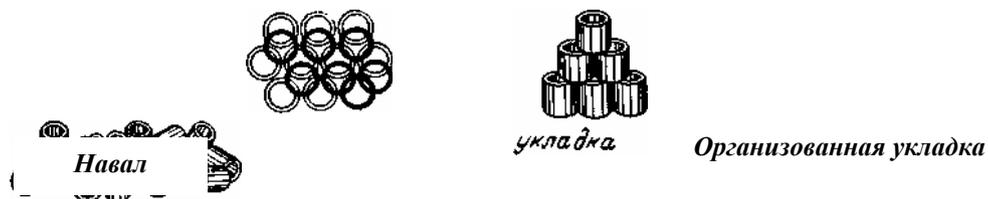


Рис. 4.34.

Хордовая насадка

Рис.
нас

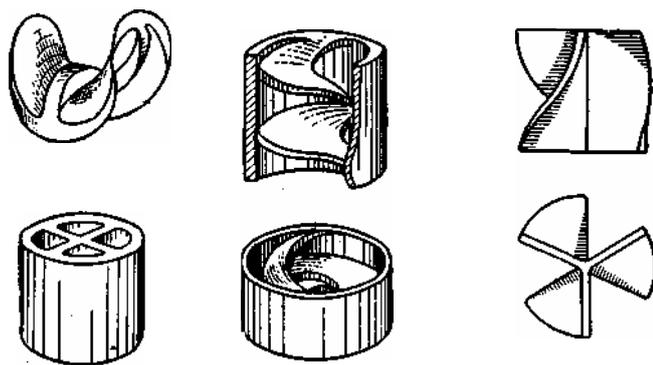


Рис. 4.36. Различные типы фасонной насадки

Спиральная и сетчатая насадки выполняются обычно из стальной оцинкованной ленты и загружаются в аппарат правильными рядами.

В качестве кусковой насадки обычно используют дробленый кокс или кварц в виде кусков размерами 25—75 мм

Наиболее эффективна насадка, имеющая меньший эквивалент-диаметр $d_{эк}$, а следовательно, меньший коэффициент свободного объема и большую удельную поверхность.

$$d_{эк} = 4f/S,$$

где f – свободное сечение каналов между насадочными телами; S – суммарный периметр каналов.

В промышленных аппаратах чаще всего используется кольцевая насадка и дробленый кусковой материал.

Аппараты, в которых поверхность фазового контакта развивается потоками газа и жидкости. В рассматриваемую группу аппаратов входят насадочные колонны, работающие в режиме подвисяния, и колонны с ситчатыми, решетчатыми, колпачковыми и другими тарелками.

Насадочные колонны, работающие в режиме подвисяния. Практика показывает, что насадочные колонны работают наиболее эффективно в условиях режима подвисяния, близкого к режиму захлебывания, т. е. такого, при котором вес задержанной на насадке жидкости становится равным силе трения газового потока о жидкость. При этом орошающая жидкость задерживается в свободном объеме колонны в максимальном количестве, образуя в проходах насадки газо-жидкостную смесь — плотную пену. Этот режим отличается тем, что небольшое увеличение скорости газа (пара) приводит к захлебыванию колонны вследствие преобладания сил трения над силами тяжести.

Оптимальный режим работы колонны достигается при скоростях газового (парового) потока, на 15—20% меньших скоростей, вызывающих захлебывание. Очевидно, что в этих условиях массообмен становится весьма эффективным. Поверхность фазового контакта превышает поверхность насадки, а коэффициенты массоотдачи достигают предельных величин для аппаратов подобного типа.

Тарельчатые колонны. Колонны с тарелками, или тарельчатые колонны, являются эффективными и наиболее распространенными аппаратами. Они выполняются в виде вертикальных цилиндров, внутри которых одна под другой размещено определенное количество горизонтальных перегородок — тарелок, обеспечивающих возможность течения жидкости сверху вниз, а газа или пара снизу.

Различают тарельчатые колонны с переливными устройствами колонны с неорганизованным переливом жидкости, или с провальными тарелками.

Колонны с провальными тарелками (рис. 4.37) по характеру гидродинамики потоков аналогичны насадочным колоннам, работающими в режиме подвисяния. На тарелках одновременно происходит барботаж газа или пара через слой жидкости и частичное «проваливание» жидкости. Газ (пар) движется снизу вверх только через часть отверстий или щелей пульсирующим потоком. Распределение опускающих газ или жидкость отверстий носит статистический характер, жидкость стекает с тарелки на тарелку в местах максимального статического давления.

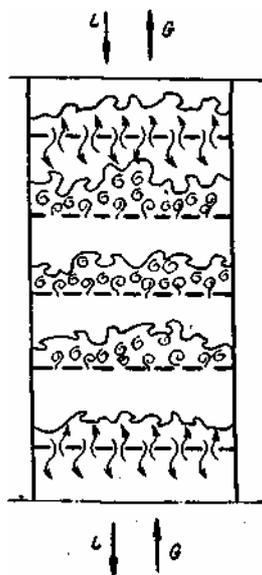


Рис. 4.37. Тарельчатая колонна с неорганизованным переливом жидкости.

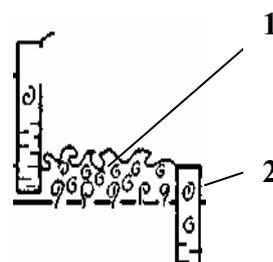


Рис. 4.38. Тарельчатая колонна с переливными устройствами: 1 — тарелка; 2 — переливное устройство.

Суммарную площадь всех отверстий (щелей), или так называемое свободное сечение тарелок, подбирают так, чтобы при заданной скорости газового (парового) потока через часть отверстий происходило «проваливание» жидкости.

Тарельчатые колонны с переливными устройствами. Эти аппараты (рис. 4.38) имеют горизонтальные тарелки 1 и переливные устройства 2. Жидкость поступает на верхнюю тарелку, переливается через переливные устройства сверху вниз и удаляется из нижней части аппарата. Газ (пар) вводится в нижнюю часть аппарата и перемещается вверх, распределяясь на каждой тарелке в виде пузырьков или факелов. В зависимости от способа распределения газа (пара) на тарелках различают тарелки ситчатые (рис.4.39) и колпачковые (рис.4.40).

Характер распределения газа и жидкости зависит не столько от конструкции распределяющих устройств, сколько от скорости газового потока. При небольшой скорости газа в отверстиях ситчатой тарелки отдельные пузырьки газа (пара) отрываются и перемещаются в жидкости один за другим; при этом тарелка работает неполным сечением. Такой режим распределения газа называется *пузырьковым*. В интервале скоростей газового потока, соответствующих пузырьковому режиму, отмечают границу скорости, при которой часть жидкости «проваливается» через отдельные отверстия, граница скорости, при которой «провал» отсутствует, но отверстия работают неравномерно, и, наконец, граница скорости, отвечающая *равномерной работе* тарелки во всем сечении. При этом на тарелке образуется ячеистая пена.

При увеличении скорости газа происходит разрушение ячеистой пены; подобное распределение газа или пара называется *факельным*. При сильном возрастании скорости газа (пара) потоки его разбивают пену и начинают подбрасывать жидкость на большую высоту.

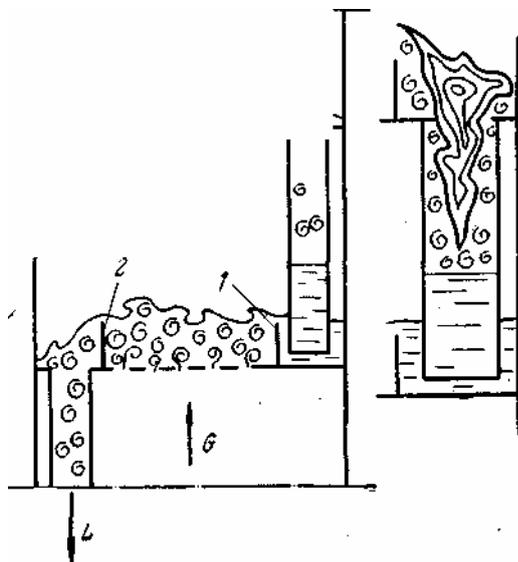


Рис. 4.39. Ситчатая тарелка: 1, 2— пороги.

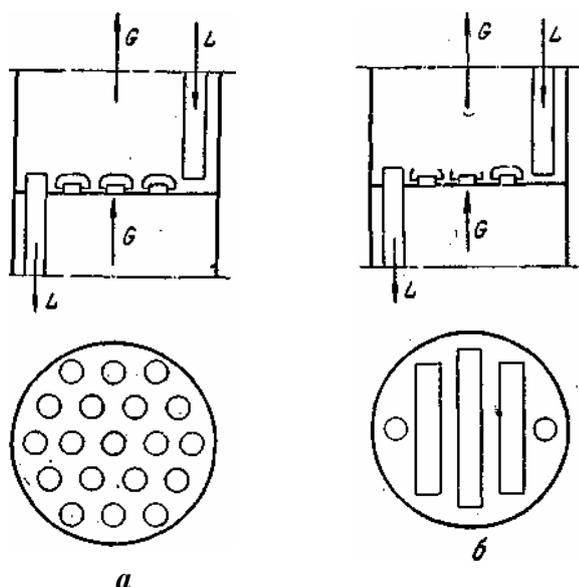


Рис. 4.40
Колпачковые
тарелки
с круглыми (а) и с
туннельными (б)
колпачками.

4.6.3. Экстракция

ЖИДКОСТНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ

Экстракция (жидкостная) — извлечение одного или нескольких растворенных веществ из одной жидкой фазы другой, практически не смешивающейся с первой.

Процесс широко используется для извлечения ценных продуктов из разбавленных растворов, а также для получения концентрированных растворов. Но главное, экстракцию следует рассматривать, наряду с ректификацией, как один из основных способов разделения жидких однородных смесей.

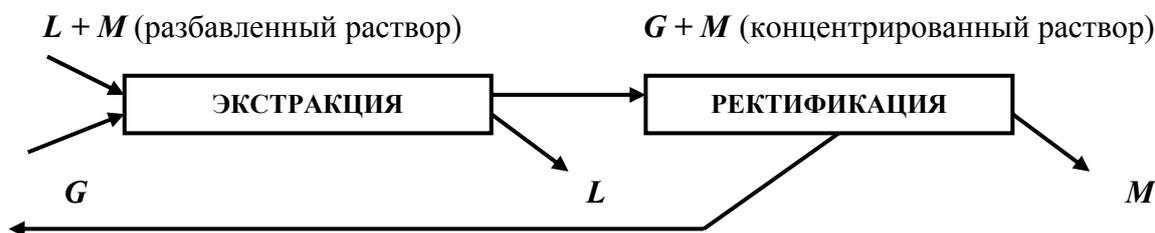


Рис. 4.41. Принципиальная схема сочетания процессов экстракции и ректификации.

(G — экстрагент; M — распределяемое вещество; $G + M$ — экстракт; L — рафинат)

В большинстве случаев экстракция используется в сочетании с ректификацией. Пусть в растворителе L растворено распределяемое вещество M , и концентрация раствора

(исходной смеси) незначительна. Можно подобрать второй растворитель G (экстрагент), которым можно экстрагировать распределяемое вещество M из исходного раствора и получить концентрированный раствор распределяемого вещества в растворителе $G + M$ (экстракт) и очищенный от распределяемого вещества растворитель L (рафинат). Поскольку расход тепла на ректификацию резко уменьшается с ростом концентрации исходного вещества в разделяемой смеси, предварительное экстрагирование позволяет значительно сократить затраты тепла на разделение исходной смеси. Принципиальная схема сочетания процессов экстракции и ректификации показана на рис. 4.41.

Для регенерации экстрагента вместо ректификации иногда используют простую перегонку с водяным паром, выпаривание, вторичную экстракцию (реэкстракцию), реже – кристаллизацию и химическую очистку.

Влияние температуры. В большинстве случаев взаимная растворимость компонентов с увеличением температуры повышается и область существования гетерогенных двухфазных систем уменьшается.

Влияние давления. Изменение растворимости малорастворимых жидкостей, вызванное изменением внешнего давления, невелико и в большинстве случаев им можно пренебречь.

Принципиальные схемы экстракции. В химических производствах используются преимущественно следующие схемы экстракции: однократная экстракция, многократная экстракция с перекрестным током растворителя, многократная экстракция с противотоком растворителя, непрерывная противоточная экстракция, ступенчатая противоточная экстракция.

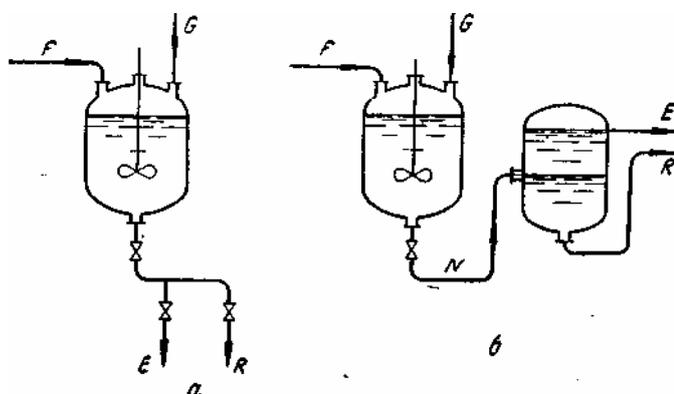


Рис. 4.42. Схема однократной экстракция, проводимой периодическим (а) или непрерывным (б) способом.

Однократная экстракция. Однократная экстракция может быть проведена периодическим или непрерывным способом. Схема однократной периодической

экстракции показана на рис. 14.42, а. В аппарат загружается исходный раствор F , содержащий распределяемое вещество концентрацией X_F и к нему прибавляется порция растворителя G концентрацией Y_G . Обе жидкости перемешивают до установления равновесия. По окончании перемешивания жидкости расслаиваются в том же аппарате. После отстаивания сливают сначала нижний слой рафината R концентрацией X_R , а затем — верхний слой экстракта E концентрацией Y_E .

Для расслаивания фаз часто используют особые отстойники (рис. 4.42, б). В этих случаях процесс однократной экстракции проводят непрерывным способом, так как при непрерывном вводе исходного раствора F и свежего растворителя G из отстойника также непрерывно выводят полученные экстракт E и рафинат R . Количества F , G , E и R относят к единице времени.

Эффективность экстракции может быть значительно повышена, если ее проводить многократно, используя каждый раз свежую порцию растворителя для обработки одной и той же порции исходного раствора. Такой способ проведения процесса получил название *многократной экстракции с перекрестным током растворителя*.

Многократная экстракция с перекрестным током растворителя. Из первой ступени однократной экстракции исходного раствора F растворителем G полученный рафинат состава R_1 вводится во вторую ступень, где обрабатывается свежей порцией растворителя G . Тройная смесь состава N_2 расслаивается на рафинат R_2 и экстракт E_2 . Процесс обработки ведут до тех пор, пока не получат рафинат заданного состава.

Полученные в каждой ступени порции экстракта E_1, E_2, \dots и т. д. содержат все меньшее количество распределяемого вещества.

Общий расход растворителя равен сумме всех порций G во всех ступенях экстракции.

Процесс многократной экстракции можно провести периодическим способом в одном аппарате с мешалкой (см. рис. 4.42, а). Для этого одну и ту же порцию исходного раствора обрабатывают несколькими порциями растворителя, каждый раз смешивая, расслаивая и выводя порцию экстракта из одного и того же аппарата. Процесс ведут до тех пор, пока рафинат не будет иметь заданную концентрацию.

Недостатками способа являются большой расход свежего растворителя и его недостаточное насыщение в ступенях экстракции. Эти недостатки могут быть устранены, если использовать противоточное движение рафината и экстракта при многократной экстракции.

Многократная экстракция с противотоком растворителя. Исходный раствор перетекает самотеком со ступени на ступень, отдавая распределяемое вещество растворителю G . В каждой ступени осуществляется однократная экстракция очищенного рафината более свежим противоточно движущимся растворителем. В последней ступени рафинат контактирует со свежим растворителем G .

Противоток растворителя от последней ступени к первой (по току рафината) осуществляется насосами. На первой ступени насыщенный распределяемым веществом растворитель контактирует с концентрированным раствором F и выходит в виде экстракта E предельно насыщенного распределенным веществом.

ЭКСТРАКЦИЯ ИЗ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ

Экстракция (твёрдофазная) - 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.

Принцип действия установки по очистке грунта от нефти и нефтепродуктов (разработчик ЦНИИХМ, г. Москва) основан на использовании интенсивной *виброкavitационной экстракции* загрязнений, содержащих нефть и нефтепродукты, с последующим разделением пульпы на чистый (песок) и извлеченную нефть (нефтепродукты) [2]. 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 составляют: ширина – 2 м, длина – 2 м, высота – 3 м. Расход воды не превышает 200 кг на 1 тонну исходного грунта, затраты электроэнергии – 10 кВт в час.

Способ экстракции обеспечивает степень очистки грунта не менее 99% и высокую производительность процесса при компактности оборудования. Технология является безотходной и экологически чистой. 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 данный метод обеспечивает снижение эксплуатационных затрат в 3-4 раза и капитальных - в 10 раз.

4.6.4. Адсорбция

Адсорбция — поглощение газов или паров из газовых смесей или растворенных веществ из растворов твердыми поглотителями, называемыми адсорбентами.

Особенностью процессов адсорбции являются *избирательность* и *обратимость*. Благодаря этой особенности процесса возможно поглощение из паро-газовых смесей или растворов одного или нескольких компонентов, а затем в других условиях, десорбирование их, т. е. выделение нужного компонента из твердой фазы в более или менее чистом виде.

Адсорбция широко распространена в различных отраслях химической технологии как метод разделения смесей. В качестве конкретных примеров можно указать выделение бензола из паро-газовых смесей, разделение смесей газообразных углеводородов, сушку воздуха, очистку жидких нефтепродуктов от растворенных в них примесей и т. д.

Природа сил, вызывающих адсорбцию, может быть различной. При адсорбции происходит концентрация молекул поглощаемого вещества на поверхности адсорбента под действием ван-дер-ваальсовых сил. Этот процесс часто сопровождается конденсацией паров поглощаемого вещества в капиллярных порах адсорбента, присоединением молекул поглощаемого вещества по месту ненасыщенных валентностей элементов, составляющих кристаллическую решетку адсорбента, и другими процессами. Независимо от природы адсорбционных сил на величину адсорбции влияют следующие факторы: природа поглощаемого вещества, температура, давление и примеси в фазе, из которой поглощается вещество.

Природа поглощаемого вещества весьма существенно влияет на равновесие при адсорбции. Считается правилом, что равновесная концентрация X_p тем выше, чем больше молекулярный вес поглощаемого газа, а в случае растворов — чем меньше растворимость поглощаемого вещества в жидкости.

Температура и давление также относятся к весьма существенным факторам, влияющим на равновесие при адсорбции. С повышением температуры при прочих равных

условиях равновесная концентрация уменьшается. С ростом давления в паро-газовой фазе равновесная концентрация X_p увеличивается.

Примеси в фазе, из которой поглощается вещество. Обнаружено, при наличии в фазе, из которой адсорбент поглощает вещество A , конкурирующего (вытесняющего) вещества B , т. е. вещества, также способного поглощаться этим адсорбентом, уменьшается равновесная концентрация X_p вещества A . В этом случае вещество B либо частично, либо полностью вытесняет или замещает вещество A в адсорбенте.

При адсорбции смеси паров двух или нескольких веществ обнаружено, что адсорбируются все компоненты смеси, причем степень адсорбции каждого компонента ниже, чем адсорбция индивидуальных веществ в тех же условиях, а соотношение их концентраций в адсорбенте будут обратно пропорциональны их относительной летучести.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АДСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Принципиальные схемы адсорбционных процессов показаны на рис. 4.49. При применении зернистого адсорбента используют схемы с неподвижным (а) и с движущимся адсорбентом (б). В первом случае процесс проводится периодически. Вначале через адсорбент L пропускают паро-газовую смесь G и насыщают его поглощаемым веществом; после этого пропускают вытесняющее вещество B или нагревают адсорбент, осуществляя таким образом десорбцию (регенерацию адсорбента). Во втором случае (рис. 4.49, б) адсорбент циркулирует в замкнутой системе: насыщение его происходит в верхней – адсорбционной – зоне аппарата, а регенерация в нижней – десорбционной. При применении пылевидного адсорбента используют схему с циркулирующим псевдооживленным адсорбентом (рис. 4.49, в)

Аппараты, предназначенные для проведения адсорбции называются *адсорберами*. Адсорберы можно подразделить по условиям работы на следующие группы: а) с неподвижным адсорбентом; б) с движущимся зернистым адсорбентом; в) с псевдооживленным пылевидным адсорбентом

На рис. 4.44 приведена схема периодически действующей адсорбционной установки, предназначенной для извлечения бензола из газовой смеси. Исходная смесь вводится в адсорбер 1 и пропускается через него до момента проскока бензольных паров. Затем газовый поток направляется в адсорбер 2, а в адсорбере 1 проводится десорбция. Для этого через адсорбер пропускают водяной пар, который десорбирует бензол. Смесь паров воды и бензола удаляется из адсорбера 1 в конденсатор-холодильник 3, где конденсируется

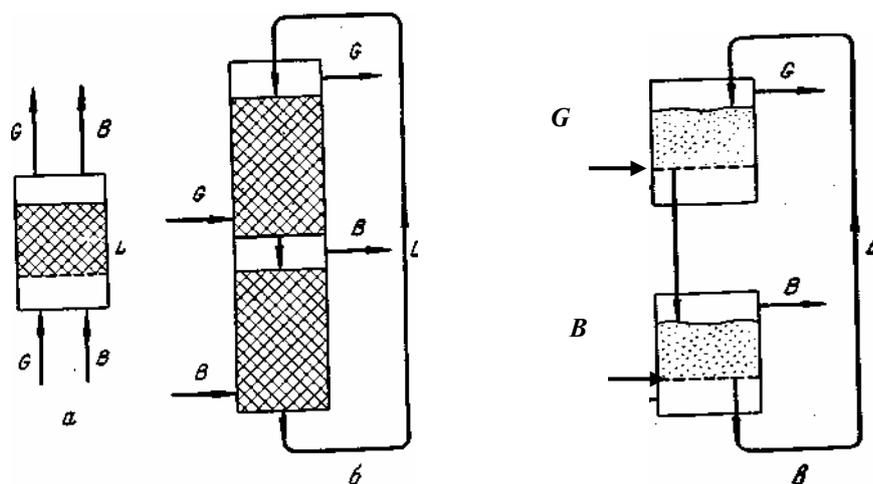


Рис. 4.43. Принципиальные схемы адсорбционных процессов:

(а — с неподвижным зернистым адсорбентом; б — с движущимся зернистым адсорбентом; в — с циркулирующим псевдооживленным адсорбентом)

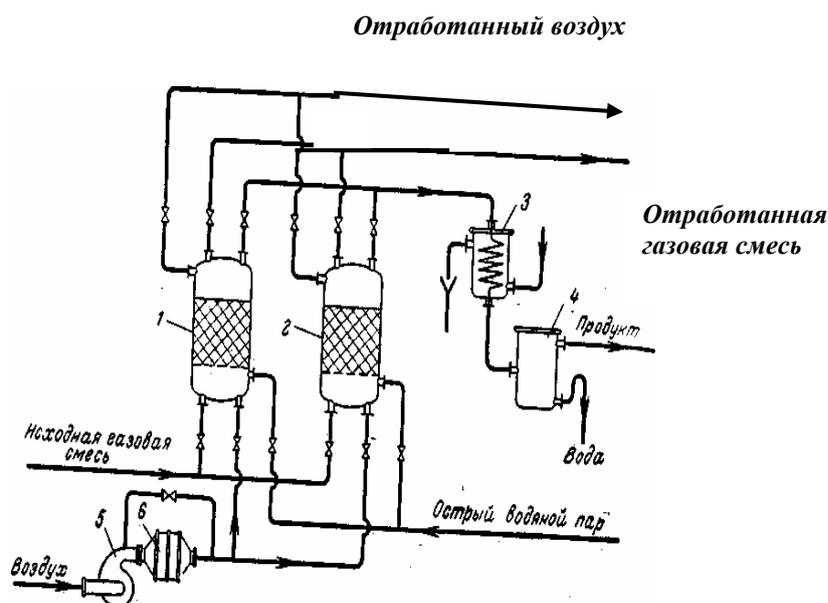


Рис. 4.44. Схема периодически действующей адсорбционной установки: 1, 2 — адсорберы; 3 — конденсатор-холодильник; 4 — отстойник; 5 — вентилятор; 6 — калорифер.

и охлаждается. Конденсат, представляющий собой смесь не растворяющихся друг в друге жидкостей, идет в непрерывно действующий отстойник 4, где разделяется на бензол (направляемый в качестве продукта в сборник) и воду (направляемую обычно в канализацию).

После десорбции бензола адсорбент высушивают продувкой горячего воздуха, который нагнетается вентилятором 5 и нагревается в калорифере 6. Регенерация адсорбента завершается сушкой в адсорбере 1. Поток исходной смеси газов с парами бензола направляется вновь в этот адсорбер, а адсорбер 2 переключается на десорбцию. Таким попеременным включением одного или нескольких периодически действующих адсорберов достигается непрерывная работа установки.

Непрерывно действующая адсорбционная установка показана схематически на рис. 4.45. Она также предназначена для извлечения бензола из смеси его паров с газами. Исходная смесь поступает в адсорбционную секцию непрерывно действующего адсорбера 1,

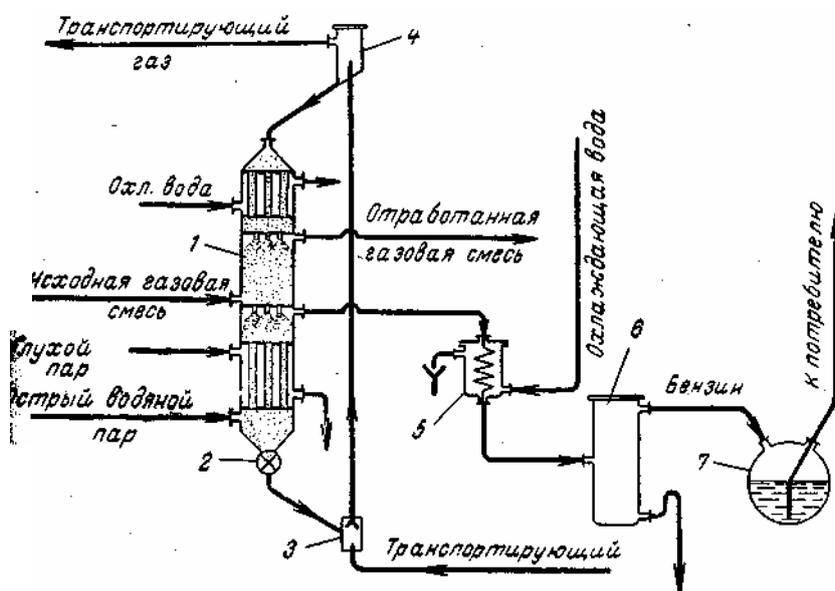


Рис. 4.45. Схема непрерывно действующей адсорбционной установки:

1 — адсорбер; 2 — затвор-отводчик; 3 — загрузочное устройство пневмотранспортной системы; 4 — сепаратор; 5 — холодильник-конденсатор; 6 — отстойник; 7 — сборник.

адсорбционную секцию непрерывно действующего адсорбера 1, через который непрерывно перемещается зернистый адсорбент. В секции происходит адсорбция паров бензола. Далее адсорбент проходит через десорбционную секцию адсорбера 1. Здесь адсорбент взаимодействует с острым водяным паром, в результате чего и происходит десорбция бензола. Регенерированный адсорбент через затвор-отводчик 2 поступает в загрузочное устройство 3 пневмотранспортной системы. Далее он поднимается по пневмотранспортной трубе транспортирующим газом, попадает в сепаратор 4, отделяется от транспортирующего газа и вновь направляется в адсорбер, 1.

Смесь водяного пара с бензольными парами удаляется из верхней части десорбционной секции адсорбера и поступает в холодильник-конденсатор 5. Из него конденсат стекает в непрерывно действующий отстойник 6, где происходит расслаивание

жидкой смеси бензола и воды; бензол из отстойника 6 направляется в сборник 7, вода выводится из системы.

Сушка адсорбента осуществляется транспортирующим газом по пути из загрузочного устройства 3 в сепаратор 4.

4.6.5. Сушка

Наиболее распространенном способом удаления влаги из твердых влажных материалов является сушка. Сушкой называется процесс удаления влаги из твердых влажных материалов путем ее испарения и отвода образующихся паров

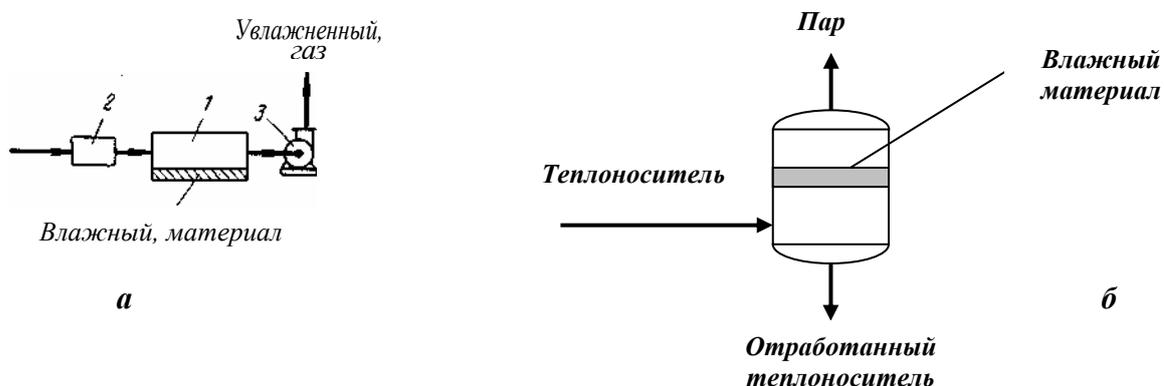


Рис. 4.46. Принципиальные схемы сушки.

а — газовая сушка: 1 — сушилка; 2 — топка или теплообменник; 3 — вентилятор;
б — простая (контактная) сушка

Сушка в технике осуществляется двумя основными способами:

а) нагреванием влажных материалов теплоносителем через твердую непроницаемую перегородку — так называемый процесс контактной сушки;

б) нагреванием влажных материалов путем непосредственного контакта с газовым теплоносителем (воздух, топочные газы и др.) — так называемая газовая, или воздушная сушка¹².

Схемы указанных способов сушки показаны на рис. 4.46.

Иногда тепло подводится к высушиваемому материалу токами высокой частоты или инфракрасными лучами; указанные способы сушки называют соответственно диэлектрической и радиационной сушкой.

РАВНОВЕСНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ

Почти каждый твердый материал способен поглощать влагу из окружающей среды или отдавать ее окружающей среде. Направление течения процесса переноса влаги

¹² Газовую сушку часто называют воздушной потому, что в большинстве случаев в качестве высушивающего газа используется воздух.

является наиболее существенным вопросом в практике сушки, так как от него зависит ее режим, условия, в которых влажный материал способен отдавать влагу окружающей среде.

Окружающая влажный материал среда содержит либо водяной пар либо смесь водяного пара с газами. Обозначим давление водяного пара, когда только он является окружающей средой, через P_{II} , а парциальное давление его в смеси с газами окружающей среды P_D .

Влаге, содержащейся в материале, соответствует определенное давление водяного пара P_M , называемое далее давлением водяного пара во влажном высушиваемом материале.

Очевидно, что условием сушки являются неравенства

$$P_M > P_{II} \text{ или } P_M > P_D$$

Давление водяного пара в высушиваемом материале P_M зависит от влажности материала, температуры и характера связи влаги с материалом.

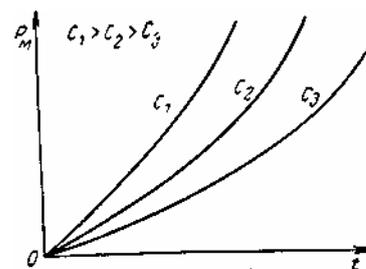


Рис. 4.47. Кривые равновесной влажности материала

С ростом влажности материала и температуры величина P_M возрастает. Абсолютное значение этой величины зависит от характера связи влаги с материалом. Чем сильнее эта связь, тем меньше тем меньше при прочих равных условиях давление водяных паров во влажном материале.

Влажность материала, отвечающая условиям $P_M = P_{II}$ или $P_M = P_D$ соответствует достижению равновесия.

Кривые, выражающие зависимость между давлением водяного пара во влажном материале P_M температурой t и влажностью высушиваемого материала c , показаны на рис. 4.47. Очевидно, что подобные кривые и характеристики высушиваемого материала, позволяющие определить давление водяных паров в высушиваемом материале, необходимы для нахождения основных параметров сушки: температуры, конечной влажности материала и давления водяных паров в пространстве, окружающем высушиваемый материал.

Как было указано выше, величина P_M зависит не только от значения t и c , но и от характера связи влаги с материалом. Различают несколько форм связи влаги с материалом (в порядке убывающей энергии связи).

Химически связанная влага. Под химически связанной влагой понимают воду гидроокиси, которая в результате реакции гидратации вошла в состав гидроокисей и

соединений типа кристаллогидратов. Связь нарушается только в результате химического взаимодействия (иногда в результате прокаливании), и влага не удаляется при сушке.

Адсорбционно связанная влага. Влажность обусловлена адсорбцией воды на наружной поверхности материала и на поверхности его пор. *Осмотически связанная* влага находится внутри структурного скелета материала и удерживается осмотическими силами.

В этих двух случаях связь воды с материалом имеет физико-химическую природу.

Капиллярно связанная влага заполняет макро- и микрокапилляры. Она механически связана с материалом и наиболее легко удаляется. Давление пара над поверхностью материала тем меньше, чем прочнее связь между водой и материалом. Наиболее прочна эта связь у гигроскопичных веществ, Давление пара над ними наиболее отличается от давления насыщенных паров.

Влажному материалу присущи все формы связи с водой, и очень трудно разграничить периоды сушки, соответствующие различным видам связи молекул воды с молекулами вещества. Поэтому экспериментальным путем строят изотермы сорбции, т. е. линии $P_M / P_S = f(C)$ при постоянной температуре. Изотермы сорбции позволяют установить связь между влажностью материала и относительной влажностью воздуха, а также определить равновесную влажность при сушке.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СУШИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Кроме простого приема воздушной сушки, когда воздух нагревается и однократно проходит через сушильную камеру, на практике используют и другие варианты сушки:

- с многократным промежуточным нагреванием воздуха,
- с частичным возвратом отработанного воздуха,
- с многократным промежуточным нагреванием воздуха и частичным возвратом его в отдельных зонах;
- с замкнутой циркуляцией высушивающего газа

Сушка с многократным промежуточным подогревом воздуха схематически представлена на рис. 4.48 В этом случае обычно принимают верхние и нижние пределы температур воздуха

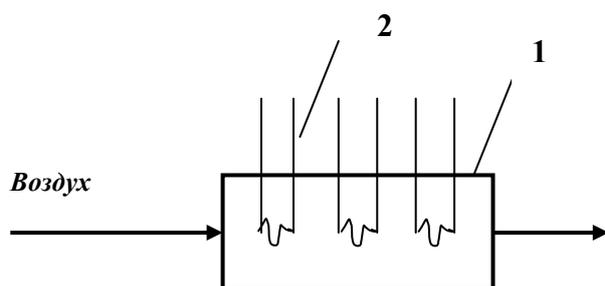


Рис. 4.48. Сушка с многократным промежуточным подогревом воздуха:

1 — сушильная камера; 2 — промежуточные нагреватели.

t_B и t_H . Воздух предварительно нагревается до t_B и после этого взаимодействует с влажным материалом, охлаждаясь до температуры t_H . Далее воздух вновь нагревают до температуры t_B и направляют для взаимодействия с влажным материалом, температура воздуха понижается до t_H и т. д.

Рассмотренный рабочий вариант сушки характеризуется тем, что *требуемое количество тепла подводится к высушиваемому материалу при пониженной температуре воздуха.*

Сушка с частичным возвратом отработанного воздуха схематически показана на рис. 4.49 исходный воздух смешивается предварительно с частью отработанного воздуха, далее нагревается до требуемой температуры и после этого взаимодействует с высушиваемым материалом. Особенности этого варианта сушки по сравнению с сушкой при однократном проходе воздуха являются *пониженная температура воздуха при контактировании его с влажным материалом, повышенное начальное влагосодержание воздуха и большая массовая скорость воздуха, а следовательно, большая линейная скорость его в сушильной камере.*

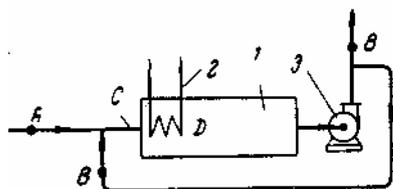


Рис. 4.49. Сушка с частичным возвратом отработанного воздуха:

1 — сушильная камера; 2 — нагреватель; 3 — вентилятор.

Сушка с частичным возвратом отработанного воздуха и промежуточными нагреваниями представляет собой сочетание двух рассмотренных выше вариантов. Очевидно, что этот вариант сушки отличается одновременно *пониженной температурой воздуха, большим начальным влагосодержанием воздуха и большей линейной скоростью его в сушильной камере* (рис. 4.50).

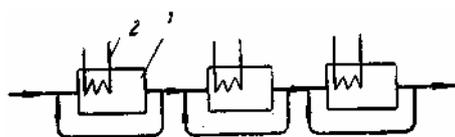


Рис. 4.50. Сушка с частичным возвратом отработанного воздуха и промежуточными нагреваниями:

1 — сушильная камера; 2 — подогреватель.

Нетрудно видеть, что рассмотренные рабочие варианты сушильных процессов обеспечивают смягчение условий сушки, т. е. понижение температуры и повышение влажности высушивающего воздуха. Одновременно с этим частичный возврат

отработанного воздуха приводит к росту линейной скорости его в сушильной камере, что обеспечивает увеличение скорости сушки.

Сушка с замкнутой циркуляцией высушивающего газа схематически показана на рис. 4.51. Она применяется в тех случаях, когда в качестве высушивающего газа используется чистый и дорогостоящий газ, например водород. Очевидно, что в этих условиях отработанный газ не может быть выпущен в атмосферу и появляется необходимость замкнутой его циркуляции. Полностью насыщенный водяными парами газ нагревается, в результате чего резко снижается его относительная влажность и одновременно возрастает высушивающая способность. После этого газ взаимодействует с влажным материалом, насыщаясь влагой. Увлажненный газ охлаждается до точки росы, и часть находящейся в нем влаги конденсируется. Затем газ вновь направляется на нагревание и сушку.

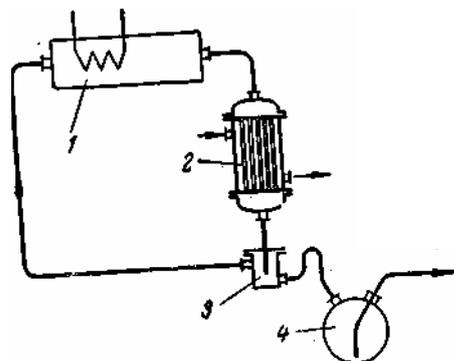


Рис. 4.51. Сушка с замкнутой циркуляцией высушивающего газа:

1 – сушилка; 2 – конденсатор-холодильник; 3 – водоотделитель; 4 – сборник.

Здесь следует особенно подчеркнуть, что, используя тот или иной рабочий вариант сушки, можно лишь ускорить или замедлить процесс сушки, сделать более мягкими или более жесткими условия проведения процесса, но нельзя существенно повлиять на расход тепла, поскольку последний определяется только начальными и конечными параметрами высушивающего газа..

4.6.6. Кристаллизация

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 вторичному использованию, а фильтрат подвергается дальнейшей переработке.

Схема кристаллизатора с *принудительной циркуляцией* суспензии приведена на рис. 4.52. Циркуляция создается мешалкой. Кристаллизатор с *естественной циркуляцией* раствора представлен на рис. 4.53.

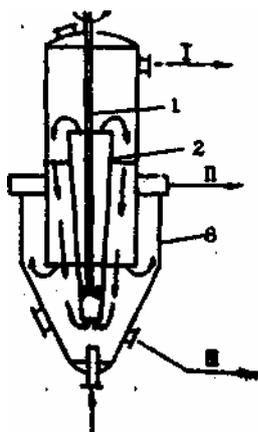


Рис. 4.52. Кристаллизатор с принудительной циркуляцией суспензии:

I — соковый пар; II — маточный раствор; III — суспензия; IV — сточная вода; 1 — мешалка; 2 — циркуляционная труба; 3 — осадительная камера.

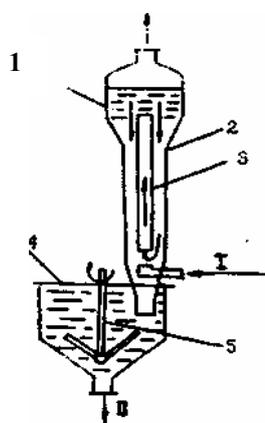


Рис. 4.53. Кристаллизатор с естественной циркуляцией раствора:

I — раствор; II — суспензия; 1 — сепаратор; 2 — корпус; 3 — центральная труба; 4 — гидрозатор; 5 — мешалка.

В данном пособии не рассматриваются механические и химические (биохимические) процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В двух книгах. — М.: Химия, 1981. — 812 с.
2. Калыгин В.Г. Промышленная экология. Курс лекций. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. — 240 с.
3. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. Изд. 2-е доп. Перераб. — М.: Химия, 1972. — 496 с.
4. Родионов А.И. и др. Технологические процессы экологической безопасности /Основы энвайронменталистики/. 3-е изд. Перераб. и доп. — Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000 — 800с.

Раздел 5. БЕЗОТХОДНЫЕ И МАЛООТХОДНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА

Переход в «новое эволюционное состояние - ноосферу возможен лишь при сохранении циклов вещества и энергии, сложившихся в биосфере».

В. Й. Вернадский

Дальнейшее устойчивое развитие производства и связанное с ним решение проблемы охраны окружающей среды должны базироваться на новом подходе. Его принципиальная новизна обусловлена невозможностью эффективно решать проблемы охраны среды и рационального использования природных ресурсов только путем развития методов переработки, обезвреживания и захоронения отходов в условиях экспоненциального роста их объемов.

Народная мудрость гласит: «Чисто не там, где убирают, а там, где не сорят». Если «уборка» — это очистка предприятия от вредных выбросов, то «не сорить» позволяют разработка и внедрение малоотходных (безотходных) технологий.

Концепция безотходного производства была предложена и развита академиками Н. Н. Семеновым, И. В. Петряновим-Соколовым, Б. Н. Ласкориним и др. Анализ развития производств и динамики потребления сырья и образования отходов привели к неизбежному выводу о том, что дальнейшее развитие производств (и общества в целом) не может осуществляться на базе исторически сложившихся традиционных экстенсивных технологических процессов без учета экологических ограничений и требует принципиально нового подхода. Этот подход, получивший название «безотходная технология», а позднее «чистая технология», основой которого является цикличность материальных потоков, подсказан самой природой.

5.1. Определение и концепция безотходного производства

Развитие представлений об окружающей среде и рациональном природопользовании, а также практические задачи создания и внедрения безотходных производств, сделали необходимым уточнение их понятия.

В достаточно полном виде понятие безотходная технология было сформулировано на Европейском совещании по сотрудничеству в области охраны окружающей среды (Женева, 1979 г.). На совещании была принята специальная «Декларация о малоотходной и безотходной технологии и использовании отходов», в которой говорится, что: *«Безотходная технология есть практическое применение знаний, методов и средств с тем, чтобы в рамках потребностей человека обеспечить наиболее рациональное использование природных ресурсов и энергии и защитить окружающую среду»* [8] Развитие представлений об

окружающей среде и рациональном природопользовании, а также практические задачи по созданию и внедрению безотходных производств привели к необходимости сформулировать новое определение безотходной технологии, которое и было принято на семинаре Европейской экономической комиссии по малоотходной технологии (Ташкент, 1984 г.). Рекомендации ташкентского семинара рассмотрены и одобрены на заседании старших советников правительств ЕЭК по окружающей среде и направлены всем странам – участницам [1]: *«Безотходная технология – это такой способ производства продукции (процесс, предприятие, территориально-производственный комплекс), при котором наиболее рационально и комплексно используются сырье и энергия в цикле сырьевые ресурсы – производство – потребление – вторичные сырьевые ресурсы таким образом, что любые воздействия на окружающую среду не нарушают ее нормального функционирования».*

Здесь важно обратить внимание на 3 основных положения.

Во-первых, подчеркивается необходимость использования сырьевых ресурсов в цикле, включающем и среду потребления. Это означает, что замкнутым такой цикл может быть только на уровне территориально-производственного комплекса (ТПК), т.е. в формулировке уже заложен принцип кооперации производств и региональный подход. Отсюда безотходное производство должно быть практически замкнутой системой, организованной по аналогии с экосистемами. В них продукт жизнедеятельности одних организмов потребляется другими и в целом осуществляется саморегулирующийся биогеохимический круговорот веществ. Основу производства составляет сознательно организованный и регулируемый человеком техногенный круговорот сырья, продукции и отходов.

Во-вторых, обязательным, положением безотходного производства является включение в него всех компонентов сырья. При этом должно быть обеспечено максимально возможное использование энергетического потенциала. Здесь также наблюдается прямая аналогия с природными экосистемами. Будучи практически замкнутыми, они, пропуская через весь цикл солнечную энергию, поглощают её, трансформируют и излучают в космическое пространство. Таким же образом и безотходное производство является практически замкнутым, но неизолированным.

Третьей составляющей частью концепции безотходного производства является сохранение или не нарушение нормального функционирования окружающей среды (сложившегося экологического равновесия), при котором оно не оказывает неблагоприятного воздействия на здоровье человека. *Критерием качества окружающей среды* считают в настоящее время предельно допустимые концентрации (ПДК) или рассчитанные на их основе предельно допустимые

выбросы (ПДВ и ПДС), а в будущем предельно допустимые экологические концентрации (ПДЭК) или нагрузки (ПДЭН).

Актуален вопрос, что такое безотходное производство – красивая мечта или реальность?

К концепции безотходной технологии имеются два подхода. Один из них основан на законе сохранения вещества, в соответствии с которым, материя всегда может быть преобразована в ту или иную продукцию. А если это так, то всегда можно создать такой технологический цикл, в котором все экологически опасные вещества будут преобразовываться в безопасный продукт или исходное сырье. Согласно другому подходу, полностью безотходную технологию нельзя создать ни практически, ни даже теоретически, коль скоро это определенным образом противоречит второму закону термодинамики. Подобно тому, как энергию нельзя полностью перевести в полезную работу, так и сырье невозможно полностью перевести в полезный экологически безопасный продукт. Второй подход кажется не только теоретически более обоснованным, но и практически более трезвым и реальным. Другими словами, полностью безотходная технология — это *идеальная система*, к которой должен стремиться всякий реальный технологический цикл, и чем больше будет это приближение, тем меньшим будет экологически опасный след.

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

В настоящее время, особенно после «Семинара по стимулированию чистого производства» ЮНЕП/ИЕО (Кантенбери, Великобритания, 17-20 сентября 1990 г.), в основном применяется термин *чистое производство*.

Термин чистое производство был введен на заседании рабочей группы ЮНЕП/ИЕО в 1989 г. Было дано следующее определение чистого производства: «*это производство, которое характеризуется непрерывным и полным применением к процессам и продуктам природоохранной стратегии, предотвращающей загрязнение окружающей среды таким образом, чтобы понизить риск для человечества и окружающей среды.*»

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

Чистое производство достигается путем улучшения технологии, применением ноу-хау и/или путем изменения управления производством и его организации» [2]

В связи с принятием большинством стран специального природоохранного законодательства и программ по стимулированию безотходного или чистого производства сама концепция и определение безотходного или чистого производства имеют важное практическое значение, поскольку речь идет в основном об экономических методах стимулирования, связанных с налоговыми льготами, льготным кредитованием выпуска экологически чистой продукции и внедрения малоотходных и безотходных или чистых технологических процессов и производств и, наоборот, введением специального налогообложения экологически вредной продукции и соответствующих производств

Они переходят от ограничения выбросов и сбросов загрязняющих веществ и ликвидации отходов к поддержке государственных требований и предотвращению загрязнения атмосферы и гидросферы и уменьшению отходов, как в интересах населения, так и для повышения эффективности производства и конкурентоспособности. В то время как экономика промышленно развитых стран выросла, расход ресурсов, например, и энергоемкость продукции уменьшились. С 1970 года химические предприятия промышленно развитых стран удвоили выпуск продукции, сократив более чем на половину потребление энергии на единицу продукции.

Таким образом, по своей сути принцип чистой технологии отличается от так называемых традиционных технологий и больше приближается к малоотходной. Но так, или иначе, если стоять на позиции, что полностью безотходная технология — это идеальная модель производства, то совершенно очевидно, что и малоотходная технология и чистая технология требуют определенных коэффициентов, оценивающих степень их приближения к безотходной. А поскольку каждое производство имеет свою целенаправленную особенность, то и такие коэффициенты для каждого из них могут быть свои.

5.2. Коэффициенты для оценки степени приближения традиционной технологии к безотходной.

Количественная оценка приближения производства к безотходному подразумевает формирование критериев, позволяющих отнести его к категории безотходных, малоотходных или рядовых (традиционных).

В основу критериев, ограничивающих вредное воздействие производства на среду, положены существующие санитарно-гигиенические нормативы – предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ, предельно допустимые выбросы (ПДВ) в атмосферу и предельно допустимые сбросы (ПДС) в водоемы. ПДВ и ПДС измеряются во времени для каждого источника организованного выброса или сброса. При этом поступление вредных веществ от данного источника и от всех источников района с учетом дальнейшего развития промышленных предприятий и рассеивания вредных веществ в атмо– и гидросфере не должно создавать концентрации, превышающей предельно допустимую.

Таким образом, говоря о степени приближения традиционной технологии в безотходной, первое, что надо иметь в виду – это то, что предприятия должны выполнять санитарно-гигиенические требования, поскольку экологические нормативы пока не разработаны.

Второй по, значимости количественной оценкой безотходности производства является степень использования в технологических процессах сырья и материалов. Универсального критерия нет, но в ряде отраслей страны уже введены соответствующие показатели. Так, в цветной металлургии используется *коэффициент комплексности* – доля компонентов, извлекаемых из сырья по отношению ко всему количеству. В ряде производств его величина достигает 80 %. В угольной промышленности действует коэффициент безотходности производства (%):

$$K_B = 0,33 \cdot (K_{II} + K_B + K_T),$$

где K_{II} , K_B , K_T — соответственно коэффициенты использования, образующихся при проведении работы породы, попутно забираемой воды и пылегазовой смеси, %.. Для этой отрасли установлено, что производство является безотходным, если коэффициент превышает 75 %. В случае использования наряду с образующейся породой отвалов прошлых лет коэффициент безотходности может быть более 100 %.

В химической промышленности также введен коэффициент безотходности, разработана и реализована специальная методика его определения и отнесения соответствующих технологических процессов к категории безотходных, малоотходных или рядовых. Он характеризует полноту использования материальных и энергетических ресурсов, а также интенсивность воздействия производства на окружающую среду:

$$K_B = f \cdot K_M K_{Э} K_A,$$

где K_B - коэффициент безотходности; $0 < K_B < 1$; f —коэффициент пропорциональности (определяется эмпирически); K_M и $K_{Э}$ коэффициенты полноты использования материальных и энергетических ресурсов; K_A - коэффициент соответствия экологическим требованиям.

Разработанная методика предназначена для оценки коэффициента использования материальных ресурсов. По его величине с учетом мощности предприятия осуществляется

отнесение его к соответствующей категории (рис. 5.1). В соответствии с методикой, к малоотходным относятся производства с K_M , равным не менее 0,8-0,9, к безотходным - 0,90-0,98. При этом *поступление в окружающую среду газовых выбросов, сточных вод и твердых отходов не должно превышать санитарно-гигиенические нормы*. Для практических целей значение безотходности, равное **75-90%**, принимается в качестве критерия малоотходного, а **90-98 %** - безотходного производства и в других материалоемких отраслях [7]. При этом важно учитывать токсичность отходов путем введения соответствующих коэффициентов и в любом случае их поступление должно соответствовать ПДК.

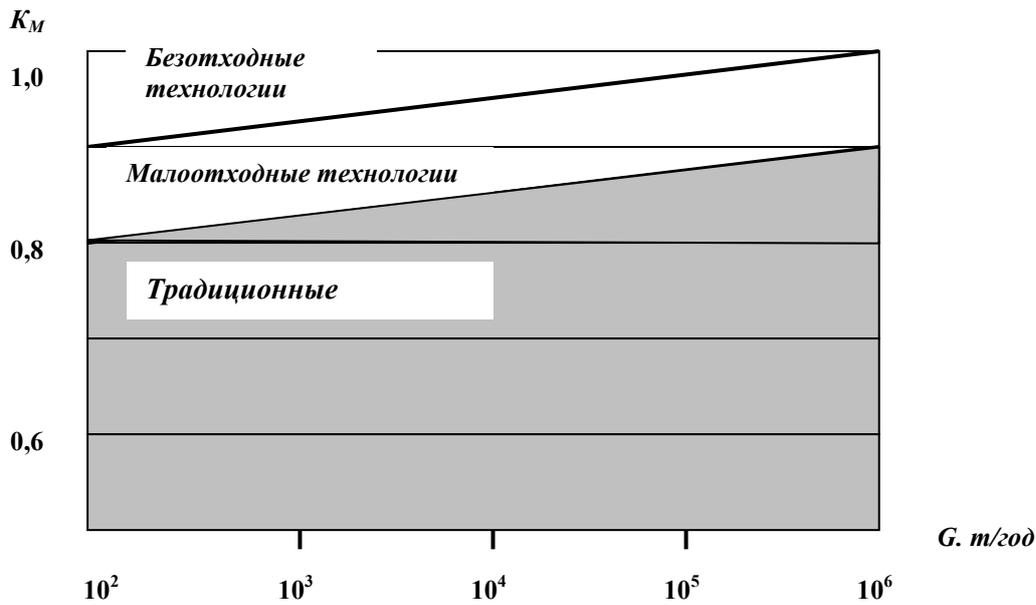


Рис. 5.1. Распределение производств по категориям в зависимости от коэффициента полноты использования материальных ресурсов (K_M) и его мощности (G)

В общем случае для оценки степени совершенства технологического процесса, учитывая взаимодействие с окружающей средой, за критерий безотходности принят коэффициент экологического действия (к.э.д.), определяемый как:

$$k = \frac{B_T}{B_\phi} = \frac{B_T}{B_T + B_m},$$

где B_T – теоретическое воздействие, необходимое для производства; B_ϕ – фактическое воздействие; B_m – воздействие, определяемое конкретным, производством.

Если $B_\phi \gg B_T$ то $K \rightarrow 0$, то есть данное производство абсолютно не учитывает требований экологической безопасности, что неизбежно ведет к так называемому экологическому «просчету» или экологическому «бумерангу». Чем выше значение коэффициента экологического воздействия K , тем более совершенно производство с

учетом воздействия на окружающую среду, тем более существенно приближение к безотходной технологии [5]. Для идеальной модели, модели безотходного производства, коэффициент экологического действия равен единице.

5.3. Принципы безотходного производства

Вероятно, имеет смысл обратить внимание на то, что в безотходной технологии объединены два фактора, которые хотя и взаимосвязаны, но имеют свою целевую направленность, это — рациональное использование материальных ресурсов и интенсивность воздействия на окружающую среду. Рациональное использование материальных ресурсов направлено на их сбережение и носит больше экономический уклон, тогда как интенсивность воздействий на окружающую среду имеет всецело уклон в сторону экологических последствий от этого воздействия. Можно построить производственный процесс таким образом, чтобы исходное сырье и материальные ресурсы использовались достаточно полно, не взирая на экологические последствия. И наоборот, иногда экологическая обстановка может быть столь обостренной, что для ее разрядки подчас следует жертвовать экономией средств и материальных ресурсов. К сожалению, с первым подходом приходится встречаться значительно чаще. В целом только комплексный подход, оптимально учитывающий и экономические и экологические факторы, может обеспечить эффективность малоотходной технологии и максимально приблизить ее к идеальной — безотходной.

Основными принципами создания такого производства являются:

- принцип системности (когда каждый отдельный процесс рассматривается как элемент более сложной производственной системы);
- комплексное использование сырьевых и энергетических ресурсов (когда учитывается и возможность извлечения сопутствующих элементов);
- цикличность материальных потоков (когда замкнутый производственный цикл определенным образом моделирует природные круговороты);
- рациональная организация (когда невосполнимые потери природных ресурсов сводятся к минимуму за счет утилизации отходов);
- принцип экологической безопасности.

Обсудим некоторые из сформулированных принципов.

В соответствии с принципом *системности* каждый отдельный процесс рассматривается как элемент более сложной производственной системы, а на более высоком иерархическом уровне — как элемент всей эколого-экономической системы,

включающей помимо материального производства и другой хозяйственной деятельности, природную среду (популяцию, атмосферу, биосферу, ландшафты и т.д.), а также человека и среду его обитания. Принцип системности должен учитывать существующую и усиливающуюся взаимосвязь и взаимозависимость производственных, социальных и природных процессов.

Примером применения принципа системности в организации производства может служить создание замкнутых водооборотных схем, в частности на МНПЗ, где помимо замкнутой водооборотной схемы завода имеются внутренние водооборотные циклы в каждом цехе. При этом снижаются расходы на водоподготовку, потери воды в технологическом процессе и количество вредных выбросов. Осадки после очистки воды перерабатываются и используются в виде вторичного сырья. Metallургические шлаки успешно используются в изготовлении строительных материалов. Интересно отметить, что шлаки уральских металлургических комбинатов, которые раньше поступали в отвалы, содержат значительное количество различных металлов и на современном уровне развития металлургии могут служить сырьем для их выплавки.

Важным принципом создания безотходного производства является *комплексность использования ресурсов*. Он требует максимального использования всех компонентов сырья и энергоресурсного потенциала. Практически все сырье является комплексным, и в среднем не менее трети массы составляют сопутствующие элементы, которые могут быть утилизированы лишь при комплексной переработке. Так, уже сейчас почти всё серебро, висмут, платина и платиноиды, а также 20 %, золота получают попутно при переработке различных руд. Принцип комплексного использования сырья в России возведен в ранг государственной задачи. Конкретные формы его реализации в первую очередь зависят от уровня организации безотходного производства на стадии отдельного процесса производства и эколого-экономической системы.

Особого рассмотрения заслуживает принцип *цикличности* материальных потоков, учитывающий возможность моделирования природных циклов. Возврат веществ в круговорот — это не «безвозмездная» услуга, он всегда требует затрат энергии. Если источником энергии для возвращения служит солнечный свет, то людям не приходится затрачивать дорогостоящие виды топлива. Если не нарушать природные механизмы рециркуляции, то они в основном сами реализуют возврат в круговорот. В случае же промышленных материалов (к ним, например, относятся металлы) повторное их использование требует немалых затрат топлива и денежных средств, а когда запасы этих материалов становятся ограниченными, то здесь просто нет другого выхода.

Для оценки размера возврата веществ в круговорот вводится так называемый коэффициент рециркуляции, выражающийся отношением рециркулируемой доли потока вещества через систему (M_p) к общему потоку вещества через систему (M):

$$K_B = \frac{M_p}{M}. \quad (9.3)$$

Коэффициент возврата может быть мал ($\approx 10\%$) — при изобилии ресурсов или в случае несущественных для жизни элементов. Например, для платины и золота, которые человек считает очень ценными, K_B достигает 90% и более [3]. Естественно, что коэффициент рециркуляции энергии в принципе равен нулю, поскольку энергия проходит все системы насквозь и не используется вторично. Естественно также, что коэффициент рециркуляции ничего не говорит и о скорости, с которой вещества движутся по кругу.

Примером принципа *цикличности* может служить рациональное использование катализаторов при переработке нефти. Катализаторы (в том числе на основе платины) являются ценным материалом и для их работы необходимо проводить регенерацию (очистку и восстановление их свойств). При правильной организации процесса обеспечивается максимальный срок службы катализатора. После регенерации катализатор возвращается в технологический цикл, а отходы регенерации удаляются с предприятия и перерабатываются с извлечением из них ценных веществ.

Повторное использование материальных ресурсов (рециркуляция) имеет исключительно большое значение с точки зрения сохранения или продления времени эксплуатации важнейших мировых запасов руд (исчерпаемых ресурсов). Для их количественной оценки служат так называемые индексы исчерпания ресурсов, которые характеризуют расходование имеющихся мировых запасов с учетом сохранения темпов ежегодного прироста потребления. Можно подсчитать (особенно удобно это сделать для металлов), что если запасы возрастут в 10 раз (такое возрастание, учитывая достигнутую степень изученности планеты, представляется уже маловероятным), то обеспеченность сырьем производства увеличится всего в 2,5-3 раза. В случае рециркуляции 50% металлов из сферы потребления в сферу производства обеспеченность важнейшими металлами возрастает в 3-3,5 раза, а при 95-98%-ной степени рециркуляции — в 5-7 раз (табл. 5.1, [4]).

В табл. 5.2 [4] представлены данные о годовой добыче и сроках исчерпания важнейших источников энергии на 1970 г. и 1989 г. (с учетом открытия новых месторождений), которые показывают некоторое увеличение времени исчерпания (для нефти и газа), хотя и весьма незначительное. Поэтому важнейшим резервом сырья является использование отходов (там где это возможно, например, металлов).

Выход из сложившейся ситуации заключается в целенаправленном повышении роли вторичных ресурсов (рационального их использования) и организации локального, регионального, а затем и глобального (в масштабах государства) техногенного круговорота веществ, в котором первичное сырье будет затрачиваться только на восполнение потерь и расширение объемов производства. В конечном итоге основным для промышленного производства должно стать вторичное сырье. Как видно из рассмотренного материала, такая тенденция уже существует. Так, в нашей стране **25-30** лет назад в готовую продукцию переходило всего **1-2%** используемых сырьевых материалов, **15-20** лет назад – от **5 до 10%**. Анализ использования сырьевых материалов по шести важнейшим отраслям промышленности (черная и цветная металлургия, добыча и переработка угля, производство удобрений, химических продуктов и строительных материалов), выполненный Всесоюзным институтом вторичных материальных ресурсов в **1985** г. по заданию Государственного комитета СССР по науке и технике, показал, что полезно используются уже **28,6%**. Сюда входит любое полезное использование отходов, в том числе и на засыпку выработанных шахт, котлованов, выравнивание территорий, строительство дорог и т.д. Можно спорить о степени точности проведенных расчетов, но тенденция просматривается довольно убедительно.

Таблица 5.1

Время исчерпания мировых запасов важнейших металлов при различных сценариях

<i>Металлы</i>	Мировые запасы млн.т.	Среднегодовой прирост потребления %	<i>Индекс исчерпания ресурсов, годы</i>			
			При современной сырьевой базе	При 10-кратном увеличении запасов	С учетом 50% рециркуляции	С учетом 95-98 % Рециркуляции
Железо	100000	1.3	109	267	319	598
Алюминий (из бокситов)	1 170	5.1	35*	77	91	135
Медь	308	3.4	24	76	95	170
Молибден	5.4	4.0	36	37	104	165
Хром	775	2.0	112	222	256	416
Титан	147	2.7	51	127	152	255

Все неиспользованное или недоиспользованное сырье, а как мы видим, это пока его наибольшая часть, поступает в окружающую среду, что весьма неблагоприятно сказывается на живых организмах, включая и человека.

Годовая добыча и сроки исчерпания запасов нефти, угля и газа

Вид топлива	Годовая добыча в 1970 г.,	Срок исчерпания в 1970 г., [годы]	Годовая добыча в 1989 г.,	Срок исчерпания в 1970 г., [годы]
Нефть	2,3 млрд.т	31	3,0 млрд.т	41
Уголь	2,2 млрд.т	2300	5,2 млрд.т	326 (антрацит) 434 (битуминозный)
Газ	840 млрд. м ³		1920 млрд. м ³	60

У нас в стране имеется целый ряд действующих технологий, в той или иной мере приближенных к безотходным.

В частности, к ним можно отнести впервые разработанную у нас в стране технологию получения глинозема, соды, поташа и цемента из алюмосиликата натрия и калия (минерал, названный нефелином). Принципиальная технологическая схема переработки нефелина приводится на рис. 5.1. [3]

При этом затраты на производство глинозема, соды, поташа и цемента, получаемых из нефелинового сырья, на 10-15% ниже стоимости получения этих продуктов другими промышленными способами. Кроме того, технологические процессы получения глинозема, соды и поташа из традиционного сырья связаны с образованием значительных количеств неиспользуемых токсичных отходов.

Другим примером приближения к безотходной технологии может служить технологическая схема производства фосфорной кислоты из апатитных руд [3]. Следует отметить, что апатито-нефелиновые руды содержат свыше 20 химических элементов в достаточно высоких концентрациях. Извлекаемые из них апатитовый и нефелиновый концентраты, в свою очередь, являются комплексным сырьем для различных отраслей промышленности.

К новым малоотходным экологически чистым технологиям можно отнести производство стеклянного волокна и порошковые технологии [5, 6].

К общим принципам создания безотходного производства относится также *рациональность его организации*. Здесь определяющим являются требования разумного использования всех компонентов сырья, максимального уменьшения энерго-, материало- и трудоемкости производства и поиск новых экологически обоснованных технологий. С ними во многом связано снижение негативного воздействия на среду и нанесения ей ущерба, включая смежные отрасли хозяйства. Конечная цель – оптимизация производства одновременно по энерготехнологическим,

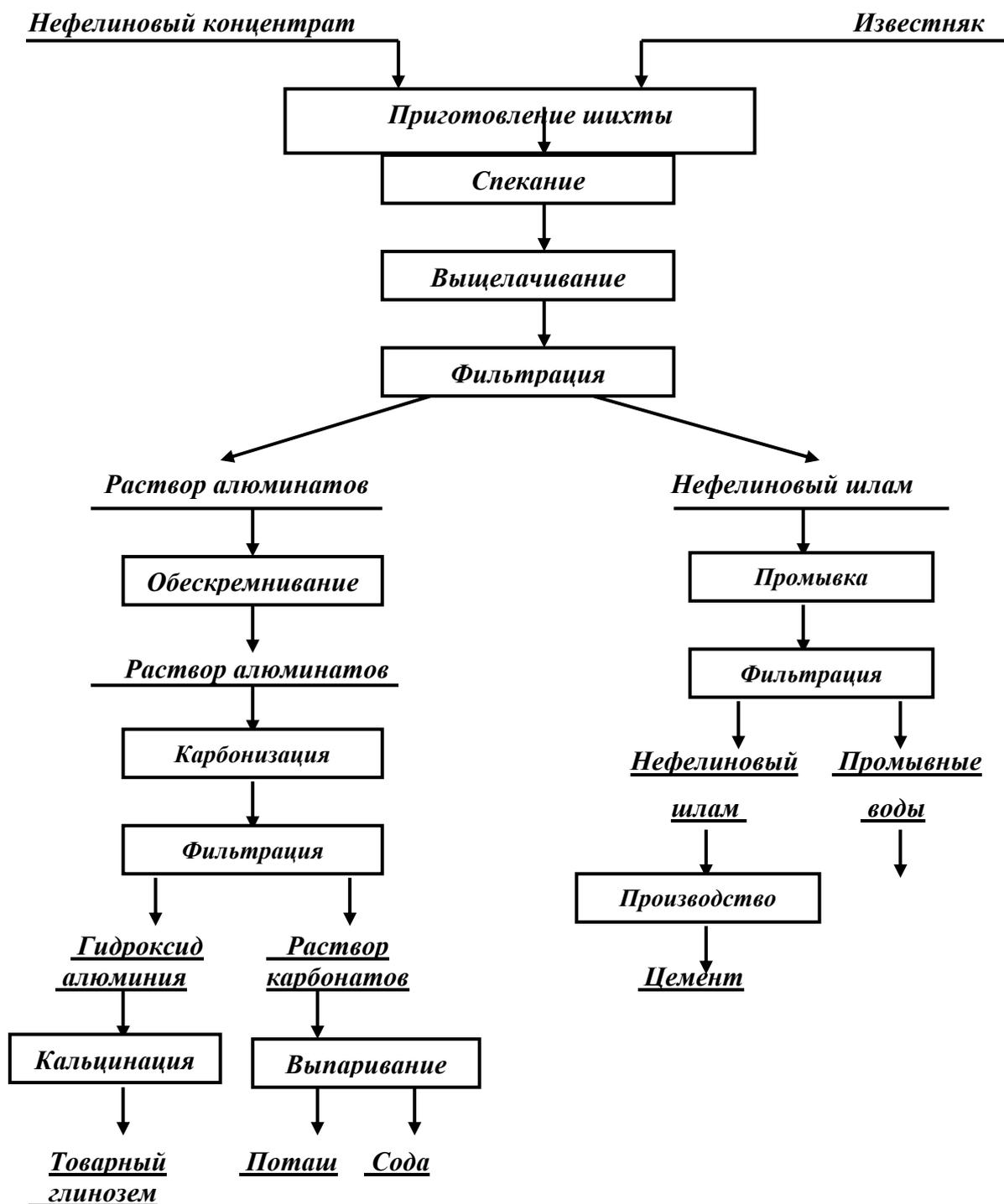


Рис. 5.1. Технологическая схема переработки нефелина

экономическим и экологическим параметрам. Главным путем достижения цели служит разработка новых и усовершенствование существующих технологических процессов и производств. Примером такого подхода является утилизация пиритных огарков — отходов производства серной кислоты, которые перерабатываются на цементных предприятиях. Вместе с тем при этом пропадают ценные компоненты огарков — медь, железо, серебро, золото и т.д. В настоящее время разработана экологически выгодная технология с получением меди, благородных металлов и последующим использованием железа.

5.4. Основные направления развития мало- и безотходных производств

В декларации о малоотходной и безотходной технологий и использовании отходов (Женева, 1979 г.) сформулированы четыре *основных направления* их развития:

1. Создание бессточных технологических систем различного 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.

В соответствии с этим, в области *совершенствования технологических процессов* можно выделить следующие направления:

- внедрение геотехнологических методов разработки месторождений полезных ископаемых (например, подземное выщелачивание);
- применение безводных методов обогащения и переработки сырья на месте его добычи;
- использование гидрометаллургических методов переработки руд и отходов; вместо пирометаллургических, так как воду проще очищать, чем газы;
- применение методов порошковой металлургии;
- внедрение окислительно-восстановительных технологий с применением кислорода, водорода, озона, свободных радикалов, электрического тока и т.д.;
- использование в технологии сверхвысоких давлений и температур, эффекта сверхпроводимости;
- разработка высоких технологий, в частности плазменных и лазерных;
- замена химических процессов с использованием кислот и щелочей механическими методами, например, при очистке поверхностей;
- замена прямоточных процессов противоточными;

- внедрение перспективных высокоэффективных мембранных, ионообменных, экстракционных и других методов для разделения и выделения ряда высокоценных и токсичных веществ;
- использование высокоэффективных методов тепло- и массообмена (например, кипящего слоя в установках каталитического крекинга при переработке нефти);
- максимальная замена первичных сырьевых и энергетических ресурсов вторичными;
- создание энерготехнологических процессов. Комбинирование технологических и так называемых энерготехнологических процессов позволяет увеличивать производительность агрегатов, экономить энергоресурсы, сырье и материалы. В частности, таким образом организованы многотоннажные производства аммиака, азотной кислоты и карбамида. Организация энерготехнологического получения аммиака позволила снизить удельные расходы электроэнергии в 8 раз;
- внедрение непрерывных процессов;
- интенсификация и автоматизация процессов и т. д.

Совершенствование *аппаратурного оформления* предполагает:

- разработку принципиально новых аппаратов (например, позволяющих совмещать в одном аппарате несколько технологических процессов);
- оптимизацию размеров и производительности
- герметизацию;
- использование новых конструкционных материалов, позволяющих увеличить долговечность аппаратов, уменьшить их вес и т.д.

В области *сырья, материалов, энергоресурсов* необходимы:

- обоснованность их качества (в частности, использование сырья и материалов, например технической воды, не более высокого, а строго определенного качества);
- предварительная подготовка сырья и топлива (извлечение из него наиболее токсичных компонентов, например, серы из топлива и т.п.);
- замена высокотоксичных материалов, например ртути, кадмия, свинца и т.д., на менее токсичные вещества при производстве красителей, катализаторов, батареек и других изделий и материалов;
- возможность замены сырья и энергоресурсов на нетрадиционные, местные, попутно добываемые и т.д.

Готовая продукция, включая побочную и попутно образующуюся, должна отвечать:

- безопасности;
- длительности использования;

- обеспечению возможности и условий для возвращения продукции в производственный цикл после физического и морального износа. Так, германская компания Volkswagen стала первой, взявшей на себя обязательство принимать обратно вышедшие из употребления автомобили для последующей их утилизации;
- биоразлагаемости при попадании в окружающую природную среду, например биоразлагаемые пакеты;
- удобству использования, починки, разборки и т.д.

Переход на ресурсосберегающий и малоотходный способ производства — это одно из стратегических направлений в решении вопросов предотвращения загрязнения окружающей среды. Несомненно, что еще длительное время будут функционировать производственные мощности, построенные в свое время без учета экологических последствий. Поэтому переработка и ликвидация отходов как самостоятельное технологическое направление тесно смыкается с организацией мало- и безотходных производств. Важно уточнить, что главное в безотходном производстве не переработка отходов, а такая организация процесса, в котором при переработке сырья использовались бы все его компоненты. Необходимо устранить не следствие, а причину образования отходов. При этом, недоиспользованные компоненты должны быть сведены к минимуму (малоотходное) или вообще исключены (безотходное производство). Таким образом, Переработка отходов потребления является обязательной частью последнего производства. Нормальное функционирование таких мощностей немыслимо, сегодня без привязки к ним соответствующих очистных сооружений, что, в свою очередь, немыслимо без разработки эффективных технологий очистки промышленных сточных вод и газовых выбросов в атмосферу. Попытка создания эффективных методов очистки сточных вод и газовых выбросов в атмосферу — непростая задача и по своей сложности не уступает созданию малоотходных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Report of the Seminar. Senior Advisers to ECE Governments on Environmental Problems. ENV/Sem. 15/2/ November. 1984.
2. Report of the Workshop on Country-Specific Activities to Promote Cleaner Production. Industry and Environment Program Activity. Center UNEP, Paris, France. 17 – 19 September, 1991.
3. *Богдановский Г.А.* Химическая экология. – М.: Изд-во МГУ, 1994.
4. *Зайцев В.А.* Промышленная экология. Учебное пособие. – М.: ДеЛи, 1999,. – 140 с.
5. *Калыгин В.Г.* Промышленная экология. Курс лекций. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – 240 с.
6. *Калыгин В.Г., Попов Ю.П.* Порошковые технологии – экологическая безопасность и ресурсосбережение. – М.: Изд-во МГАХМ, 1966. – 212 с.
7. *Р.А. Степень, С.М. Репях.* Промышленная экология: учебник для студентов химико-технологических специальностей. – Красноярск: СибГГУ, 2000. – 345 с.
8. *Химия и жизнь.* 1980, №4. С.25.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

д.х.н., проф. МГУ, Лисичкин Г.В.

(В кн. Материалы конференции «Основы экологической безопасности» /Под ред. Г.А. Богдановского, Н.А. Галактионовой. «Научные труды МНЭПУ». Вып. 4. Серия: «Реймерсовские чтения». – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – с.37 – 44.

Загрязнение природной среды при производстве электрической энергии в массовом сознании связано в первую очередь с работой ядерных электростанций, а также с использованием в качестве энергоносителей твердых горючих ископаемых. Для лиц, отягощенных хотя бы элементарным естественно-научным образованием, ясно, что и такие энергоносители, как нефть и природный газ создают весьма существенную нагрузку на среду обитания. Однако наш опыт показывает, что даже многие специалисты-экологи убеждены в абсолютной безопасности для природы альтернативных (возобновляемых) источников энергии.

Настоящая статья посвящена краткому анализу экологических проблем, возникающих при крупномасштабном производстве электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии.

Прежде чем рассматривать альтернативные источники энергии, примем к сведению очень важное обстоятельство: нас интересует возможность использования этих источников в больших масштабах, мы пытаемся оценить перспективы замены традиционных энергоносителей – в первую очередь нефти – в связи с их грядущим исчерпанием. Если в наши дни суммарная доля альтернативных энергоносителей в мировом производстве энергии не достигает и одного процента, то в предвидимом будущем можно ожидать ситуации, когда примерно четверть всей вырабатываемой электроэнергии будет получаться за счет возобновляемых источников. Таким образом, нас интересуют экологические последствия использования энергии Солнца, ветра, тепла Земли и т.п. не в условиях испытания единичных установок и опытно-промышленных разработок, а последствия применения таких энергоносителей, когда их доля в энергетическом балансе крупных государств достигнет десятков процентов.

Гидроэнергия

Рассматривая возобновляемые источники энергии, следует начать с гидроэнергетики, которая уже более века не является альтернативным источником электроэнергии.

Известно, что использование энергии рек во многих странах, в том числе и в России, достигло впечатляющего уровня, но рост доли гидроэнергии в развитых странах сильно замедлился. Существенно, что его сдерживают не столько дороговизна ГЭС, сколько неблагоприятные экологические последствия. Крупные гидростанции, построенные на равнинных реках, привели к возникновению громадных мелководных водохранилищ. Оказались затопленными огромные пространства сельскохозяйственных угодий, сенокосных лугов. Сильно замедлилось течение воды, она прогрелась и зацвела. Почти прекратилась миграция проходных рыб. Все эти печальные последствия можно видеть на примере Волги, энергетические ресурсы которой практически исчерпаны, а река стала цепью слабопроточных водохранилищ.

Не многим лучше обстоит дело с возведением ГЭС в горах. Там площадь водохранилищ меньше, но непредсказуемо воздействие большой массы воды на тектонику прилегающих горных массивов. Кроме того, в горной местности весьма активно идут процессы заиливания водохранилищ.

Итак уже на примере гидроэнергетики ясно, что сама по себе «возобновляемость» энергоносителя отнюдь не является гарантией его экологической чистоты.

Энергия ветра

Понятно, что одна ветроустановка безобидна. Но как только мы захотим с помощью энергии ветра выработать, скажем, 20% необходимой нашей стране электроэнергии (это примерно 200 млрд. кВт ч), окажется, что для строительства ветроэлектростанций потребуются весьма значительные площади земли; для изготовления десятков тысяч ветряных колес (диаметр примерно 100 м) и башен для них придется резко увеличить производство алюминия или стеклопластика, а это весьма грязные производства; при мощности одной установки 250 кВт возникает шум силой 50-80 децибел; ветряные колеса генерируют опасные инфразвуковые колебания.

Но главная неприятность, по-видимому, состоит в том, что из-за крупномасштабного использования энергии ветра он будет рассеиваться, изменится роза ветров и, следовательно, нарушится климатическое равновесие, перенос влаги и тепла не только в районе, где построена ветроэлектростанция, но и далеко за его пределами.

Интересно, что соображения об экологической опасности утилизации ветроэнергии уже нельзя считать чисто умозрительными. Власти Дании, где уже 5,5 % от всего потребления электроэнергии поставляют ветроэлектростанции, поставили задачу удвоить эту долю. Однако они натолкнулись на мощное сопротивление общественности и

«зеленых». Дело в том, что из-за дефицита свободной территории строительство пятисот ветроустановок (пять групп по сто штук в каждой) планируется на морском мелководье. В этом случае ликвидируются места традиционного обитания птиц, создается невыносимый шум и возникают помехи в распространении радиоволн, интенсивно мешающие работе телевизионных станций.

Солнечная энергия

Различные схемы преобразования солнечной энергии в электрическую также сопряжены со значительным воздействием вредных факторов на природу. (Речь по-прежнему идет о широкомасштабном производстве энергии, о значительном вкладе солнечной энергии в энергетический баланс планеты.).

Для строительства солнечных станций потребуется отчуждение огромных площадей, не менее чем на 3 порядка больших, нежели для тепловых электростанций той же мощности. Но проблема заключается еще и в том, что любой способ преобразования солнечной энергии отличается высокой материалоемкостью, причем для изготовления оборудования требуется либо уже упомянутый экологически опасный в производстве алюминий (башни, баки, конструкции отражателей), либо еще более опасный кремний (материал для солнечных батарей). Напомним, что технология производства высокочистого кремния включает стадии его восстановления магнием из кремнезема и дальнейший синтез через трихлорсилан. Этот и иные способы получения кремния «солнечной» чистоты при крупнотоннажном производстве серьезно загрязнят окружающую среду, прежде всего – атмосферу.

Наконец, главная экологическая опасность состоит в том, что при отборе солнечного тепла будет происходить похолодание, пропорциональное количеству преобразованной солнечной энергии. Этим эффектом вполне можно пренебречь при строительстве маломощных домашних устройств, но не при проектировании крупных солнечных станций, которые должны вносить заметный вклад в энергетический баланс страны и занимать сотни квадратных километров. Как отметил академик П.Л.Капица, применение фотопреобразователей с высоким КПД (лишь такие выгодны экономически) может привести к понижению температуры, из-за которого начнется конденсация водяного пара в атмосфере и соответственно прекратят работу фотоприемники. Если ограничить КПД пятнадцатью процентами (уровень лучших современных преобразователей), то туман не будет появляться, но тогда под солнечные станции придется отчуждать еще более

гигантские территории. Можно думать, что климат на этих территориях станет прохладнее.

Тепло Земли

Не меньшие, а возможно, и большие трудности экологического характера возникают при проектировании крупных геотермальных электростанций. Работа ГеоТЭС сопряжена с необходимостью сбрасывать горячую и более или менее минерализованную воду. Сброс такой воды чреват значительной опасностью для гидробионтов. Из-за повышения температуры уменьшается концентрация растворенного в воде кислорода – его уже недостаточно для многих рыб (форель, например, живет только в холодной воде), а минеральные примеси угнетают водные организмы. Отбор из скважин пароводяной смеси во многих случаях сопровождается выбросами токсичных газов; расширяющийся при выходе на поверхность пар вызывает сильный шум.

Из перечисленных факторов наиболее неприятна необходимость сбрасывать горячую минерализованную воду. Закон о недрах запрещает сброс такой воды в реки и рекомендует закачивать ее через специально пробуренные скважины обратно в земные недра. Но последствия этого приема при крупномасштабном производстве энергии прогнозировать очень трудно. Микроземлетрясения при закачивании воды уже зафиксированы.

Влияние ГеоТЭС на природу легко наблюдать на примере Паужетской станции на Южной Камчатке: в радиусе двух-трех километров от станции торчат голые, без коры и листьев, стволы каменной камчатской березы, далеко слышен неумолчный рев выходящего на поверхность пара. При этом мощность станции всего 11 мВт. Для сравнения отметим, что мощность главных турбин атомного ледокола «Арктика» – 55 мВт.

Панорама строительства и атмосферный воздух в районе Мутновской ГеоТЭС (70 км от Петропавловска-Камчатского) также оставляют довольно тяжелое впечатление.

Энергия морских приливов

Использование энергии морских приливов также вызывает неблагоприятные экологические последствия: крупная приливная гидроэлектростанция представляет собой гигантскую плотину, затрудняющую водообмен между морем и морским заливом или устьем реки. Плотина препятствует естественной миграции гидробионтов, нарушает

установившиеся за миллионы лет связи. Это, конечно, неприятно, но не катастрофично. Однако есть и более серьезные опасения: нетрудно рассчитать, что строительство группы приливно-отливных электростанций большой мощности (сотни гигаватт) – а именно такие нужны для компенсации дефицита горючих ископаемых – на доли секунды замедлит вращение Земли. Последствия этого трудно даже предположить.

Водородная энергетика

До сих пор мы рассматривали так называемые первичные энергоносители, но есть еще и вторичные, важнейший из которых водород. Идея его использования проста: направим первичную энергию на производство водорода из воды, а дальше будем использовать водород как экологически чистое топливо – при его окислении образуется только вода.

Сам по себе водород действительно относительно чист в экологическом плане. Надо лишь учесть, что при его горении на воздухе развиваются температуры, достаточные для окисления азота. Поэтому помимо воды среди продуктов горения будет некоторое количество оксидов азота.

Основные проблемы возникают при получении водорода. Добыча водорода из его природных соединений в соответствии с законом сохранения энергии требует столько же энергии (в реальных условиях несколько больше), сколько мы получим при окислении водорода. Следовательно мы должны затратить эквивалентное количество первичной энергии, которая, как мы убедились, не может быть экологически чистой. Значит, мы попросту переносим загрязнения из одного региона (где водород потребляют) в другой (где его получают).

Низкая плотность, взрывоопасность, высокая диффузионная подвижность водорода (под давлением и при нагревании он способен просачиваться через металл) требуют для работы с ним новых материалов и технологий, которые вряд ли будут экологически чистыми. Пока трудно даже представить себе весь комплекс природоохранных проблем, которые возникнут при производстве специальных сплавов для трубопроводов, при строительстве и последующей эксплуатации водородопровода длиной 2000 км.

Еще одна сложная проблема – это экологический аспект аккумуляирования водорода. Понятно, что расход водорода как и любого другого энергоносителя будет неравномерным. Следовательно необходимо заранее проектировать устройства для аккумуляирования водорода. На сегодняшний день лучшими экономическими и техническими характеристиками обладают интерметаллические аккумуляторы, представляющие собой трехкомпонентные сплавы на основе редкоземельных элементов.

Емкость их по водороду составляет 2 %-масс. Ясно, что крупномасштабное применение водорода приведет к многократному увеличению производства редкоземельных металлов, что отнюдь не безопасно с позиций охраны среды обитания.

Аналогичным образом можно рассмотреть любые другие альтернативные источники энергии, существующие или только намечаемые: управляемый термоядерный синтез, энергия растительной биомассы, энергия малых рек, энергия низкопотенциального тепла и т.д. и т.п. Энергетика, основанная на любых источниках, независимо от того возобновляемые они или нет, не может быть экологически чистой, если масштаб производства энергии велик. Разумеется, экологическая опасность разных видов энергоносителей различна, но она есть всегда. Экологически чистой энергии не бывает.

Правило шлейфа

Для оценки экологического ущерба, наносимого конкретным видом энергетики, совершенно недостаточно учитывать только чистоту энергоносителя. Необходимо брать в расчет воздействие на среду сооружений, машин и устройств для отбора и передачи энергии, а также технологий производства соответствующих материалов и аппаратуры. Широкое использование любого нового вида энергии требует создания новой подотрасли промышленности, включающей добычу сырья и его переработку, изготовление оборудования, утилизацию морально или физически устаревшего оборудования. Ясно, что новая подотрасль станет дополнительным источником загрязнения среды. Получается, что использование нового, пусть даже почти чистого энергоносителя влечет за собой шлейф заведомо нечистых технологий.

Электроэнергия на автомобильном транспорте

С электромобилями связан один чрезвычайно живучий миф: «Переход автомобильного транспорта на электрическую тягу обеспечит чистоту атмосферы». В действительности если значительную часть автомобилей с двигателями внутреннего сгорания заменить на электромобили с аккумуляторами (а это единственный на сегодня реальный вариант автомобильных источников энергии), произойдет экологическая катастрофа. При массовой эксплуатации таких электромобилей выбросы двигателей будут заменены слегка уменьшенными выбросами на электростанциях: ведь аккумуляторы надо

постоянно заряжать, значит, надо пропорционально увеличить мощность электростанций, т.е. имеет место перенос экологических проблем из одного региона в другой.

Но главное – аккумуляторы. Кислотные свинцовые или щелочные никель-кадмиевые источники тока – а нам понадобится производить дополнительно сотни миллионов аккумуляторов – потребуют резко увеличить производство этих токсичных металлов. Придется налаживать и систему утилизации. Учитывая, что каждый двадцатый российский шофер (это в лучшем случае) будет выбрасывать старые аккумуляторы в придорожную канаву, нетрудно представить и даже довольно точно оценить масштабы экологического бедствия, которое обрушится на наши головы. Следовательно, в качестве источника электроэнергии нужны какие-то другие, не производимые сегодня, автомобильные источники тока, например топливные элементы или фотопреобразователи. Но здесь вступает в силу правило шлейфа.

Заключение

Подводя итог проведенному в статье анализу, необходимо сделать несколько важных выводов.

1. Современная промышленная цивилизация неминуемо влечет за собой загрязнение среды обитания. Обеспечение растущего населения Земли энергией потребует увеличение ее производства в течение трех-четырёх ближайших десятилетий примерно вдвое. С учетом невозможности создания полностью безотходной промышленности, интенсивного сельского хозяйства, энергетики, транспорта, быта, следует решать проблему минимизации загрязнений, понимая, что создать «чистую» цивилизацию в обозримый период времени не удастся.
2. Для реализации полностью безотходной цивилизации необходимо связать воедино все производственные процессы на Земле, замкнуть их в одну гигантскую материально-энергетическую систему. Решение этой задачи принципиально возможно, но оно окажется под силу только нашим далеким потомкам.
3. Широкое использование возобновляемых источников энергии в будущем неизбежно, экологическая опасность каждого из них индивидуальна, необходима постановка научных исследований, направленных на изучение влияния нетрадиционных энергоносителей на среду обитания.
4. Наиболее вероятно, что основным энергоносителем следующего столетия станет природный газ, наступит так называемая газовая пауза, которая может продлиться очень долго, если учесть, что запасы метана в виде газовых гидратов как минимум в 10

раз превышают запасы всех вместе взятых горючих ископаемых на нашей планете. За период газовой паузы будет создан глобальный энергетический комплекс, отвечающий требованиям экологии и экономики, включающий возобновляемые энергоресурсы и управляемый термоядерный синтез.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лисичкин Г.В.* Химия и жизнь, 1999, №2, с.22.
2. Новая энергетическая политика России. М., Энергоатомиздат, 1995, 512 с.
3. *Дядин Ю.А., Гуцин А.Л.* Соросовский образовательный журнал. 1998, №3, с.55.
4. *Путвинский С.В.* Усп. физ. наук. 1998, т.168, №11, с.1235.

(Из второй части учебного пособия «Промышленная экология», готовящегося к.т.н., доц. Галактионовой Н.А.)

БИОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

Сточные воды (СВ) представляют собой сложные гетерогенные системы загрязняющих веществ, которые могут находиться в растворенном, коллоидном и грубодисперсном (оседающем под действием силы тяжести) состояниях. СВ условно подразделяются на хозяйственно-бытовые, промышленные и ливневые (дождевые) [2], отличающихся друг от друга происхождением, составом и биологической активностью.

На рис. 2.1 приведена принципиальная схема очистки городских сточных вод [1], которая поясняет происхождение каждой из категорий СВ и помогает осознать роль и место биохимических процессов очистки в ней.

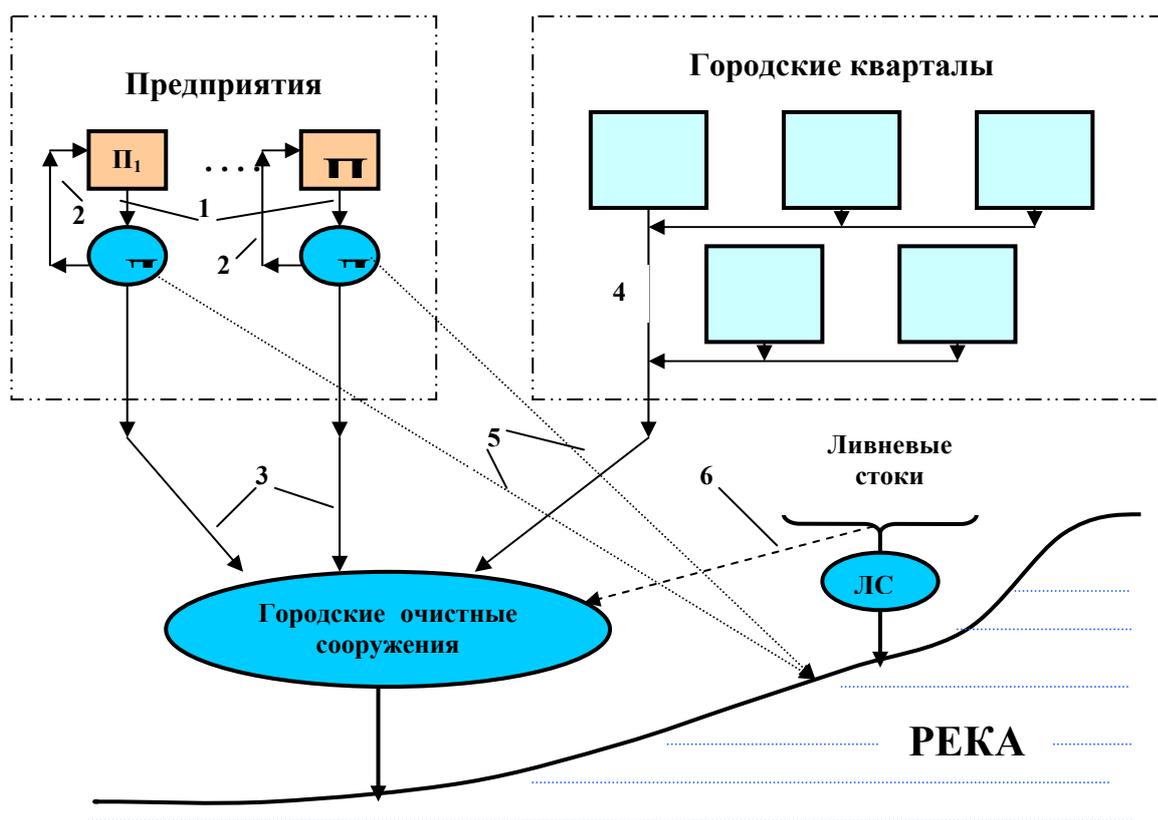


Рис. 2.1. Принципиальная схема очистки городских сточных вод.

Обозначения: Л – локальные очистные сооружения; ЛС – городские сооружения для очистки ливневых стоков; 1 – сточные воды промышленного предприятия; 2 – очищенные сточные воды для повторного использования; 3 – сточные воды промышленного предприятия после локальной очистки; 4 – хозяйственно-бытовые сточные воды; 5 – сточные воды промышленного предприятия после локальной очистки с биологической доочисткой; 6 – ливневые сточные воды.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ СТОЧНЫЕ ВОДЫ

Сточные воды любого промышленного предприятия (потоки 1 на рис. 2.1) содержат специфические загрязнения, которые должны удаляться (нейтрализоваться) до смешения со стоками другого производства или населенного пункта системами обязательной локальной очистки.

Для очистки промышленных СВ используются механические, физико-химические, химические биохимические и термические методы [3].

В основе биохимических методов очистки сточных вод лежит способность микроорганизмов разрушать органические и некоторые неорганические соединения (сульфиды, серу, соли аммония и др.), превращая их в безвредные продукты окисления: воду, двуокись углерода, нитрат- и сульфат- ионы и др. Очищенные биохимическим способом сточные воды отвечают санитарно-гигиеническим требованиям и рыбохозяйственным нормативам, и их можно пускать в водоемы (потоки 5 на рис. 2.1), а также использовать в оборотном водоснабжении (потоки 2 на рис. 2.1). Целесообразна биохимическая очистка производственных СВ совместно с хозяйственно бытовыми водами, так как последние приносят азотистые вещества, необходимые для питания и размножения микроорганизмов (потоки 3 на рис. 1).

Методы биохимической очистки сточных вод наиболее опасных с экологической точки зрения химических предприятий подробно изложены в монографии Н.Г. Ковалевой и В.Г. Ковалева [4]. Следует обратить внимание на успешные попытки биологической очистки хромсодержащих сточных вод [5], вод, содержащих хлорированные углеводороды [6] и др.

Биохимическая очистка является завершающей стадией очистки сточных вод химических и нефтехимических предприятий.

Микроорганизмы – деструкторы нефти известны давно и выделены из различных сред: пресных и морских вод, донных загрязнений, пластовых вод нефтяных месторождений, загрязненных нефтью почв и других. При благоприятных условиях среды (оптимальная температура, соленость, рН, достаточная степень аэрации, обеспеченность элементами минерального питания) удачно подобранная культура или смесь штаммов способны за короткое время практически полностью обезвредить десятки тонн нефтяных углеводородов (в качестве источника углерода и энергии), трансформировав их, в частности, в органическое вещество собственной биомассы, углекислый газ и безвредные для окружающей среды продукты.

В монографии Минигазимова Н.С. и др. «Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов» [7] отмечается, что после максимального извлечения

полезных компонентов из нефтесодержащих отходов, оставшийся донный шлам и загрязненные участки грунта должны подвергаться обезвреживанию, завершающей стадией которого является биологическая обработка, позволяющая снизить содержание нефти до фоновых значений. В США метод биологической обработки нефтесодержащих осадков (*ландфарминг*) применяется уже с пятидесятих годов [7].

Недостатком биохимической очистки является малая скорость окислительных процессов, вследствие чего необходимы очистные сооружения больших объемов.

ЛИВНЕВЫЕ СТОЧНЫЕ ВОДЫ

Ливневые (дождевые) сточные воды, так же как и промышленные СВ, характеризуются большим количеством примесей. Качество и состав поверхностного стока зависит от множества факторов, в том числе, общей санитарной обстановки территории населенных мест, видов и характеристики промышленных предприятий, режима таяния снега и т.д. [1]. В связи с этим невозможно привести усредненные показатели качества поверхностного стока в целом. Как правило, ливневые сточные воды попадают на общегородские очистные сооружения вместе с городскими водами (поток б на рис. 2.1).

ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫЕ СТОЧНЫЕ ВОДЫ

Хозяйственно-бытовые СВ образуются в результате практической деятельности и жизнедеятельности людей и характеризуются присутствием загрязнителей минерального и органического происхождения. В настоящее время бытовые сточные воды в чистом виде практически не встречаются, за исключением небольших населенных пунктов или отдельных объектов (санатории, дома отдыха и т.д.).

В городских сточных водах (смеси бытовых и промышленных) содержатся минеральные (глина, песок, окалина, сажа, сульфаты, хлориды, соли тяжелых металлов и т.д.) и органические (белковые вещества, углеводы, жиры, масла, нефтепродукты, синтетические ПАВ и т.д.) загрязнения. Большая часть органических загрязнений городских сточных вод находится в грубодисперсном (15-20%) и коллоидном (50-60%) состоянии [3].

Хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод района (города), главенствующая роль в которых принадлежит сооружениям биологической очистки. В результате процессов биологической очистки СВ может быть очищена от многих органических и некоторых неорганических примесей. Процесс очистки осуществляет сложное сообщество микроорганизмов: бактерий, простейших, ряда высших организмов. Загрязняющие вещества сточных вод являются для них источником питания, при использовании которого они получают все необходимое им для жизни – энергию и

материал для конструктивного обмена. Изымая из СВ питательные вещества (загрязнения), микроорганизмы очищают от них сточную воду и одновременно вносят в нее новые вещества – продукты обмена, выделяемые во внешнюю среду.

Для очистки сточных вод используются два типа биологических процессов: 1) *аэробные*, в которых в присутствии кислорода происходит окисление содержащегося в органическом загрязняющем веществе углерода до CO_2 и H_2O ; 2) *анаэробные*, к которым микроорганизмы не имеют доступа к кислороду. В первом случае углерод органических соединений является конструктивным и энергетическим субстратом, а акцептором электронов служит кислород. Во втором случае микроорганизмы могут использовать углерод, входящий в состав органических молекул, не только в качестве конструктивного и энергетического субстрата, но и в качестве акцептора электронов

В настоящее время чаще используют аэробные процессы, так как они признаны более надежными, стабильными и более изучены. Однако анаэробные процессы имеют ряд преимуществ:

- образуют в 10 раз меньше ила, чем аэробные процессы, а стоимость переработки ила весьма велика из-за его высокой влажности (90-99,7%) [11];
- образуют метан, который можно использовать в качестве источника энергии;
- даже если не учитывать энергию от получаемого метана, то все равно затраты энергии, необходимые на аэрацию в аэробных процессах, значительно превышают затраты энергии на перемешивание в анаэробных процессах.

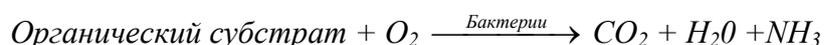
Анаэробные процессы в основном используются для сбраживания избыточного ила, образующегося при аэробной очистке. Главным недостатком анаэробных процессов является их меньшая скорость по сравнению с аэробными, что требует установок больших размеров.

АЭРОБНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

Аэробный процесс очистки сточных вод происходит в присутствии растворенного в воде кислорода и представляет собой модификацию протекающего в природе естественного процесса самоочищения водоемов [12].

В процессах аэробной биологической очистки СВ используются микроорганизмы так называемого *активного ила*, в состав которого входят [11]:

- углеродоокисляющие флокулообразующие бактерии;
- углеродоокисляющие нитчатые бактерии;



- бактерии нитрификаторы:



(аммонийный азот)

(нитраты)

– простейшие (в основном инфузории), потребляющие бактерии, обеспечивая тем самым низкую мутность выходных стоков.

Применительно к илу термин «активный» означает, что биомасса: 1) содержит все ферментные системы, необходимые для деградации загрязняющих веществ; 2) имеет поверхность с сильной адсорбционной способностью; 3) способна образовывать стабильные *флокулы* (хлопьевидные скопления), которые осаждаются при отстаивании. Последнее очень важно, так как структура и биологические свойства хлопьев ила определяют эффективность и качество биологической очистки. При нормально идущих процессах очистки масса активного ила представлена хлопьями с плотностью в среднем 1,1-1,37 г/см³ и размером от 53 до 212 мкм. Основная масса бактериальных клеток расположена внутри. Бактерии активного ила синтезируют и выделяют в среду внеклеточный биополимер – полисахаридный гель. Именно наличие геля обуславливает агрегацию микроорганизмов и образование хлопьевидных скоплений – *флокул*. Активный ил только в флокулированном состоянии может обеспечивать высокие скорости окисления загрязняющих веществ, и, по-существу, качество очищенной воды определяется его способностью к флокуляции.

Аэробное окисление характеризуется БПК (биологическим потреблением кислорода), т.е. расходом O₂ на окисление органических веществ до CO₂ и H₂O. Характеристикой глубины разложения примесей в водостоке является биохимический показатель (БХП), равный отношению БПК/ХПК (ХПК – химическое потребление кислорода, т.е. количество кислорода, необходимое для химического окисления содержащихся в СВ восстановителей, органических и неорганических [12].

Сырье для биологической очистки представляет собой стоки, отфильтрованные от крупных частиц и песка и подвергнутые отстаиванию, при котором удаляется ~ 60% взвешенных частиц (вместе с ~ 30% органического вещества) [11].

Процесс очистки состоит из двух стадий (рис. 2.2):

1. Взаимодействие стоков с воздухом и частицами активного ила (ВЧИС) в аэротенке. Время пребывания (τ) составляет 4-24 часа и более в зависимости от вида СВ и требуемой степени очистки.
2. Отделение очищенной жидкости от ВЧИС в отстойнике.

К основным факторам, влияющим на биологическую очистку, относятся: температура, pH, концентрация кислорода, перемешивание, токсичные примеси, доза и

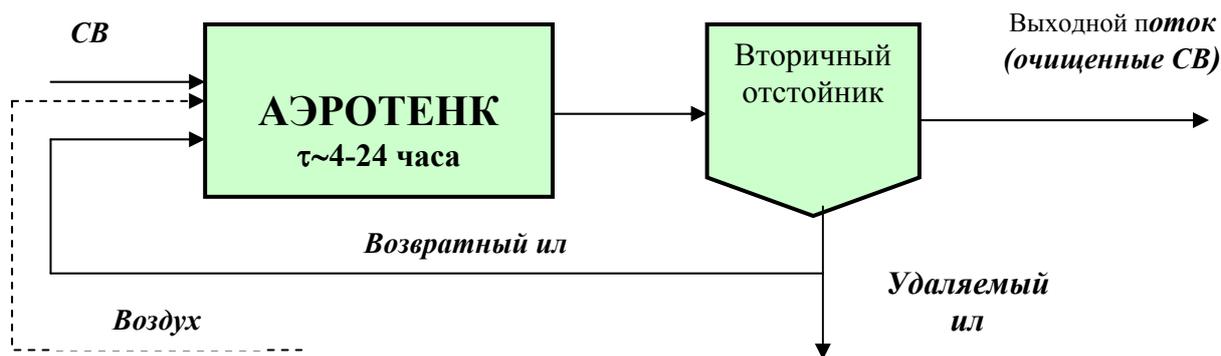


Рис. 2.2. Принципиальная схема биологической очистки СВ
возраст активного ила. Токсичными примесями (выше пределов ПДК) являются антисептики, в частности фенол и формальдегид. Особенно токсичны также соли тяжелых металлов, которые по степени токсичности располагаются в ряд [12]:



АНАЭРОБНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

Анаэробные процессы появились в Европе примерно 100 лет назад. Аппараты, в которых проводятся анаэробные процессы, называются *септенками* в иностранной литературе, или *метантенками* в отечественной. Как уже отмечалось, анаэробные процессы в основном используются для сбраживания избыточного ила, образующегося при аэробной очистке, уменьшения его массы и количества патогенных микроорганизмов (температура ~ 35 °С, $\tau > 20$ суток).

Для анаэробной очистки сточных вод обычно используются системы, работающие в мезофильных условиях (температура $\sim 34-38$ °С). Очистка в анаэробных условиях (без доступа воздуха) происходит под действием анаэробных микроорганизмов, результате чего количество органических загрязнителей, содержащихся в сточной воде, уменьшается за счет превращения их в газы (метан, двуокись углерода) и растворенные соли, а также за счет роста биомассы анаэробных бактерий. Процесс проходит в 2 стадии, как показано на рисунке 2.3 [11].



Рис. 2.3. Основные стадии анаэробной очистки СВ (1 – кислотообразующие бактерии; 2 – метанообразующие бактерии)

На первой стадии обычно образуются летучие жирные кислоты (CH_3COOH , HCOOH и др.) и спирты. Процесс в целом зависит от поддержания окружающей среды, благоприятной для обеих групп микроорганизмов (кислотообразующих и метанообразующих). Следовательно равновесие должно быть таким, чтобы кислоты удалялись бы с той же скоростью, с которой они образуются.

На рисунке 4 приведена типичная схема сбраживателя с мешалкой.

Стоки, очищаемые биологическими методами, должны отвечать *следующим требованиям* [3]:

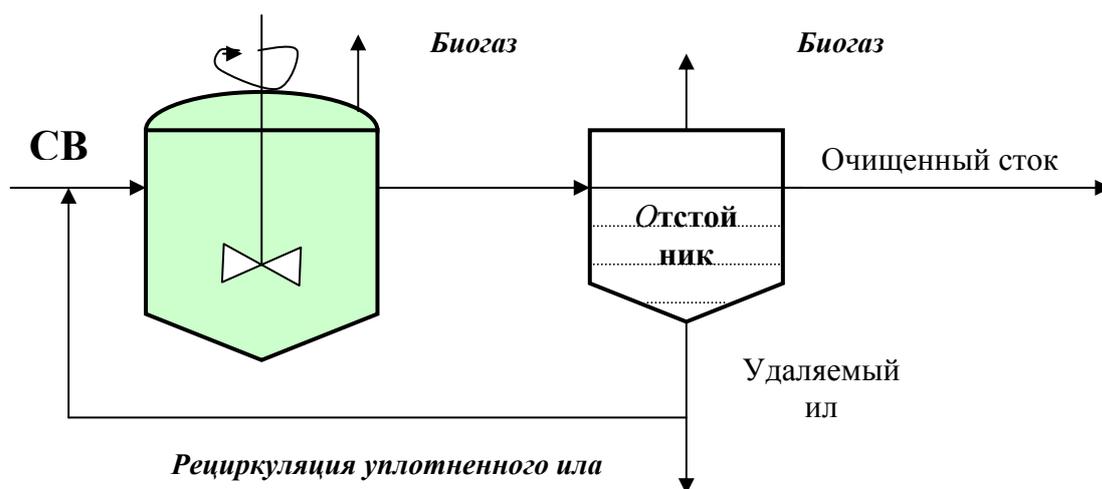


Рис. 2.4. Типичная схема сбраживателя с мешалкой.

1. Органические вещества, входящие в стоки, должны быть способны к биохимическому окислению.
2. Их концентрация, выраженная через БПК, не должна превышать 500 мг/дм^3 при очистке на биофильтрах и 1000 мг/дм^3 – при очистке в аэротенках-смесителях.
3. Концентрации 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 должен быть 6,5-8,5.
6. Сточные воды должны содержать биогенные элементы (азот, фосфор и калий).
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 $50-60 \text{ }^\circ\text{C}$.

На основе биохимических методов достигается достаточно глубокая степень очистки, а сами методы являются наиболее экономичным. Вместе с тем, как указывалось

выше, биохимические методы имеют и определенные недостатки. Прежде всего, биологические очистные сооружения занимают очень большие территории. Типовая станция биологической очистки производительностью 10 тыс. м³/сут, например, занимает 75000 м² [3]. Кроме того, большой прирост биомассы создает дополнительные проблемы, связанные с утилизацией осадка. Процесс очистки малоуправляем, а сами биологические очистные сооружения не могут работать с перегрузкой. Попадание высокотоксичных соединений резко уменьшает эффективность очистки и может привести к гибели микрофлоры, что равносильно прекращению процесса. В связи с этим промышленные сточные воды перед сливом в общегородскую канализацию подвергаются локальной очистке с помощью различных физико-химических методов. Такая очистка не только стабилизирует работу аэротенков, но и значительно уменьшает их объем [12].

КОМПСТИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Начало этих технологий было положено способами переработки избыточного активного ила, образующегося при аэробной очистке сточных вод на станциях биологической очистки. Методы метанового брожения с получением биогаза и удобрений, а также методы биокомпостиорования в аэробных условиях, используемых для переработки активного ила, были затем использованы для переработки навоза, окультуривания свалок и превращения их в установки по биопереработки отходов. Разрабатываются также методы биологической переработки полимерных материалов, таких как сельскохозяйственные пленки [8], биодеградациии нефтесодержащих осадков [7], биорегенерации резины отработанных шин с с получением каучука-регенерата [17]. Перечень перерабатываемых с помощью биотехнологий отходов растет, так как почти для каждого вещества можно подобрать микроб, для которого это вещество является субстратом. Исследование химического состава твердых отходов показывает, что фракция, подвергающаяся биодеградациии, увеличиваясь с течением времени, к настоящему моменту достигла приблизительно 70-80% [2] от общего количества твердых отходов.

Многие современные экологические проблемы возникают из-за локального накопления органических отходов, количество которых слишком велико для естественного потенциала биодеградациии. По возможности эти отходы утилизируют, но основную массу пытаются удалить наиболее дешевым способом, поскольку эти отходы считаются низкоактивными. В Великобритании, например [11], их вывозят на свалку, сжигают и закапывают в землю. Помимо этого все чаще используется *компостиорование*,

которое с одной стороны, позволяет получить ценный продукт, а с другой – является процессом очистки, делающим низкоактивные отходы менее «неприятными» для окружающей среды.

Компостирование – это экзотермический процесс биологического окисления, в котором органический субстрат подвергается аэробной биодegradации смешанной популяцией микроорганизмов в условиях повышенной температуры и влажности [11]. В процессе биодegradации органический субстрат претерпевает физические и химические превращения с образованием стабильного гумифицированного конечного продукта, представляющего определенную ценность для сельского хозяйства и как органическое удобрение, и как средство, улучшающее структуру почвы. Очень важно, что гумифицированные продукты быстро приходят в равновесие с экосистемой, в которую их внесли, и не вызывают серьезных нарушений в ней, как это бывает при внесении не переработанных отходов.

Отходы, поддающиеся компостированию, варьируют от городского мусора, представляющего собой смесь органических и неорганических компонентов, до гомогенных субстратов, таких как навоз, отходы растениеводства, сырой активный ил и нечистоты. В процессе компостирования органические вещества переходят в более стабильную форму (компост), выделяются углекислый газ и вода, возрастает температура.

Состав компоста варьируется в широких пределах и в основном отражает состав использованного органического сырья. Ниже перечислены компоненты готового компоста и указаны пределы их содержания (в % по сухой массе) [11]:

<i>Органические вещества</i>	<i>25,0 – 80,0</i>
<i>Углерод</i>	<i>8,0 – 50,0</i>
<i>Азот</i>	<i>0,4 – 3,5</i>
<i>Фосфор</i>	<i>0,1 – 1,6</i>
<i>Калий</i>	<i>0,4 – 1,6</i>
<i>Кальций (в виде СаО)</i>	<i>0,7 – 1,5</i>

Компост, сырьем для которого послужили городские отходы, содержит меньше органических веществ и основных питательных веществ для растений, чем компост, полученный из сельскохозяйственных отходов. Компост из городских отходов содержит также существенные количества микроэлементов. Ряд полевых испытаний показал, что эти металлы накапливаются в растениях, выросших на почве, удобренной таким компостом. Уровень тяжелых металлов в компосте следует контролировать, чтобы предупредить накопление токсичных веществ в почве.

Разложение органических отходов в процессе компостирования представляет собой динамический и сложный экологический процесс, в котором постоянно происходит изменение температуры и состава питательных веществ. В течении процесса заметно меняется численность и видовой состав микроорганизмов. Скорость получения конечного продукта зависит от нескольких взаимосвязанных параметров. К ним относятся источники питания, дисперсность частиц, влажность, прочность структуры, аэрация, перемешивание, и размер кучи (если используются компостные ряды).

Особое значение имеет кислород, потребность в котором может быть определена, если известны химический состав органического субстрата и степень его биодegradации в процессе компостирования. Например, окисление белкового материала может быть представлено следующим уравнением [11]:



Исходя из уравнения (2.1), 1,5 г кислорода необходимо для окисления 1 г окисляемого материала. Эта теоретическая потребность в кислороде будет колебаться от 1 г кислорода на грамм органического вещества высокоокисленных отходов, таких как целлюлоза, и до 4 г кислорода на г субстрата для насыщенных углеводов. На практике компостируемая масса представляет собой смесь различных субстратов с разной теоретической потребностью в кислороде и разной способностью к биодegradации, так что, как правило, может быть окислено только 40 % органического вещества.

Оптимальные значения важнейших параметров процесса компостирования приведены ниже:

<i>Отношение C/N в субстрате</i>	<i>От 25/1 до 30/1</i>
<i>Размер частиц</i>	<i>12,5 мм для систем с перемешиванием и принудительной аэрацией, 50 мм для компостных рядов при естественной аэрации.</i>
<i>Влажность</i>	<i>50 – 60 %</i>
<i>Свободный объем</i>	<i>Около 30 %</i>
<i>Аэрация</i>	<i>0,6 – 1,8 м³ воздуха на 1 кг летучей части твердых веществ или поддержания концентрации O₂ в пределах 10 – 18 %</i>
<i>Температура</i>	<i>55°С</i>
<i>Перемешивание</i>	<i>Без перемешивания, при периодическом в простых системах. Короткие периоды энергичного перемешивания в механ. системах.</i>
<i>Размеры куч</i>	<i>Любая длина, высота 1,5 м, ширина 2,5 м при естественной Аэрации.</i>

Для компостирования отходов полеводства, овощеводства и садоводства до сих пор применяются достаточно простые схемы – кучи и компостные ряды. Напротив, для переработки городских отбросов за последние 50 лет было предложено более 30 различных схем, способных перерабатывать более 500 т твердых отходов в день. Оборудование для подготовки сырья и обработки готового компоста одинаково для

большинства из этих установок. Но стадия биodeградации имеет различное аппаратное оформление и может проводиться в колодцах, отсеках, силосах, сбраживателях и барабанах.

Можно отметить следующие преимущества процесса компостирования:

1. Внесение компоста улучшает структуру почвы, и в определенной степени удобряет ее, так как при разрушении компоста выделяется азот, фосфор, калий, микроэлементы.
2. При внесении компоста не нарушается равновесие экосистем.
3. Смешение при компостировании низкоактивных отходов типа соломы с отходами жизнедеятельности животных и человека позволяет решать проблему гигиенического удаления последних.
4. При компостировании погибают патогенные микроорганизмы, сорняки и их семена.

ПЕРЕРАБОТКА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ НА СВАЛКАХ

Независимо от метода переработки отходов твердые остатки традиционно ликвидируются с помощью свалок. В настоящее время свалки расположены во множестве мест, и, несмотря на возрастающий объем отходов на душу населения, это положение сохраняется. На территории Москвы, например, находится до 90 свалок мусора, общей площадью 285,7 га. Из ежегодно образующихся в Москве 2,5 млн. т. ТБО, примерно 90% утилизируется на специальных полигонах Тимохово и Хметьево. Основная сложность связана с увеличением расстояния от свалки до источников отходов, что приводит к увеличению неуправляемого попадания отходов в окружающую среду из-за их просыпания при транспортировке. По данным за 1984 г. [11] так было просыпано 10,3; 17,5 и 35% от общего количества ликвидированных отходов во Франции, Греции и Ирландии соответственно.

По мере исчерпания невозобновляемых ресурсов больший упор делается на исследования в области повторного использования отходов. Однако ясно, что даже при современных технологиях простая ликвидация отходов на свалках как минимум на 65% дешевле любого другого способа их переработки, и в силу этого данный способ ликвидации отходов в настоящее время наиболее распространен. Более того, как стало ясно, что из отходов образуется в больших количествах ценный источник энергии – метан, основные усилия были направлены на извлечение этого газа и на соответствующее изменение свалок.

Для свалок характерно образование продуктов двух типов из разлагающихся твердых отходов: фильтрующиеся в почву воды и газы. Когда просачивание воды сквозь

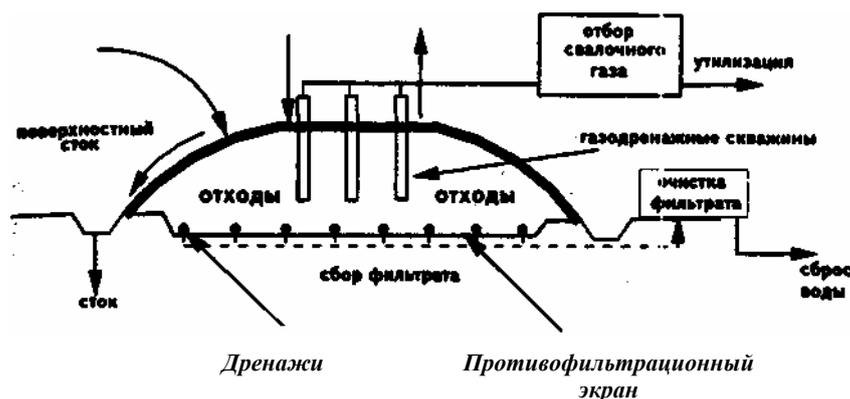
твердые отходы из-за осаждения и попадания грунтовых, поверхностных или образуемых микроорганизмами вод превосходит абсорбционную способность отходов, образуются фильтрующиеся в почву воды. Эти воды содержат растворимые соединения, органические и неорганические, вместе с микроорганизмами, такими как вирусы и бактерии. До сих пор не существует способа предсказания состава и концентрации фильтрующихся вод. Лучший способ борьбы с фильтрацией вод в почву – применение малопроницаемой засыпки (противофильтрационного экрана), системы дренажа для сбора фильтрата и др., т.е. оборудование свалок по специальной технологии. На Западе специально оборудованные свалки называют санитарными [2].

Санитарное захоронение отходов

Санитарное захоронение (контролируемое) отходов является альтернативой современной практикв сброса ТПБО на открытые свалки. Концепция метода нацелена на создание полигонов как экономически нейтральных производственных объектов. Она включает следующие основные принципы: максимальное использование рабочего объема полигона; контроль состава отходов, поступающих на захоронение; учет реальной массы, поступающей на захоронение; 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.

Полигон для захоронения отходов должен быть обустроен природоохранными техническими средствами, обеспечивающими перехват водных и газовых эмиссий, формируемых структурой отходов (рис. 2.3.). 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 не ниже $0,8 \text{ т/м}^3$ и реализацию высотной схемы складирования. Средние затраты захоронения отходов в 1978 г составляли 110-340 \$/т, химическая фиксация в твердое состояние увеличивает затраты примерно на 200 \$/т, фиксация отходов капсулированием – на 100 \$/т [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иваненко Л.В., Быкова П.Г.* Экологические проблемы города и утилизации отходов. – Самара: Кн. Изд-во, 1993, 126 с.
2. Экология, охрана природы, экологическая безопасность. Учебное пособие для системы профессиональной переподготовки и повышения квалификации госслужащих, руководителей и специалистов промышленных предприятий и организаций /Под ред. *А.Т. Никитина, С.А. Степанова.* – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – 648 с.
3. *Калыгин В.Г.* Промышленная экология. Курс лекций. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – 240 с.
4. *Ковалева Н.Г., Ковалев В.Г.* Биохимическая очистка сточных вод предприятий химической промышленности. – М.: Химия, 1987. – 160 с.
5. *Квасников Е.И. и др.* Биологическая очистка хромсодержащих сточных вод. – Киев: Наукова думка, 1990. – 194 с.
6. *Акентьева Н.П., Додонов М.В.* Биодеграция хлорированных углеводов метанооксиляющими бактериями //Прикладная биохимия и микробиология. – 1998. – 34, №2, с.153-156.
7. *Минигазимов Н.С. и др.* Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов. – Уфа: Экология, 1999. – 299 с.

8. *Бирюков В.В.* Роль биохимических технологий в задачах экологии // Материалы конференции «Химические основы экологической безопасности». – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. С.45-51.
9. *Гусев М.В., Минеева Л.А.* Микробиология: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 376 с.
10. *Шлегель Г.* Общая микробиология. – М.: Мир, 1987. – 567 с.
11. Экологическая биотехнология /Ред. *К.Ф. Форстера*. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
12. *Каравайко Г.И., Кузнецов С.И., Голомзик А.И.* Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд и концентратов. – М.: Наука, 1972. – 248 с.
13. *Рыбальский Н.Г., Лях С.П.* Экобиотический потенциал консорциумов микроорганизмов. – М.: ВНИИПИ, 1990. – 177 с.
14. *Кузнецов С.И., Иванов М.В., Ляликова Н.Н.* Введение в геологическую микробиологию. – М.: Изд-во АН СССР. – 239 с.
15. *Полькин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В.* Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
16. *Рыбальский Н.Г., Лях С.П.* Биотехнологический потенциал консорциумов микроорганизмов в народном хозяйстве. – М.: ВНИИПИ, 1990. – 200 с.