

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет

Общая химическая технология
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

ЧАСТЬ 6

Сумы
Издательство СумГУ
2010

ВВЕДЕНИЕ

Химическая технология изучает закономерности производственных химико-технологических процессов получения различных по своей природе и назначению продуктов. Независимо от конкретного вида производимой продукции и типа процесса ее получения, любое производство включает несколько обязательных элементов: сырье, то есть объект превращения, энергию, то есть средство воздействия на объект и аппаратуру, в которой это превращение осуществляется. Особое место в химическом производстве занимает вода. Она не только служит средой, в которой протекают многие химические превращения, но широко используется в химико-технологических процессах как растворитель, теплоноситель и хладагент, транспортное средство, а также для других разнообразных физических операций. Поэтому вполне правомочно считать воду четвертым обязательным элементом химического производства.

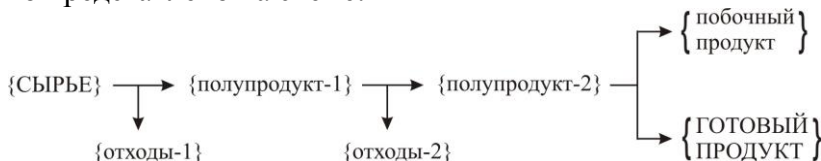
ГЛАВА IX ХИМИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ

9.1 Определение, классификация и требования к химическому сырью

Сырьем называются природные материалы, используемые в производстве промышленной продукции. Сырье – это основной элемент производства, от которого в значительной степени зависят экономичность производства, выбор технологии и аппаратуры и качество производимой продукции.

В химическом производстве на различных стадиях переработки можно выделить следующие материальные

объекты: исходные вещества или собственно сырье, промежуточные продукты (полупродукты), побочные продукты, конечный целевой (готовый) продукт и отходы. Это представлено на схеме:



Полупродуктом называется сырье, подвергшееся обработке на одной или нескольких стадиях производства, но не потребленное в качестве готового целевого продукта. Полупродукт, полученный на предыдущей стадии производства, может быть сырьем для последующей стадии, например:

{Каменный уголь} λ{Обратный коксовый газ} λ{Водород} λ{Аммиак} .

Побочным продуктом называется вещество, образующееся в процессе переработки сырья наряду с целевым продуктом, но не являющееся целью данного производства. Побочные продукты, образующиеся при добыче или обогащении сырья, называются *попутными продуктами*.

Отходами производства называются остатки сырья, материалов и полупродуктов, образующихся в производстве и полностью или частично утративших свои качества.

Полупродукты, побочные продукты и отходы производства после предварительной обработки или без нее могут быть использованы в качестве сырья в других производствах. Например, при выплавке цветных металлов, образующийся как побочный продукт оксид серы (IV), является промежуточным продуктом в производстве серной кислоты. Серная кислота, будучи готовым продуктом сернокислотного производства, служит сырьем для

производства минеральных удобрений (простого суперфосфата).

Сырьем для химической промышленности служат продукты горно-рудной, нефтяной, газовой, коксохимической, лесной и целлюлозно-бумажной отраслей промышленности, черной и цветной металлургии. Все химическое сырье подразделяется на группы по происхождению, химическому составу, запасам и агрегатному состоянию. Классификация химического сырья представлена на рис. 9.1.

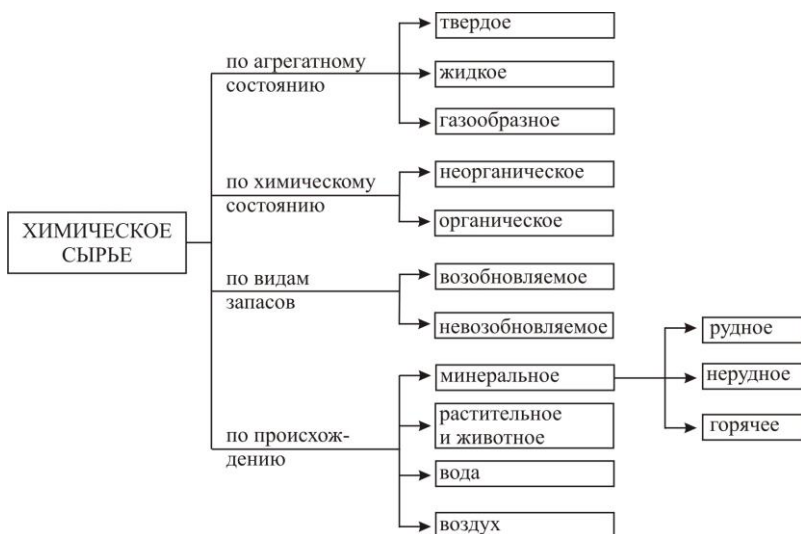


Рисунок 9.1 – Классификация химического сырья

Химическое сырье принято также делить на:

- первичное (извлекаемое из природных источников) и
 - вторичное (промежуточные и побочные продукты промышленного производства и потребления, отходы)
- и на
- природное и
 - искусственное (полученное в результате промышленной обработки природного сырья).

К веществам, используемым в качестве химического сырья, предъявляется ряд общих требований. Сырье для химического производства должно обеспечивать:

- малостадийность производственного процесса;
- агрегатное состояние системы, требующее минимальных затрат энергии для создания оптимальных условий протекания процесса;
- минимальное рассеяние подводимой энергии;
- минимальные потери энергии с продуктами;
- возможно более низкие параметры процесса (температура, давление) и расход энергии на изменение агрегатного состояния реагентов и осуществление химико-технологического процесса;
- максимальное содержание целевого продукта в реакционной смеси.

9.2 Ресурсы и рациональное использование сырья

В себестоимости продукции химической промышленности доля сырья достигает 70%. Поэтому проблема ресурсов и рационального использования сырья при его переработке и добыче весьма актуальна.

В химической промышленности в качестве сырья используются соединения более 80 элементов. Эти элементы, входящие в состав земной коры, которая является основным источником химического сырья, распределены в ней неравномерно по природе, концентрации и географическому размещению.

Количественной характеристикой распространенности элементов в природе служит кларк, величина, выражающая в массовых или атомных процентах, или в граммах на тонну содержание данного элемента в земной коре. В табл. 9.1 приведены кларки наиболее распространенных элементов.

Таблица 9.1 – Кларки некоторых элементов

Кларки	Элемент								
	O ₂	Si	Al	Fe	Ca	Na	Mg	K	H ₂
% масс.	49,13	26,0	7,45	4,20	3,25	2,40	2,35	2,35	1,00
г/т · 10 ⁻³	473	291	81	46,5	33	25,3	17	25	1,3

Из табл. 9.1 следует, что всего 9 элементов составляют более 98% массы земной коры; на все остальные элементы приходится всего 1,87%. Содержание углерода, представляющего основу жизни и составляющего основную часть горючих ископаемых, составляет только 0,35% массы земной коры.

Все ресурсы химического сырья подразделяются на запасы, то есть выявленные и изученные ресурсы и на потенциальные ресурсы. В свою очередь по степени изученности и пригодности к эксплуатации запасы сырья делятся на три категории.

К категории *A* относятся запасы, детально разведанные и подготовленные к разработке. К категории *B* относятся запасы, установленные в результате геолого-разведочных работ. В категорию *C* включены запасы, определенные по результатам геофизической разведки и изучения по естественным обнаружениям.

Естественно, что количество сырья в разведанных месторождениях, то есть запасы его на несколько порядков меньше, чем количество сырья, содержащегося в земной коре (см. табл. 9.2).

Таблица 9.2 – Содержание некоторых элементов в земной коре и металлических рудах

Элемент	Масса элемента, т		Отношение m ₁ /m ₂
	в земной коре, m ₁	в рудах, m ₂	
Железо	8,8·10 ¹⁵	1,0·10 ¹¹	8,8·10 ⁴
Алюминий	1,5·10 ¹⁶	5,0·10 ⁸	3,0·10 ⁷
Медь	1,8·10 ¹³	1,8·10 ⁸	1,0·10 ⁵
Свинец	3,0·10 ¹²	5,1·10 ⁷	1,6·10 ⁶

Возможность использования сырья для промышленного производства определяется его ценностью, доступностью и концентрацией полезного компонента.

Ценность сырья зависит от уровня развития технологии и задач, стоящих перед производством и существенно меняется со временем. Так, например, уран, являвшийся ранее отходом при получении радия, стал во второй половине XX столетия ценнейшим стратегическим сырьем.

Доступность сырья для добычи определяется географическим расположением запасов, глубиной залегания, разработанностью промышленных методов извлечения. Так, спецификой природных условий затруднена добыча ископаемого топлива в районах Крайнего Севера. Отсутствие эффективных методов (цианидного, ртутного) не позволяло в прошлом успешно извлекать золото из рассеянных месторождений.

Существенное влияние на возможность использования запасов сырья оказывает концентрация полезного элемента. Многие элементы при относительно высоком содержании в земной коре рассеяны, что затрудняет использование их соединений в качестве химического сырья. Тем не менее для промышленности в целом и химической – в частности, характерна историческая тенденция использовать все более распространенное сырье, выраженная в правиле Вернадского, согласно которому «кларки промышленности стремятся к кларкам планеты».

Высокая доля сырья в себестоимости химической продукции, быстрое истощение запасов сырья (мировая добыча минерального сырья за первую половину XX века выросла в 3,4 раза), удорожание процессов добычи его (за последние годы себестоимость добычи нефти выросла в 2 раза, угля в 1,5 раза, природного газа в 2,5 раза) выдвинули две задачи:

- разработку объективной оценки скорости истощения запасов химического сырья;
- рациональное использование химического сырья.

1. Количественной характеристикой скорости истощения запасов сырья предложено считать «индекс использования резервов» (ИИР), который представляет процент расходования данного вида сырья в год. Чем выше ИИР, тем, очевидно, больше скорость расходования сырья, то есть

$$\tau_{\text{исчерп.}} = 100/\text{ИИР}, \quad (9.1)$$

где $\tau_{\text{исчерп.}}$ – время истощения запасов сырья в годах.

ИИР зависит от численности населения и возрастает с его увеличением. В табл. 9.3 приведены значения ИИР и соответствующее им время истощения ресурсов основных видов химического сырья, рассчитанные для численности населения $3,56 \cdot 10^9$ человек (графа I) и $10 \cdot 10^9$ человек (графа II).

Таблица 9.3 – Индекс использования резервов и время истощения ресурсов

Вид ресурса	ИИР		Время, год	
	I	II	I	II
Уголь	0,05	0,10	2000	1000
Нефть	3,10	18,90	32	5,3
Фосфаты	0,06	0,30	1650	333
Железо	0,40	1,20	250	83
Алюминий	0,90	2,50	111	40
Уран	2,30	5,80	43,5	17,3

Из данных таблицы следует, что разведанные запасы многих видов химического сырья могут быть истощены уже при жизни ближайших поколений.

2. Основными направлениями рационального использования химического сырья являются:

- применение более дешевого сырья (местного, с

- минимальными затратами на добычу);
- использование вторичных материальных ресурсов (отходов производства и потребления, побочных продуктов других производств);
- использование менее концентрированного сырья (бедных руд);
- комплексная переработка сырья, то есть метод, при котором в максимальной степени извлекаются и используются все ценные компоненты, содержащиеся в сырье. Примером комплексной переработки является переработка апатитовой руды (рис. 9.2).

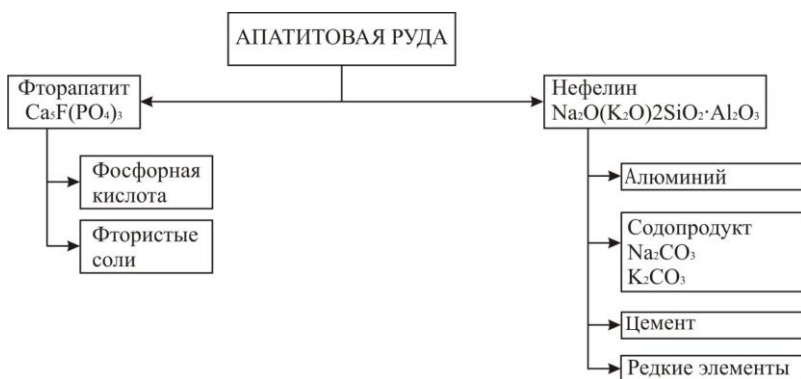


Рисунок 9.2 – Схема переработки апатитовой руды

Комплексное использование сырья позволяет приблизиться к решению важнейшей задачи современной химической технологии – свести к минимуму технологические потери сырья и полностью использовать отходы производства. Это позволяет расширить сырьевую базу, увеличить объем производимой продукции, снизить затраты сырья и энергии, а также в значительной степени уменьшить загрязнение окружающей среды промышленными выбросами. Комплексное использование сырья приводит к сокращению капитальных вложений в

производство, снижению себестоимости продукции и улучшению всех технико-экономических показателей производства. Поэтому экономическая эффективность комплексного использования сырья может быть рассчитана, например, по формуле:

$$\mathcal{E}_k = \frac{(K_{и} - K_k) \cdot 100}{K_{и}}, \quad (9.1a)$$

где \mathcal{E}_k - показатель эффективности комплексного производства, %; $K_{и}$ и K_k - удельные капитальные затраты при использовании сырья для индивидуального производства продукции и при его комплексном использовании, соответственно, рублей.

- замена пищевого сырья на непищевое;
- применение альтернативных материалов, изготавливаемых из сырья с более низким ИИР.

Выгодность применения альтернативных материалов определяется условием:

$$\text{ИИР} = \text{ИИР}_M - \text{ИИР}_{ал} > 0, \quad (9.2)$$

где ИИР_M и $\text{ИИР}_{ал}$ - индексы исчерпания ресурсов первичного и вторичного (альтернативного) материала соответственно. Так, например, замена меди ($\text{ИИР}=1,9$) алюминием ($\text{ИИР}=0,9$) целесообразна, так как в этом случае $\Delta\text{ИИР}=1,9-0,9=1\%>0$. Наоборот, замена меди титаном ($\text{ИИР}=0,5$) нецелесообразна, так как здесь $\Delta\text{ИИР}=0,5-0,9=-0,4<0$.

- рециркуляция сырья, то есть вторичная переработка выработавших срок эксплуатации, вышедших из строя и морально устаревших изделий. Наиболее успешно рециркуляция осуществляется для металлов в виде переплавки скрапа, электрохимического извлечения ценных металлов из лома электронной аппаратуры и др.

Значительно труднее поддаются рециркуляции полимерные материалы, в том числе каучуки и пластмассы.

Как правило, они перерабатываются в изделия вторичного назначения.

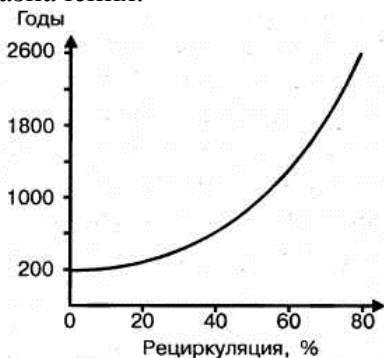


Рисунок 9.3 – Влияние степени рециркуляции на скорость истощения запасов железа

Рециркуляция сырья позволяет значительно снизить скорость истощения природных ресурсов при том же значении ИИР. Так, например, если время истощения запасов железа без рециркуляции составляет 250 лет, то при степени рециркуляции 50% оно возрастает до 580 лет, а при степени рециркуляции 80% уже до 1330 лет.

Для большинства металлов степень рециркуляции колеблется от 5-10% (вольфрам, алюминий) до 30-45% (медь, железо, свинец, серебро) и зависит от эффективности используемой технологии регенерации. На рис. 9.3 представлена зависимость времени истощения запасов железа от степени рециркуляции.

9.3 Подготовка химического сырья к переработке

Сырье, предназначенное для переработки в готовую продукцию, должно удовлетворять определенным требованиям. Это достигается комплексом операций, составляющих процесс подготовки сырья к переработке.

Целью подготовки сырья является придание ему состава и свойств, обеспечивающих оптимальное протекание химико-технологического процесса его переработки. В процессе подготовки сырье приобретает заданную концентрацию полезного компонента, влажность, определяемое условиями переработки содержание примесей, нужную дисперсность. Операции подготовки сырья

многообразны и зависят от его агрегатного состояния. В комплекс операций по подготовке наиболее распространенного в химической промышленности твёрдого сырья входят: классификация, измельчение (или в определенных случаях укрупнение), обезвоживание и обогащение.

Классификацией называется процесс разделения однородных сыпучих материалов на фракции (классы) по размерам составляющих их частиц. Классификация осуществляется рассевом материалов на ситах (грохочение), разделением смеси частиц по скорости их осаждения в жидкой фазе (гидравлическая классификация), разделением смеси частиц по скорости их осаждения в воздухе с помощью сепараторов (воздушная классификация).

Измельчением называется механический процесс деления твердого тела на части за счет приложения внешних сил. Измельчение может производиться методами удара (I), раздавливания (II) и истирания (III), как показано на рис. 9.4.



Рисунок 9.4 – Схемы приложения сил при измельчении твердого вещества

Измельчение до частиц размером до 10^{-3} м называется дроблением и осуществляется в дробилках, до частиц размером от 10^{-3} до 10^{-6} м - размолот и осуществляется в мельницах. Мерой измельчения является степень измельчения, определяемая как:

$$i = \frac{D_H}{D_K}, \quad (9.3)$$

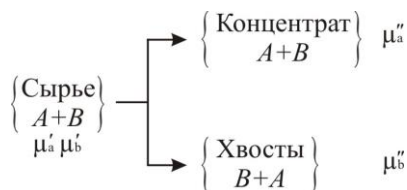
где D_H и D_K - средний размер частиц (эквивалентный диаметр) до и после измельчения соответственно. В отдельных случаях процесс подготовки включает операцию укрупнения порошкообразного материала методами брикетирования или агломерации.

Обезвоживание материала достигается методами стекания, отстаивания (в случае жидких систем) и сушки.

Сушкой называют процесс удаления влаги или другой жидкости из твердых материалов путем ее испарения и отвода образующегося пара. Условием сушки является обеспечение неравенства $P_M > P_C$, где P_M - давление пара во влажном высушиваемом материале; а P_C - парциальное давление пара в окружающей среде. Процесс сушки осуществляют в сушилках различной конструкции, при атмосферном давлении или в вакууме.

Обогащением называется процесс отделения полезной части сырья (полезного компонента) от пустой породы (балласта) с целью повышения концентрации полезного компонента. В результате обогащения сырье разделяется на концентрат полезного компонента и хвосты с преобладанием в них пустой породы.

Если обозначить полезный компонент А, пустую породу В, а массовые доли их до обогащения и после, соответственно $\mu'_a, \mu'_b, \mu''_a, \mu''_b$, то процесс обогащения может быть представлен схемой:



Очевидно, что $\mu''_a > \mu'_a$ и $\mu''_b > \mu'_b$.

Количественными показателями процесса обогащения являются:

1. *Выход концентрата* представляет собой отношение массы полученного концентрата m_K к массе обогащаемого сырья m_C :

$$\eta_K = \frac{m_K}{m_C}. \quad (9.4)$$

2. *Степень извлечения полезного компонента*, представляющая отношение массы полезного компонента в концентрате $m_{\text{кк}}$ к его массе в обогащаемом сырье $m_{\text{кс}}$:

$$X_{\text{и}} = \frac{m_{\text{кк}}}{m_{\text{кс}}} . \quad (9.5)$$

3. Степень обогащения сырья представляет собой отношение массовой доли полезного компонента в концентрате $\mu_{\text{кк}}$ к массовой доле его в обогащаемом сырье $\mu_{\text{кс}}$:

$$X_0 = \frac{\mu_{\text{кк}}}{\mu_{\text{кс}}} . \quad (9.6)$$

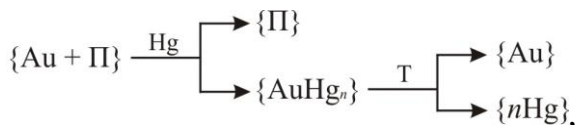
Выбор метода обогащения зависит от агрегатного состояния и различия свойств компонентов сырья.

При обогащении твердого сырья используются механические, химические и физико-химические методы.

К механическим методам обогащения относятся:

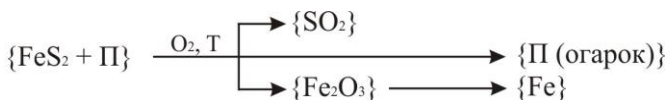
- гравитационный, основанный на разной скорости оседания частиц различной плотности и размеров в потоке газа или жидкости, или в поле центробежной силы;
- электромагнитный, основанный на различной магнитной проницаемости компонентов сырья;
- электростатический, основанный на различной электрической проводимости компонентов сырья.

К химическим методам обогащения относится растворение при извлечении золота ртутным или цианидным методами, например:



где П – пустая порода,

и обжиг, например, при получении железа из железного колчедана:



К физико-химическим методам обогащения относится наиболее распространенный метод флотации. *Флотацией* (от *floatation* - всплывание) называется метод обогащения твердого сырья, основанный на различии в смачиваемости его компонентов. Смачиваемость частиц вещества характеризуется работой адгезии на границе раздела фаз системы «твердое тело - жидкость» $W_{\text{ж-т}}$:

$$W_{\text{ж-т}} = \sigma_{\text{ж-г}} + \sigma_{\text{т-г}} - \sigma_{\text{ж-т}}, \quad (9.7)$$

где $\sigma_{\text{ж-г}}$, $\sigma_{\text{т-г}}$, $\sigma_{\text{ж-т}}$ - удельная свободная поверхностная энергия на границе раздела соответствующих фаз.

Удельная поверхностная энергия пропорциональна поверхности раздела фаз, то есть $\sigma = f(F)$, поэтому, чем мельче частицы флотируемого материала, тем больше отношение их поверхности к объему (s/v) или массе (s/m) и тем сильнее проявляется явление смачиваемости. Поэтому флотируемое сырье измельчают до размеров 0,05-0,3 мм.

Показателем смачиваемости материала служит «краевой угол смачивания» на границе раздела фаз «твердое тело - жидкость - воздух» между перпендикуляром к поверхности жидкости и касательной к мениску ее у частицы (рис.9.5).

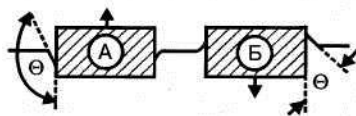


Рисунок 9.5 – Поведение частицы в воде:
А - не смачивается,
Б - смачивается

Вследствие того, что силы поверхностного натяжения стремятся выровнять уровень жидкости, частицы несмачиваемых или гидрофобных материалов ($\theta > 90^\circ$)

выталкиваются из жидкости (всплывают), а частицы смачиваемых или гидрофильных материалов ($\theta < 90^\circ$) погружаются в жидкость.

Для ускорения процесса флотации систему вспенивают путем интенсивного перемешивания (механические флотационные машины) или барботажа воздуха через систему (пневматические флотационные машины). В процессе флотации гидрофобный компонент образует с пузырьками воздуха минерализованную пену, отделяемую от жидкой фазы, в которой остаются гидрофильные компоненты.

Результат флотации зависит от различия в гидрофобности (гидрофильности) компонентов обогащаемого сырья. Поэтому в том случае, если полезный компонент и пустая порода близки по смачиваемости, в систему вводят специальные реагенты, относящиеся к группе поверхностно-активных веществ, которые увеличивают гидрофобность полезного компонента (коллекторы или собиратели). Их природа зависит от состава конкретного флотированного сырья. Для создания устойчивой пены и улучшения разделения компонентов флотированного сырья в систему помимо коллекторов вводят другие флотореагенты: активаторы, подавители, пенообразователи и регуляторы pH среды.

ГЛАВА X

ЭНЕРГИЯ В ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

10.1 Человеческое общество и проблема энергии

Одним из условий существования человеческого общества является непрерывный обмен энергией с окружающей средой. Поэтому энерговооруженность общества составляет условие прогресса человечества, а дальнейшее развитие материальной культуры

непосредственно связано с решением энергетической проблемы. Уровень материального благосостояния современного общества определяется количеством энергии, вырабатываемой на душу населения.

Потребление энергии на планете непрерывно возрастает. Если в 1975 году оно составляло $0,25Q$, то прогноз на 2000 год дает $0,8Q$, а на 2100 год астрономическую цифру $7,3Q$, где $Q=2,3 \cdot 10^{14}$ кВт·ч. Производство энергии в РФ в 1992 году было эквивалентно 1,6 т условного топлива на человека.

Предполагается, что в 2100 году оно достигнет 1,8-2,0 т УТ. Структура потребления энергии в современном обществе свидетельствует, что наиболее энерговооруженной отраслью народного хозяйства является промышленное производство, а наименее – сельское хозяйство.

Существует определенная связь между потреблением энергии обществом и средней продолжительностью человеческой жизни, как это видно из рис. 10.1.

Из него следует, что «порог» энергопотребления, при котором достигается устойчивая средняя продолжительность жизни порядка 80 лет, равен $7 \cdot 10^3$ кВт·ч на человека в год. Этот порог достигли, или приблизились к нему такие страны как Швеция, ФРГ, США, Япония.

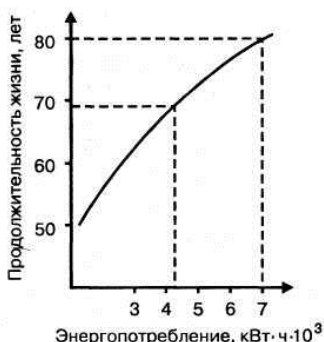


Рисунок 10.1 – Зависимость продолжительности человеческой жизни от величины энергопотребления

10.2 Использование энергии в химической промышленности

Химическое производство принадлежит к числу наиболее энергоемких. Так, если в продукции всей

промышленности доля затрат на энергию составляет 2,5%, то в продукции нефтехимической и химической отраслей она достигает 8,9%. Химическая отрасль промышленности, производя около 6% промышленной продукции, потребляет до 12% всей вырабатываемой электроэнергии. Эта высокая энергоемкость обусловлена значительным потреблением энергии такими химическими производствами, как производство аммиака, фосфора, карбида кальция, карбоната натрия, химических волокон и пластмасс, которое составляет более 60% электрической и 50% тепловой энергии всей отрасли.

Потребление энергии химическим производством оценивается его энергоемкостью. Энергоемкостью производства называется количество энергии, затрачиваемое на получение единицы продукции. Она выражается в кВт·ч (кДж) или в тоннах условного топлива (УТ) на тонну продукции. По энергоемкости химические производства делятся на три класса.

I-ый класс. Производства с расходом УТ более 2 тонн ($58 \cdot 10^3$ кДж) на тонну продукции. К ним относятся производства химических волокон, ацетилен, капролактама, полиэтилена, акрилонитрила и др.

II-ой класс. Производства с расходом УТ от 1 до 2 тонн ($29 \cdot 10^3$ - $58 \cdot 10^3$ кДж) на тонну продукции. К ним относятся производства карбоната натрия, аммиака, карбида кальция, метанола и др.

III-ий класс. Производства с расходом УТ менее 1 тонны ($29 \cdot 10^3$ кДж) на тонну продукции. К ним относятся производства разбавленной азотной кислоты, этиленгликоля, уксусной кислоты, анилина, полистирола, двойного суперфосфата и др.

Энергоемкость отдельных производств колеблется в очень широких пределах: от $20 \cdot 10^3$ кВт·ч для алюминия до 60-100 кВт·ч для серной кислоты на тонну продукции.

В химическом производстве энергия используется для проведения химических реакций, сжатия газов и жидкостей, нагрева материалов, осуществления тепловых процессов (ректификация, испарение и др.), проведения механических и гидродинамических процессов (измельчение, фильтрование и др.), транспортировки материалов. Для этих целей используется электрическая, тепловая, топливная, механическая, световая, ядерная и химическая энергия.

Электрическая энергия применяется для проведения электрохимических, электротермических, электромагнитных и электростатических процессов, а также для перемещения материалов и приведения в действие различных механизмов и машин.

Тепловая энергия используется для различных целей. Энергия высокого потенциала (более 623°K) применяется для высокотемпературной обработки сырья (обжиг и др.) и интенсификации химических реакций. Ее получают за счет сжигания различных видов топлива непосредственно в технологических устройствах. Тепловая энергия среднего ($373\text{-}623^{\circ}\text{K}$) и низкого ($323\text{-}423^{\circ}\text{K}$) потенциала используется в производственных процессах, связанных с изменением физических свойств материалов (нагрев, плавление, дистилляция, выпаривание), для нагрева компонентов при химических процессах, а также для проведения некоторых химических процессов.

Передача тепла осуществляется за счет контакта нагреваемой системы через стенку аппарата с теплоносителем, обладающим высоким теплосодержанием или при непосредственном контакте с нагреваемым материалом. Теплоносителем называется вещество или система веществ, используемое в качестве среды для нагревания. В качестве теплоносителей для средне- и низкотемпературных процессов в химической промышленности применяются горячий воздух, горячая вода,

насыщенный и перегретый водяной пар, топочные газы, высококипящие органические соединения, твердые зернистые материалы (обычно зерна катализатора).

Топливная энергия при сжигании топлива используется для производства тепла и электроэнергии в ТЭЦ и печах особого назначения и составляет в общем балансе энергии, используемой в химической промышленности, около 50%.

Механическая энергия используется для выполнения таких физических операций как измельчение, центрифугирование, перемещение материалов, смешение в работу различных машин, компрессоров, насосов и вентиляторов и др.

Световая энергия применяется в виде облучения для проведения фотохимических процессов синтеза, например, в производстве хлороводорода, галогеналканов и др.

Химическая энергия реализуется в работе химических источников тока различного устройства и назначения.

Ядерная энергия используется для проведения радиационно-химических процессов (например, в процессах полимеризации), производства энергии в АЭС, для анализа, контроля и регулирования процессов производства.

Из всей потребляемой химической промышленностью энергии 40% составляет электрическая, 50% - тепловая (в виде теплоносителей - пара и воды) и 10% топливная энергия.

10.3. Источники энергии

Основными источниками энергии, потребляемой промышленностью, являются горючие ископаемые и продукты их переработки, энергия воды, биомасса и ядерное топливо. В значительно меньшей степени используются энергия ветра, солнца, приливов, геотермальная энергия. Мировые запасы основных видов топлива оцениваются в $1,28 \cdot 10^{13}$ тонн УТ, в том числе, ископаемые угли

$1,12 \cdot 10^{13}$ тонн, нефть $7,4 \cdot 10^{11}$ тонн и природный газ $6,3 \cdot 10^{11}$ тонн УТ.

Выработка энергии на планете в настоящее время составляет $2,93 \cdot 10^{14}$ кВт·ч или $3,35 \cdot 10^7$ МВт·год.

Все энергетические ресурсы подразделяются на первичные и вторичные, возобновляемые и невозобновляемые, топливные и нетопливные (рис. 10.2).

Эксплуатация невозобновляемых энергоресурсов приводит к их исчерпанию и уменьшению энергетического потенциала планеты, а с другой стороны к повышению температуры среды обитания. Поэтому они называются также «добавляющими» тепло источниками энергии. Эксплуатация возобновляемых энергоресурсов сохраняет энергетический потенциал планеты и не изменяет температуру среды обитания. Поэтому они называются «недобавляющими» тепло источниками энергии.

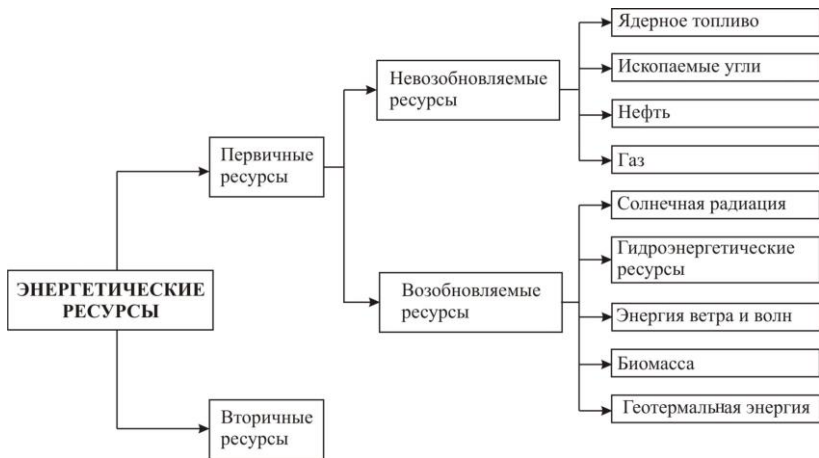


Рисунок 10.2 – Классификация энергетических ресурсов

К топливным энергетическим ресурсам относятся уголь, нефть, природный газ, сланцы, битуминозные пески, торф, биомасса. К нетопливным - гидроэнергия, энергия

ветра, лучистая энергия Солнца, глубинная теплота Земли и др.

Вторичными энергоресурсами (ВЭР) называется энергетический потенциал конечных, побочных и промежуточных продуктов и отходов химического производства, используемый для энергоснабжения агрегатов и установок. К ВЭР относятся тепловые эффекты экзотермических реакций, теплосодержание отходящих продуктов процесса, а также потенциальная энергия сжатых газов и жидкостей. Наибольшими ВЭР (главным образом в форме тепла) располагают предприятия химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, металлургии, промышленности строительных материалов, газовой промышленности, тяжелого машиностроения и некоторых других отраслей народного хозяйства.

Важнейшим источником энергии является химическое топливо (ископаемые угли, торф, нефтепродукты, природные и технические газы), составляющие в балансе энергоресурсов химической промышленности до 70%. Структура потребления химического топлива такова: газ 19,4%, твердое топливо 30,9%, нефтепродукты 47,2%.

Энергетическая ценность химического топлива характеризуется:

- *калорийным эквивалентом* η_k , представляющим отношение низшей теплоты сгорания данного топлива к теплоте сгорания УТ, принимаемой за 29260 кДж:

$$\eta_k = \frac{Q^H}{29260}, \quad (10.1)$$

- *количеством энергии в кВт·ч*, получаемой при полном сгорании 1 кг или 1 м³ топлива. Эта величина составляет: для каменного угля 8,0, природного газа 10,6, кокса 7,2, мазута 15,4, обратного коксового газа 4,8. Для сравнения

та же величина для обогащенного урана равна $22,5 \cdot 10^6$.

Второе место по масштабам энергетического вклада занимают гидроэнергия (ГЭС) и ядерная энергия (АЭС). Доля энергии, вырабатываемой ГЭС составляет около 12%. Дальнейшее развитие гидроэнергетики связано с экологическими проблемами, к числу которых относится сокращение площади плодородных земель и изменение климата при строительстве равнинных ГЭС.

АЭС представляют наиболее перспективный источник энергии как электрической, так и тепловой.

Истощение энергоресурсов привело к необходимости изыскания новых видов и источников энергии. К ним относятся водород, а также возобновляемые источники энергии в виде гидроэнергии, энергии ветра и приливов, геотермальной энергии.

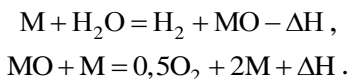
Использование водорода в качестве источника энергии определяется следующими его преимуществами как топлива:

- распространением водорода (в литосфере 17 атомов на 100 атомов) и практически неисчерпаемыми запасами воды как источника водорода;
- высоким энергосодержанием, превышающим в 3,5 раза энергосодержание нефти;
- простотой и дешевизной транспортировки (передача водорода дешевле передачи электроэнергии);
- экологической чистотой продуктов сгорания.

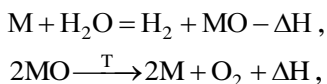
Производство водорода в промышленных масштабах с достаточной степенью экономичности может быть осуществлено электролизом воды, пиролизом воды в плазмотроне, обработкой биомассы водяным паром, фоторазложением воды в присутствии ферментов, проведением термохимических и термоэлектрохимических циклов разложения воды.

Термохимические циклы представляют собой чередование экзо- и эндотермических процессов и протекают

при относительно низких температурах (схема «теплового насоса»):



Комбинированные термоэлектрохимические циклы осуществляются с использованием на одной из стадий энергии АЭС:

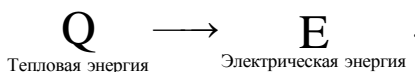


где М - реагент с большим, чем у водорода сродством к кислороду, что обеспечивает термодинамическую возможность процесса при относительно низкой температуре; MO - оксид, легко диссоциирующий при нагревании.

Использование других альтернативных источников энергии ограничивается проблемой «концентрации энергии» (Н.Н. Семенов). Так, например, все энергетические потребности человечества может удовлетворить всего 0,5% солнечной энергии, падающей на землю. Однако для ее поглощения и утилизации необходимы гелиоустановки общей площадью 130000 км². В связи с этим возникает задача изыскания более технологичных концентрированных видов энергии. Она может быть решена переходом от традиционной схемы выработки электрической энергии через механическую



к схеме непосредственного превращения тепловой энергии в электрическую



Для этой цели используются:

- магнитогидродинамические генераторы (МГД-генераторы), в которых кинетическая энергия низкотемпературной плазмы за счет торможения в магнитном поле переходит в электрическую энергию постоянного тока;
- топливные элементы (электрохимические генераторы), в которых осуществляется непосредственное превращение энергии горения реакционноспособных топлив (водород, спирты, альдегиды и другие активные восстановители) в электрическую энергию.

В обоих случаях КПД этого процесса существенно превышает КПД традиционных процессов.

10.4 Рациональное использование энергии в химической промышленности

Высокая доля энергии в себестоимости химической продукции обусловила необходимость ее рационального и экономичного использования в производстве. Критерием экономичности *использования энергии* всех видов является коэффициент использования энергии, равный отношению количества энергии, теоретически необходимой на производство единицы продукции (W_T), к количеству энергии, практически затраченной на это (W_{Π}):

$$\eta = \frac{W_T}{W_{\Pi}}. \quad (10.2)$$

Для высокотемпературных эндотермических процессов коэффициент использования тепловой энергии не превышает 0,7, то есть до 30% энергии уходит с продуктами реакции в виде тепловых потерь.

Рациональное использование энергии в химическом производстве означает применение методов, повышающих коэффициент использования энергии. Эти методы могут быть сведены к двум группам: разработке энергосберегающих

технологий и улучшению использования энергии в производственных процессах. К первой группе методов относятся:

- разработка новых энергоэкономных технологических схем;
- повышение активности катализаторов;
- замена существующих методов разделения продуктов производства на менее энергоемкие (например, ректификации на экстракцию и т. п.);
- создание комбинированных энерготехнологических схем, объединяющих технологические операции, протекающие с выделением и поглощением энергии (теплоты). Подобное сочетание в одном производстве энергетики и технологии позволяет значительно полнее использовать энергию химических процессов, другие энергоресурсы и повысить производительность энерготехнологических агрегатов.

Ко второй группе энергосберегающих методов относятся:

- уменьшение тепловых потерь за счет эффективной теплоизоляции и уменьшения излучающей поверхности аппаратуры;
- снижение потерь на сопротивление в электрохимических производствах;
- использование вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

ВЭР подразделяются на горючие (топливные), представляющие химическую энергию отходов технологических процессов переработки топлива и горючих газов металлургии; тепловые ВЭР, представляющие физическую теплоту отходящих газов и жидкостей технологических агрегатов и отходов основного производства, и ВЭР избыточного давления, представляющие потенциальную энергию газов и жидкостей, выходящих из технологических агрегатов, работающих под избыточным давлением.

В зависимости от вида и параметров состояния ВЭР различают четыре направления их использования в производстве:

- топливное направление в виде непосредственного использования горючих компонентов ВЭР в качестве топлива;
- тепловое направление в виде использования тепловых ВЭР;
- силовое направление в виде использования ВЭР для выработки механической или электрической энергии;
- комбинированное направление.

Ниже представлены схемы топливного (рис. 10.3), теплового (рис. 10.4, 10.5, 10.6) и силового (рис. 10.7) направлений использования ВЭР.

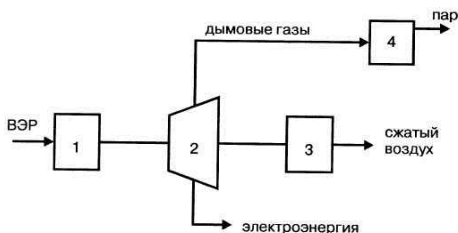


Рисунок 10.3 – Использование горючих ВЭР в качестве топлива в схеме с газовой турбиной:

- 1 - топочная камера; 2 - газовая турбина;
3 - воздушный компрессор; 4 - парогенератор



Рисунок 10.4 – Использование тепловых ВЭР в схеме с теплообменником:

- 1 – реактор; 2 – теплообменник

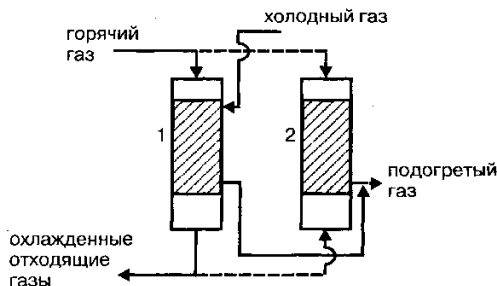


Рисунок 10.5 – Использование тепловых ВЭР в схеме с регенераторами:

- 1 – регенераторы, работающие на разогрев камеры;
- 2 – регенератор, работающий на подогрев газа

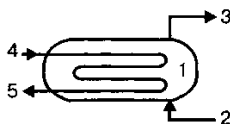


Рисунок 10.6 – Использование тепловых ВЭР для выработки пара в котле-утилизаторе:

- 1 - котел-утилизатор; 2 - подача воды; 3 - выход пара;
- 4 - вход нагретого газа; 5 - выход охладившего газа

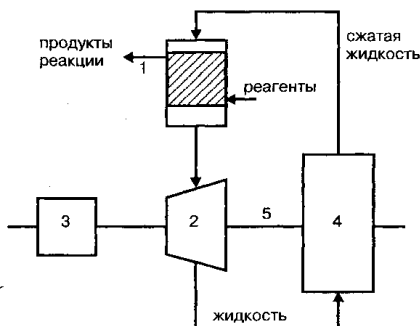


Рисунок 10.7 – Использование части энергии сжатых систем для выработки электроэнергии в схеме «мотор-насос-турбина»:

- 1 – реактор; 2 – жидкостная турбина; 3 – мотор; 4 – насос; 5 – ось

10.5 Новые виды энергии в химической промышленности

Развитие химической промышленности сопровождается не только количественным ростом энергопотребления, но и качественным изменением его. Это выражается во все более интенсивном внедрении в химическое производство таких новых видов энергии и воздействия на систему как плазмохимическое, ультразвуковое, фото- и радиационное воздействие, действие низковольтного электрического разряда и лазерного излучения. Эти экстремальные воздействия способствуют активации молекул реакционной системы, возникновению в ней возбужденных частиц и инициированию химического, в том числе, с высокой селективностью, процесса. Эта область явлений составляет новую отрасль химии – *химию высоких энергий* (ХВЭ), изучающую состав, свойства и химические превращения в системах, содержащих возбуждающие частицы.

Среди подобных процессов особо перспективными и универсальными являются плазмохимические процессы, то есть химические превращения, протекающие в плазме. Плазмой называется частично или полностью ионизированный газ, в котором содержатся молекулы, атомы, ионы и электроны:



Различают низкотемпературную плазму с температурой 10^3 - 10^4 °К и высокотемпературную с температурой 10^6 - 10^8 °К. В химической технологии для получения различных продуктов применяется низкотемпературная плазма, промышленные методы получения которой разработаны. Высокотемпературная плазма используется в установках типа ТОКАМАГ.

В настоящее время исследованы более 70 технологических плазменных процессов, часть которых

внедрена в промышленность. К ним относятся:

- синтез эндотермических тугоплавких соединений (карбиды урана и тантала, нитриды титана, алюминия, вольфрама);
- восстановление металлов из их оксидов и солей (железо, алюминий, вольфрам, никель, тантал);
- окисление различных веществ (азот, хлороводород, оксид углерода, метан);
- пиролиз природного газа, нефтепродуктов;
- одностадийный синтез соединений из простых веществ (аммиак, цианистый водород, гидразин, фторуглеводороды);
- синтез соединений, образующихся только в условиях плазмохимического воздействия (озон, дифторид криптона, оксид серы (II), оксид кремния (I)).

В промышленных масштабах плазмохимические процессы применяются для производства ацетилена и водорода из природного газа, ацетилена, этилена и водорода из нефтепродуктов, синтез-газа в производстве винилхлорида, двуокиси титана и др. Для проведения плазмохимических процессов используются плазменные реакторы различной конструкции.

На рис. 10.8. представлен реактор прямоточного типа, состоящий из четырех основных узлов: плазмотрона, где под воздействием электрической дуги или токов высокой частоты образуется плазма; реактора, в

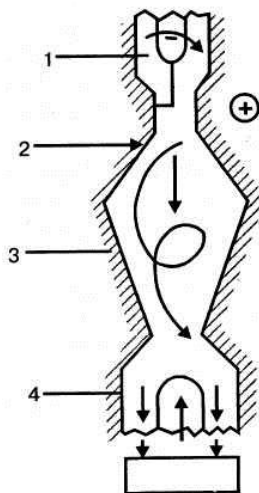


Рисунок 10.8 -

Плазменный реактор:

- 1 - плазмотрон;
- 2 - реактор;
- 3 - закалочное устройство;
- 4 - узел улавливания

который вводится образовавшаяся плазма и поступают реагенты, закалочного устройства, обеспечивающего быстрое охлаждение (закалку) реакционной смеси и узла улавливания продуктов реакции.

Для плазмохимических реакторов характерно крайне малое время реакции, составляющее от 10^{-2} до 10^{-5} секунды. Это определяет весьма малые размеры реактора. Плазмохимические процессы легко управляются, оптимизируются и поддаются моделированию. Затраты энергии на их проведение не превышают затрат энергии на традиционные процессы.

Характерным примером плазмохимического процесса является производство ацетилена пиролизом метана.

Для реакции $2\text{CH}_4 = \text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2 + \Delta\text{H}$, где $\Delta\text{H} = 376 \text{ кДж}$, константа скорости равна

$$K_C = 10^{12} \cdot e^{\frac{-79000}{RT}}.$$

Весьма высокая энергия активации требует высоких температур процесса. Термодинамически реакция становится возможной при температуре выше 1500°K , при которой энергия Гиббса приобретает отрицательное значение:

$$\Delta G = 96,8 - 0,0647T.$$

В плазмохимическом процессе получения ацетилена по этой схеме в качестве плазмы используется аргон или водород, а закалка продуктов реакции осуществляется впрыскиванием воды. Степень конверсии метана достигает 0,7, а плазменный реактор диаметром 0,15 м, высотой 0,65 м и объемом $0,05 \text{ м}^3$ имеет производительность 25000 т ацетилена в год. По энергоемкости плазмохимический метод (14,0 кВт·ч/кг) сопоставим с карбидным методом (15,5 кВт·ч/кг), но уступает методам электрокрекинга и термоокислительного пиролиза.

ГЛАВА XI ВОДА В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

11.1 Использование воды в химическом производстве

Химическая промышленность - один из крупнейших потребителей воды. Вода используется почти во всех химических производствах для разнообразных целей. На отдельных химических предприятиях потребление воды достигает 1 млн м³ в сутки. Превращение воды в один из важнейших элементов химического производства объясняется:

- наличием комплекса ценных свойств (высокая теплоемкость, малая вязкость, низкая температура кипения и др.);
- доступностью и дешевизной (затраты исключительно на извлечение и очистку);
- нетоксичностью;
- удобством использования в производстве и транспортировки. В химической промышленности вода используется в следующих направлениях:
 1. Для технологических целей в качестве:
 - растворителя твердых, жидких и газообразных веществ;
 - среды для осуществления физических и механических процессов (флотация, транспортировка твердых материалов в виде пульпы и др.);
 - промывной жидкости для газов;
 - экстрагента и абсорбента различных веществ.
 2. Как теплоноситель (в виде горячей воды и пара) и хладоагента для обогрева и охлаждения аппаратуры.
 3. В качестве сырья и реагента для производства различной химической продукции (например, водорода, ацетилен, серной и азотной кислот и др.)

Воды морей и океанов являются источниками сырья для добычи многих химических веществ. В промышленных

масштабах из них извлекаются хлориды натрия и магния, бром, иод и другие продукты. В настоящее время их рассматривают и как потенциальные источники получения многих других элементов. Так, например, содержание элементов в водах Океана составляет (%): калия $3,8 \cdot 10^{-2}$, ванадия $5 \cdot 10^{-8}$, золота $4 \cdot 10^{-10}$, серебра $5 \cdot 10^{-9}$, урана $2 \cdot 10^{-7}$. Приняв массу воды на планете равной $1,4 \cdot 10^{18}$ тонн, получим соответственно содержание в ней золота $5,6 \cdot 10^6$ тонн и урана $2,8 \cdot 10^9$ т. Всего 0,01% этой массы урана достаточно для обеспечения энергией всей планеты на протяжении 100 лет.

К новым промышленным методам получения полезных компонентов из вод Мирового океана относятся эксплуатируемые в Японии установки по извлечению урана с помощью комплексных соединений и отечественный проект «Гидрометалл» по извлечению из конкреций Тихого океана железа и марганца, схема которого приведена на рис. 11.1.

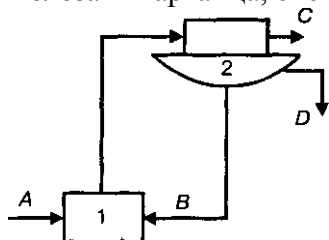


Рисунок 11.1 - Схема «Гидрометалл»:

1 - подводный реактор для переработки конкреций;

2 - плавучая база.

А - извлекаемые со дна конкреции;

В - реагенты для переработки конкреций, подаваемые в реактор;

С - готовая продукция;

Д - отработанное сырье, возвращаемое в океан

Масштабы потребления воды химической промышленностью зависят от типа производства и колеблются в широких пределах. Так, расходные коэффициенты по воде (в м³ на тонну продукции) составляют: для азотной кислоты 200, вискозного волокна 1200, аммиака 1500, синтетического каучука 1600, капронового волокна 2500. Например, завод капронового волокна расходует такое же количество воды, как город с населением 120000 человек, а специализированный завод пластических масс по потреблению воды эквивалентен городу с населением 400000 человек.

Громадный расход технологической воды, наряду с большим объемом загрязненных вод, сбрасываемых химическими предприятиями (до 40% стока речных вод используется только на разбавление их до безопасной концентрации содержащихся в них веществ), выдвигает первоочередную задачу рационального использования водных ресурсов в химической и нефтехимической промышленности. Эта задача решается путем:

- разработки научно обоснованных норм расхода воды на технологические операции;
- максимально полного использования отходов и снижения за счет этого потребности в очистительных сооружениях;
- замены водяного охлаждения аппаратуры воздушным;
- организации замкнутых без сточных производств и водооборотных циклов.

Водооборотные циклы технологических установок, цехов и химических предприятий в целом являются важнейшим фактором рационального использования водных ресурсов. В этих циклах осуществляется многократное использование воды без выброса загрязненных стоков в водоемы, а потребление свежей воды для ее восполнения ограничено только технологическими превращениями (в качестве компонента сырья) и естественными потерями.

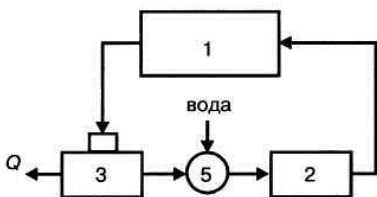


Рисунок 11.2 – Цикл с охлаждением оборотной воды:

- 1 - технологическая установка (цех); 2 - насосная станция;
- 3 - градирня (бассейн); 4 - очистные сооружения;
- 5 - камера для пополнения потерь воды

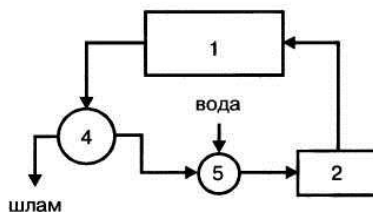


Рисунок 11.3 – Цикл с очисткой оборотной воды:

В химических производствах используются три схемы водооборота в зависимости от тех изменений, которые претерпевает вода в процессе производства:

- вода только нагревается и должна быть перед возвратом охлаждена в градирнях или бассейнах (рис. 11.2);

- вода только загрязняется и должна быть перед возвратом очищена в специальных очистных сооружениях (рис. 11.3);

- вода нагревается и загрязняется. Этот тип водооборота представляет комбинацию водооборотов первого и второго типов (рис. 11.4).

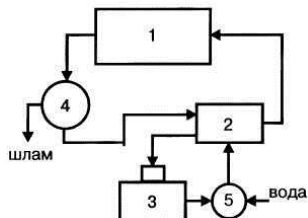


Рисунок 11.4 – Цикл с очисткой и охлаждением оборотной воды:

1 - технологическая установка (цех); 2 - насосная станция; 3 - градирня (бассейн); 4 - очистные сооружения; 5 - камера для пополнения потерь воды

Критерием эффективности водооборотного цикла является коэффициент использования воды:

$$K_B = \frac{V_3 - V_{сб}}{V_3}, \quad (11.1)$$

где: V_3 и $V_{сб}$ - количества забираемой из источника свежей воды и сбрасываемой в водоем сточной воды соответственно. В химической промышленности доля оборотного водоснабжения достигает 85 - 90%.

11.2 Источники водоснабжения химических производств

Общее количество воды на Земле составляет $1,386 \cdot 10^9$ км³ ($1,386 \cdot 10^{18}$ м³) или $1,4 \cdot 10^{18}$ тонн. Большая часть этой воды находится в постоянном кругообороте под воздействием тепловой энергии солнца и теплоты земных недр. Природная вода подразделяется на атмосферную, поверхностные воды, подземные воды и морскую (океанскую) воду.

Атмосферная вода, выпадающая в виде дождя и снега, содержит минимальное количество примесей, главным образом, в виде растворенных газов (кислорода, оксида углерода (II), азота, сероводорода), бактерий, а в промышленных районах также оксиды азота и серы и различные органические вещества.

Поверхностные воды представляют воды открытых водоемов: рек, озер, каналов, водохранилищ. В состав поверхностных вод входят различные минеральные и органические вещества, природа и концентрация которых зависят от климатических, геоморфологических, почвенно-геологических условий, а также от агро- и гидротехнических методов, развития промышленности в регионе и других факторов.

К подземным водам относятся воды артезианских скважин, колодцев, ключей и гейзеров. Для них характерно высокое содержание минеральных солей, выщелачиваемых из почвы и осадочных пород, и малое содержание органических веществ.

Морская вода представляет многокомпонентный раствор электролитов и содержит практически все элементы, входящие в состав литосферы. В ней растворены также различные газы.

В зависимости от солесодержания природные воды делятся на пресные (содержание солей менее 1 г/кг), солоноватые (содержание солей 1-10 г/кг) и соленые (содержание солей более 10 г/кг). Из общего объема гидросферы планеты запасы пресных вод составляют всего 0,03%, при этом источниками промышленного водоснабжения становятся, преимущественно, только речные воды, что связано со значительной протяженностью их береговой линии. В настоящее время на промышленные цели в РФ расходуется до 9% общего стока пресной воды, что составляет 700 куб. км в год.

Вода, используемая в химической промышленности (технологическая вода) должна удовлетворять по качеству определенным требованиям того или иного производства. Качество воды определяется совокупностью ее физических и химических характеристик, к которым относятся: цвет, прозрачность, запах, общее солесодержание, жесткость, окисляемость, реакция (рН), которые зависят от содержания в воде различных примесей. Для промышленных вод важнейшими из этих характеристик являются жесткость, окисляемость, реакция и содержание примесей различной дисперсности.

Жесткостью называется свойство воды, обусловленное присутствием в ней солей кальция и магния. В зависимости от природы анионов различают временную (устранимую, карбонатную) жесткость, зависящую от наличия в воде бикарбонат-ионов HCO_3^- , $J_{\text{в}}$, и постоянную (некарбонатную) жесткость, вызываемую присутствием хлорид-ионов Cl^- , нитрат-ионов NO_3^- и сульфат-ионов SO_4^{2-} , $J_{\text{п}}$. Сумма временной и постоянной жесткости называется общей жесткостью воды:

$$J_0 = J_{\text{в}} + J_{\text{п}}. \quad (11.2)$$

Жесткость воды выражается суммой концентраций ионов кальция и магния, содержащихся в 1 литре воды, то есть в ммоль/л. По значению общей жесткости воды делятся на мягкую (J_0 менее 2), средней жесткости ($J_0 = 2 - 10$) и жесткую (J_0 более 10).

Окисляемостью называется свойство воды, обусловленное присутствием в ней органических веществ, легкоокисляющихся соединений железа и сероводорода, способных окисляться различными окислителями. Так как состав этих примесей неопределен, окисляемость воды выражается в количестве перманганата калия или

эквивалентном ему количестве кислорода, затраченного на окисление 1 литра воды, то есть мг/л.

Активная реакция воды характеризует ее кислотность и щелочность. Она зависит от присутствия в воде некоторых газов, реагирующих с водой (хлор, оксид углерода и др.), растворимых гуминовых кислот и веществ, вносимых в водоем промышленными стоками. Для большинства природных вод активная среда характеризуется величиной $pH=6,5-8,5$.

11.3 Промышленная водоподготовка

Вредное влияние примесей, содержащихся в промышленной воде, зависит от их химической природы, концентрации, дисперсного состояния, а также технологии конкретного производства, использующего воду. Все вещества, присутствующие в воде, могут находиться в виде истинного раствора (соли, газы, некоторые органические соединения, в коллоидном состоянии (алю- мо- и железосиликаты, некоторые гидроксиды, кремневая кислота, органические соединения типа лигнина и др.) и во взвешенном состоянии (глинистые, песчаные и известковые частицы).

Растворенные в воде вещества образуют при нагреве накипь на стенках аппаратуры и вызывают коррозионное разрушение ее. Коллоидные примеси вызывают загрязнение диафрагм электролизеров, вспенивание воды. Грубодисперсные взвеси засоряют трубопроводы, снижая их производительность, могут вызвать их закупорку. Все это вызывает необходимость предварительной подготовки воды, поступающей на производство водоподготовки.

Водоподготовкой называют комплекс операций по удалению из природной воды вредных для производства примесей, содержащихся в ней в виде взвесей, коллоидных частиц, растворенных солей и газов. В водоподготовку входят операции осветления, умягчения, дегазации, а в отдельных

случаях обессоливания и для питьевой воды обеззараживания. Схема промышленной водоподготовки приведена на рис. 11.5.

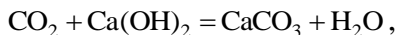


Рисунок 11.5 – Схема промышленной водоподготовки

Осветление воды достигается отстаиванием ее с последующим фильтрованием через зернистый материал различной дисперсности. Для коагуляции коллоидных примесей и абсорбции окрашенных веществ, содержащихся в воде, к ней добавляют электролиты – сульфаты алюминия и железа.

Обеззараживание воды обеспечивается ее хлорированием или озонированием.

Дегазация – удаление из воды растворенных газов достигается химическим способом, при котором газы поглощаются химическими реагентами, например, в случае диоксида углерода:

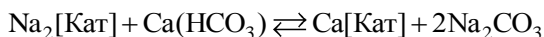


или физическими способами термической деаэрации на воздухе или в вакууме.

Обессоливание применяется в тех производствах, где к воде предъявляются особо жесткие требования по чистоте, например, при получении полупроводниковых материалов, химически чистых реактивов, фармацевтических препаратов. Обессоливание воды достигается методом ионного обмена, дистилляцией и электродиализом.

Метод ионного обмена основан на свойстве некоторых твердых тел (ионитов) поглощать из раствора ионы в обмен на эквивалентное количество других ионов того же знака. Иониты подразделяются на катиониты и аниониты. Катиониты содержат подвижные катионы натрия или водорода, а аниониты подвижные ионы гидроксила. В качестве катионитов применяют сульфогли, алюмосиликаты (пермутит, цеолит и др.), в качестве анионитов искусственные смолы, например карбамидные.

Соответственно, процессы ионного обмена подразделяются на Н(Na) – катионирование, например:

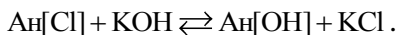
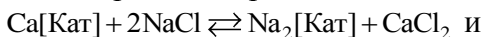


и анионирование, например:



где: [Кат] и [Ан] - не участвующая в обмене матрица ионита.

Поскольку процесс ионного обмена обратим, установление равновесия в системе означает прекращение процесса обессоливания. Поглощающая способность ионита характеризуется его обменной емкостью, равной количеству ионов кальция и магния, которое может поглотить единица объема или массы ионита, выраженное в граммэквивалентах: г-экв/м³ и г-экв/кг. От величины обменной емкости при данном объеме ионита зависит время рабочего цикла ионитовых фильтров. При насыщении ионита он может быть регенерирован промывкой растворами для Н катионитов кислоты, Ма катионитов хлорида натрия и для анионитов раствором щелочи. В приведенных выше примерах работы анионитов при этом протекают реакции:



Полное обессоливание воды обеспечивается ее дистилляцией (термическое обессоливание) обычно после того, как вода предварительно очищена с помощью

ионитовых фильтров.

На рис. 11.6 приведена схема обессоливания воды методом ионного обмена.

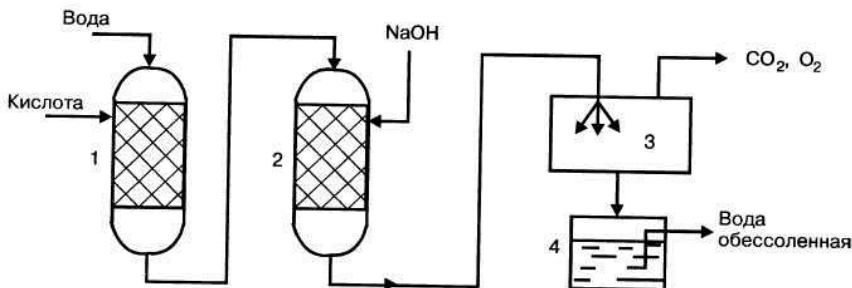


Рисунок 11.6 – Схема установки для обессоливания воды:

1 - катионитный фильтр; 2 - анионитный фильтр;

3 - дегазатор; 4 - сборник очищенной воды

Вода последовательно проходит через катионитный и анионитный фильтры и поступает распыляясь в дегазатор, где из нее удаляются растворенные диоксид углерода, кислород и другие газы. Для регенерации катионита в фильтр периодически подается кислота или раствор хлорида натрия, для регенерации анионита – раствор щелочи.

Электродиализом называется процесс диализа под воздействием электрического поля. При этом выделение солей из диализуемого раствора происходит в результате перемещения ионов через пористые мембраны, содержащие катионит (у катода) и анионит (у анода), с последующим их разрядом на электродах. На рис. 11.7 представлена схема электродиализатора для обессоливания воды.

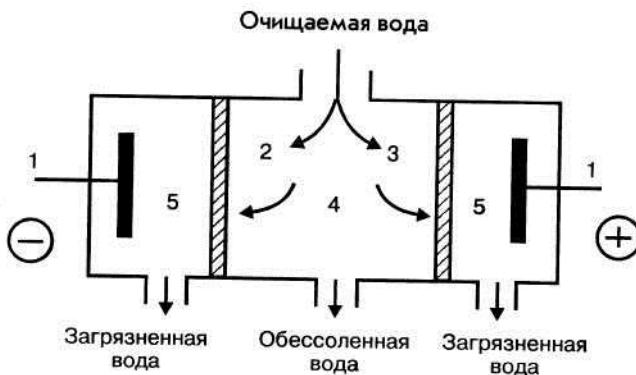


Рисунок 11.7 – Схема электродиализатора:

- 1 - электроды; 2 - катионитовая мембрана; 3 - анионитовая мембрана;
4 - внутренняя камера; 5 - внешние камеры

Одной из основных и обязательных операций водоподготовки технологической воды является ее умягчение.

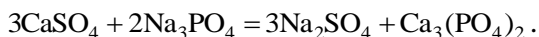
Умягчением называется обработка воды для понижения ее жесткости, то есть уменьшения концентрации ионов Ca^{+2} различными физическими, химическими и физико-химическими методами.

При физическом методе воду нагревают до кипения, в результате чего растворимые гидрокарбонаты кальция и магния превращаются в их карбонаты, выпадающие в осадок:

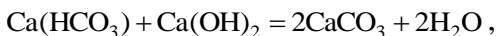


Этим методом удаляется только временная жесткость.

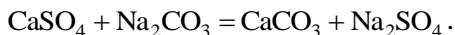
К химическим методам умягчения относятся фосфатный и известкосодовый, заключающиеся в обработке воды тринатрийфосфатом или смесью гидроксида кальция и карбоната натрия. В первом случае протекает реакция образования нерастворимого трикальцийфосфата, выпадающего в осадок:



Во втором случае протекают две реакции. Бикарбонаты кальция и магния реагируют с гидроксидом кальция, чем устраняется временная жесткость:



а сульфаты, нитраты и хлориды — с карбонатом натрия, чем устраняется постоянная жесткость:



Физико-химический метод ионнообменного умягчения воды был описан выше.

Водоподготовка в химическом производстве представляет весьма трудоемкий процесс и требует больших капитальных и эксплуатационных затрат. На современных химических предприятиях доля капитальных затрат на водоподготовку составляет 10-15% общего объема расходов на производство химической продукции.

Современные схемы промышленной водоподготовки включают все основные операции: осветление в грубых и коагуляционных отстойниках, фильтрование через зернистый материал, умягчение методом ионного обмена, дегазацию. На рис. 11.8 представлена подобная схема водоподготовки промышленных вод.

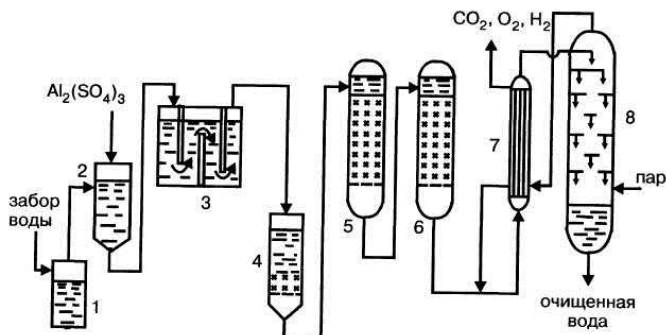


Рисунок 11.8 – Схема подготовки промышленных вод:

- 1 - грубый отстойник; 2 - смеситель коагулянта;
 3 - коагуляционный отстойник; 4 - фильтр; 5 - катионитный фильтр;
 6 - анионитный фильтр; 7 - теплообменник; 9 - деаэратор

Глава XII ЭКОНОМИКА ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

12.1 Техничко-экономические показатели химического производства

Для химической промышленности, как отрасли крупномасштабного материального производства, имеет значение не только технический, но и тесно связанный с ним экономический аспект, от которого зависит нормальное функционирование и развитие производства. Этот аспект рассматривает экономика химической промышленности, то есть наука, изучающая уровень использования всех видов ресурсов химического производства и разрабатывающая на основе его анализа наиболее эффективные пути и методы его организации и развития.

Важнейшим критерием, характеризующим совершенство химического производства, является его экономическая эффективность. Она зависит от мощностей технологических установок, используемых в производстве, на которых вырабатывается продукция, и от научного и технического уровня, на котором осуществляется технологический процесс.

Техничко-экономический уровень химического производства определяется совокупностью *техничко-экономических показателей* (ТЭП). К ним относятся расходные коэффициенты по сырью и энергии, выход готового продукта и степень превращения сырья, селективность процесса, производительность, интенсивность работы аппарата, качество продукции, производительность труда, себестоимость продукции.

ТЭП производства зависят от ряда факторов, характеризующих состояние производства. К ним относятся: возраст предприятия (величина физического и морального износа), техническое состояние оборудования, степень

автоматизации производства, квалификация кадров, уровень организации труда, прогрессивность используемых технологий.

ТЭП отражают возможности предприятия выпускать продукцию заданной номенклатуры и качества, удовлетворяющей требованиям заказчика (ГОСТ, ОСТ, ТУ), и в заданном количестве. Они являются критериями, позволяющими установить экономическую целесообразность организации данного производства и его рентабельность, а также сравнивать по эффективности различные производства одного профиля. ТЭП используются для текущей оценки состояния производства, его планирования и обновления технической базы предприятия.

Расходным коэффициентом (РК) называется количество сырья или энергии каждого вида, затрачиваемое на производство единицы массы или объема готовой продукции. По сырью РК выражается в т/т, $\text{нм}^3/\text{т}$, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$; по энергии соответственно в $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3$.

Выход готового продукта определяется как отношение массы полученного продукта к массе сырья, затраченного на его производство. Для одностадийного процесса, протекающего по схеме $A \rightarrow B$, выход равен

$$\eta_{\text{в}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{а}}} . \quad (12.1)$$

Если в основе процесса лежит химическая реакция, описываемая конкретным уравнением, то для многостадийного процесса по схеме $A \rightarrow B \rightarrow D$ суммарный выход всего процесса равен произведению выходов каждой стадии:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{а}} \cdot \eta_{\text{в}} \dots \eta_{\text{п}} . \quad (12.2)$$

Если в основе процесса лежит химическая реакция, описываемая конкретным уравнением, то для необратимых

реакций выход определяется как отношение массы, полученной на практике $m_{в(пр)}$ к массе, теоретически возможной по стехиометрическому уравнению ($m_{в(теор)}$)

$$\eta = \frac{m_{в(пр)}}{m_{в(теор)}} . \quad (12.3)$$

Выход для обратимой реакции определяется как отношение практически полученной массы продукта к максимально возможной массе его, которая может быть получена в данных условиях производства.

Степень превращения (конверсии) сырья называется отношение массы сырья, вступившего в химическое превращение за время τ , к исходной массе его (m_{a_0})

$$X_a = \frac{m_{a_0} - m_{a_\tau}}{m_{a_0}} , \quad (12.4)$$

где m_{a_τ} - количество сырья, не вступившего в реакцию превращения за время τ .

Выход продукта и степень превращения сырья выражаются в долях единицы или процентах.

Селективностью называется отношение массы целевого продукта к общей массе продуктов, полученных в данном процессе, или к массе превращенного сырья за время τ . Селективность характеризует преобладание одного из направлений процесса, если превращение сырья приводит к образованию нескольких конечных продуктов. Так, если процесс протекает по схеме:



где В - целевой продукт, то селективность по продукту В равна

$$\sigma_B = \frac{m_B}{m_B + m_D} \text{ или } \sigma_B = \frac{m_B}{m_{a0} + m_{at}}. \quad (12.5)$$

Выход продукта, степень превращения сырья и селективность характеризуют глубину протекания химико-технологического процесса, его полноту и направленность в сторону образования целевого продукта.

Производительностью называется количество произведенного целевого продукта или переработанного для его получения сырья в единицу времени:

$$\Pi = \frac{m}{\tau}, \quad (12.6)$$

где m - количество продукта, произведенного за время τ .

Производительность может быть отнесена к отдельному аппарату, технологической линии, цеху, предприятию в целом. Максимально возможная в данных условиях производства производительность называется мощностью. Производительность и мощность выражаются в кг/ч, т/ч, $\text{нм}^3/\text{сутки}$, т/год и т.д. в зависимости от масштабов производства.

Интенсивностью аппарата (машины, реактора) называется его производительность, отнесенная к единице величины, характеризующей размеры рабочей части аппарата - его реакционного объема V или площади сечения S :

$$И = \frac{\Pi}{V} \text{ или } И = \frac{\Pi}{S}. \quad (12.7)$$

Интенсивность — это критерий эффективности работы аппарата. Она позволяет сравнивать по эффективности аппараты различной мощности. Выражается интенсивность, соответственно в $\text{кг}/\text{м}^3$ и $\text{кг}/\text{м}^2$.

Качеством продукции называется совокупность технических, эксплуатационных, экономических и других

свойств, обуславливающих ее пригодность для удовлетворения личных или производственных потребностей в соответствии с ее назначением. Качество продукции измеряется системой показателей, охватывающих различные области использования продукции: надежности, назначения, долговечности, эргономичности и др. Эти показатели задаются Государственными стандартами (ГОСТ) и техническими условиями (ТУ) на продукцию. Применительно к химической продукции их задачами является помимо установления требований к качеству продукции, определение методов ее производства, обеспечение единства методов и средств контроля качества.

12.2 Структура экономики химической промышленности

Важнейшее значение для оценки экономической эффективности производства имеют, помимо рассмотренных выше, такие показатели, как капитальные затраты, себестоимость продукции и производительность труда. Эти показатели тесно связаны между собой и зависят от структуры экономики химического производства, в частности, от удельного веса в ней основных и оборотных фондов и фонда заработной платы.

Основные фонды предприятия являются материально-вещественным выражением средств труда. Они представляют часть средств производства, которая целиком участвует в процессе производства, но потребляется не одновременно, а в течение многих производственных циклов, перенося свою стоимость на готовую продукцию по частям. Основные фонды делятся на основные производственные фонды и основные непроизводственные фонды.

К *основным производственным фондам* относятся здания производственного и вспомогательного назначения, сооружения различного типа (шахты, скважины, эстакады,

бункера, цистерны и т.п.), передаточные устройства для передачи энергии и перемещения жидких и газообразных веществ (электро- и теплосети, газо- и паропроводы и др.), аппараты (реакторы, колонны синтеза, печи, фильтры и т.п.), машины и оборудование, в том числе силовые (генераторы, компрессоры, электродвигатели и др.) и измерительные и регулирующие приборы, транспортные средства (внутрицеховой, межцеховой и внутризаводской транспорт); производственный и хозяйственный инвентарь и инструменты.

Максимальную долю основные фонды составляют в производствах основной химии (до 50%), минимальную — в предприятиях, производящих продукты органического синтеза, красители, пластические массы (3-4%). При этом в целом в химической промышленности доля аппаратов, машин и оборудования в структуре основных производственных фондов достигает 40% и более.

К *основным непроизводственным фондам* относятся объекты, предназначенные для обслуживания населения и непроизводственной сферы деятельности предприятия (жилые дома, больницы, школы и т. п.).

Оборотные фонды являются материально-вещественным выражением предметов труда. Они представляют часть средств производства, которая полностью потребляется в каждом производственном цикле, перенося свою стоимость сразу на готовую продукцию. Оборотные фонды делятся на оборотные производственные фонды и фонды обращения.

Оборотные производственные фонды – это предметы труда, обращающиеся в сфере производства. К ним относятся: сырье, основные и вспомогательные материалы, энергетические затраты, топливо. Оборотные производственные фонды, выраженные в денежной форме, составляют оборотные средства предприятия. По назначению

они делятся на производственные запасы, незавершенное производство и денежные средства. В химической промышленности доля производственных запасов достигает 70%, при этом из них 30% приходится на сырье, основные материалы и полуфабрикаты. Это подчеркивает важность проблемы экономии и рационального потребления сырья в химическом производстве.

Фонды обращения – все средства, функционирующие в сфере обращения. К ним относятся: продукция, готовая к реализации, товары, находящиеся на пути к потребителю и на складах, задолженность, средства расчетов.

Заработная плата представляет часть национального дохода, выплачиваемая в денежном выражении работникам производства в соответствии с количеством и качеством их труда. Сумма денежных средств, выплачиваемая работникам отрасли за определенный период времени, называется фондом заработной платы. В химической промышленности доля заработной платы в себестоимости продукции, вследствие высокой степени механизации и автоматизации непрерывных процессов, составляет в среднем 4%, повышаясь для отдельных производств до 20% и более.

Например, удельный вес рабочих от общего числа занятых составляет в химической промышленности в целом и на основных операциях в % соответственно: на автоматизированных агрегатах 4,4 и 11,6; при механическом труде 43,3 и 67,4; при ручном труде 52,3 и 21% .

Финансовые средства, предназначенные для простого и расширенного воспроизводства основных фондов, характеризуются капитальными затратами.

Капитальными затратами называется сумма всех затрат, произведенных при строительстве данного цеха или предприятия химической промышленности. Они включают затраты на приобретение аппаратов, машин и оборудования (активная часть) и на строительство и монтажные работы

(пассивная часть). Эффективность отдачи капитальных затрат зависит от доли первой активной части их и оценивается таким критерием, как «удельные капитальные затраты», то есть затраты на единицу выпускаемой продукции:

$$P = \frac{K_3}{m}, \quad (12.8)$$

где K_3 - коэффициент затраты в гривнах; m - мощность установки (цеха, предприятия) т/г, следовательно удельные капитальные затраты выражаются в грн/т/год.

С увеличением единичной мощности технологических агрегатов и установок удельные капитальные затраты снижаются в соответствии с зависимостью:

$$P = a \cdot m^{-0.4}, \quad (12.9)$$

где a - коэффициент, зависящий от типа данного производства.

Например, если единичная мощность установки одного и того же производства возрастает в два раза ($m_2 = 2m_1$), то отношение удельных капитальных затрат первого и второго вариантов будет равно:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{a \cdot m_1^{-0.4}}{a \cdot m_2^{-0.4}} = \left[\frac{1}{2} \right]^{-0.4} = 0,76,$$

значит удельные капитальные затраты снизятся на 24%.

Для производства серной кислоты контактным способом определяемый экспериментально коэффициент $a = 8,2 \cdot 10^3$. Тогда уравнение (12.9) принимает вид:

$$P = 8,2 \cdot 10^3 m^{-0.4}. \quad (12.10)$$

Расчет по нему показывает, что переход в производстве серной кислоты с агрегатов мощностью

240 т/сутки (1950 год) к современным установкам мощностью 1500 т/сутки дает экономию в капитальных затратах 36,7%.

Важнейшим экономическим показателем рентабельности производства является себестоимость производимой продукции. *Себестоимостью продукции* называется сумма всех затрат предприятия в денежном выражении, связанных с изготовлением и реализацией единицы массы (объема) производимой им продукции. Затраты предприятия, непосредственно связанные с производством продукции, представляют фабрично-заводскую себестоимость и включают затраты на средства производства, оплату труда и услуг других предприятий, на управление и обслуживание производства. Структура себестоимости продукции химической и нефтехимической отраслей промышленности представлена в табл. 12.1.

Таблица 12.1 – Структура себестоимости химической продукции

Статья расхода	Доля в себестоимости, (%)
Сырье и основные материалы	57,0
Вспомогательные материалы	6,6
Топливо	1,6
Энергия	8,1
Заработная плата и страховка	11,9
Амортизация оборудования	11,0
Прочие расходы	3,8
Всего	100,0

Соотношение затрат по различным статьям себестоимости продукции различных химических производств меняется в широких пределах. Так, например, в производстве экстракционной фосфорной кислоты затраты на сырье достигают 80%, а затраты на зарплату составляют всего 1%. Однако во всех случаях для химической промышленности характерны высокие затраты на сырье.

Аналогично капитальным затратам себестоимость

продукции снижается при увеличении единичной мощности агрегатов в соответствии с зависимостью:

$$S = a \cdot m^b, \quad (12.11)$$

где S - себестоимость продукции, руб./т;

m - мощность агрегата (цеха, предприятия), т/год;

a, b - коэффициенты, причем $b = -0,2$ (до $-0,3$).

Из уравнения (12.11) следует, что при увеличении мощности агрегата вдвое себестоимость продукции составит при $b = -0,2$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{m_1^{-0,2}}{m_2^{-0,2}} = \left[\frac{1}{2} \right]^{-0,2} = 0,87$$

и, следовательно, снижается на 13%.

Результативность полезного конкретного труда, эффективность производительной деятельности людей выражается в производительности труда, показателе, который в условиях промышленного производства характеризует совершенство технологии и организации технологического процесса.

Производительностью труда называется количество продукции, вырабатываемой предприятием в единицу времени на одного рабочего. Она зависит, главным образом, от технологического оснащения производства и мощности установок, поэтому повышение производительности труда связано с внедрением достижений научно-технического прогресса, совершенствованием организации производства, повышением профессионального уровня работников. Для измерения производительности труда используется критерий нормативной трудоемкости, под которой понимают затраты труда промышленно-производственного персонала на производство единицы продукции. При этом различают:

– технологическую трудоемкость, то есть затраты труда основных производственных рабочих;

- цеховую трудоемкость, то есть затраты труда всего персонала цеха;
- общезаводскую трудоемкость, то есть затраты труда всего промышленно-производственного персонала предприятия в целом.

12.3 Материальный и энергетический балансы химического производства

Организация нового химического производства или оценка эффективности действующего, предполагает составление технико-экономического доклада, в котором устанавливается оптимальная мощность производства и другие показатели, характеризующие его деятельность. При этом исходные данные для всех количественных расчетов основываются на материальном и энергетическом балансах. Эти балансы составляются с использованием материально-поточковых графов, отражающих перемещение и трансформацию всех материальных участников технологического процесса. В ходе химического производства происходит непрерывное перемещение и изменение природы принимающих в нем участие веществ (компонентов процесса). Поэтому любое химическое производство можно рассматривать как совокупность материальных потоков участвующих в нем компонентов сырья, промежуточных и побочных продуктов, целевого продукта и отходов производства.

Материальным потоком называется графическое отображение движения и изменения веществ, участвующих в химико-технологическом процессе. Материальный поток выражается в виде *материально-поточкового графа* (МПГ) процесса, то есть графической схемы, в которой отражены природа вещества, направление его перемещения, изменение агрегатного состояния и химического состава. В МПГ различают «узлы», то есть аппараты и машины, и «ребра» - перемещающиеся в процессе вещества. На рис. 12.1

представлен фрагмент подобного материально-потокового графа, где А, В, С и D - компоненты сырья, участвующие в превращениях в ходе химико-технологического процесса.

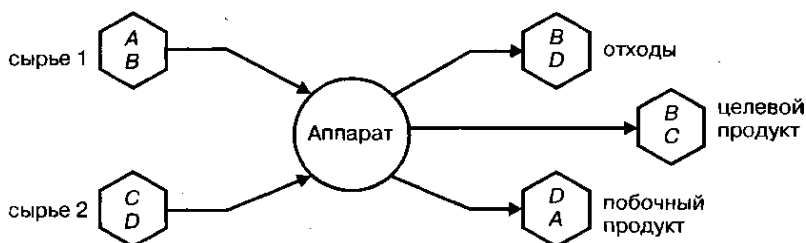
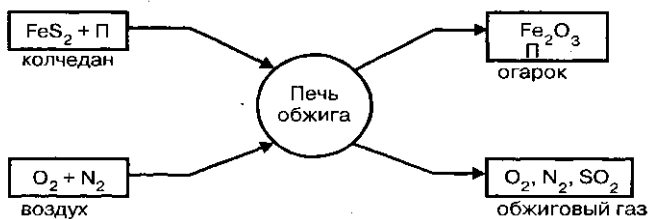


Рисунок 12.1 – Материально-потоковый граф

Например, для процесса обжига железного колчедана при степени превращения равной 1,0 и избытке воздуха сверх стехиометрического количества, МПГ имеет вид:



где П - инертные примеси (порода), не подвергающиеся изменениям в ходе химико-технологического процесса обжига.

Материальные потоки могут быть трех видов:

- расходящиеся, в которых число продуктов в результате процесса возрастает (например, электролиз водного раствора хлорида натрия);
- сходящиеся, в которых число продуктов в результате процесса уменьшается (например, синтез аммиака);
- перекрещивающиеся, в которых число продуктов в результате процесса не изменяется явно (например, приведенный выше обжиг колчедана).

На основе анализа материально-потокowego графа составляется материальный баланс данного процесса, служащий основой для дальнейших расчетов.

Материальный баланс представляет вещественное выражение закона сохранения массы применительно к химико-технологическому процессу: масса веществ, поступивших на технологическую операцию (приход) равна массе веществ, полученных в этой операции (расход), что записывается в виде уравнения баланса $\sum m_{\text{приход}} = \sum m_{\text{расход}}$.

Статьями прихода и расхода в материальном балансе являются массы полезного компонента сырья (m_1), примесей в сырье (m_2), целевого продукта (m_3), побочных продуктов (m_4), отходов производства (m_5) и потерь (m_6), поступивших в производство или на данную операцию:

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4 + m_5 + m_6. \quad (12.12)$$

Материальный баланс составляется на единицу массы целевого продукта или на отдельный аппарат (реактор) и выражается в массовых единицах (кг, т) или массовых долях (μ). Для периодических процессов материальный баланс составляется на одну операцию, для непрерывных процессов - на единицу времени. Результаты расчета материального баланса оформляются в таблицу. Например, для процесса, представленного в виде МПГ на рис. 12.1, таблица материального баланса имеет вид (табл. 12.2).

На основе материального баланса рассчитываются расходные коэффициенты, определяются размеры аппаратов и устанавливаются оптимальные значения параметров технологического режима процесса.

Таблица 12.2 - Материальный баланс

Приход			Расход		
Вещество	кг	μ	Вещество	кг	μ
Сырье 1			Целевой продукт		
A			BC		
B			Побочный продукт		
Сырье 2			AD		
C			Отходы		
D			BD		
			Потери		
Итого		1,0			1,0

В основу *энергетического баланса* положен закон сохранения энергии, согласно которому в замкнутой системе сумма энергий всех видов постоянна. Частным и наиболее распространенным в химическом производстве видом энергетического баланса является тепловой баланс: приход тепла в данной технологической операции равен расходу тепла в ней, что записывается в форме уравнения теплового баланса

$$\sum Q_{\text{приход}} = \sum Q_{\text{расход}}$$

Статьями прихода и расхода в тепловом балансе являются тепловые эффекты реакций ΔH , теплоты фазовых переходов (Q_1), теплосодержание веществ, участвующих в процессе (Q_2), теплота, подводимая в аппарат извне и выводимая из аппарата (Q_3), тепловые потери (Q_4) в данной технологической операции:

$$\Delta H + Q_1 + Q_2 + Q_3 = \Delta H^1 + Q_1^1 + Q_2^1 + Q_3^1 + Q_4^1, \quad (12.13)$$

где индекс (1) относится к статьям расхода.

Тепловые вклады в баланс рассчитывают по известным формулам. Тепловой эффект химической реакции по формуле

$$\Delta H = \sum \Delta H_{\text{продукты реакции}} - \sum \Delta H_{\text{исходные вещества}}, \quad (12.14)$$

в которой значения энтальпии продуктов реакции и исходных веществ берутся из таблиц.

Теплосодержание веществ рассчитывают по формуле

$$Q_2 = m \cdot c \cdot t, \quad (12.15)$$

где m - масса вещества; c - его теплоемкость; t - температура.

Теплоту фазовых переходов рассчитывают по формуле

$$Q_1 = m \cdot q, \quad (12.16)$$

где q - удельная теплота соответствующего фазового перехода (испарения, конденсации, растворения, кристаллизации); m - масса вещества.

Подвод и отвод теплоты в систему рассчитывают по потере тепла теплоносителем по формуле

$$Q_3 = m \cdot C(t_n - t_k), \quad (12.17)$$

где m - масса теплоносителя; C - теплоемкость теплоносителя; t_n и t_k - начальная и конечная температура теплоносителя,

и по формуле теплопередачи через стенку:

$$Q_3 = K_T \cdot F(t_T - t_{np}) \cdot \tau, \quad (12.17)$$

где K_T - коэффициент теплопередачи;

F - поверхность теплообмена;

t_T - температура теплоносителя, обогревающего аппарат;

t_{np} - температура подогреваемого продукта;

τ - время.

Тепловой баланс составляется по результатам материального баланса на единицу производимого продукта или на цикл работы аппарата. Данные теплового баланса используются для определения расхода теплоносителя и хладоагента, расчета поверхности греющих и охлаждающих элементов и подбора оптимального теплового режима процесса.