Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
Институт естественных наук
Химическое отделение

Лекция 1. Введение в дисциплину «Процессы и аппараты химической технологии»

Дополнительные главы процессов и аппаратов химической технологии

Стр. 9-22

г. Якутск, 2021

Общие сведения

Наряду с химическими реакциями, являющимися основой химико-технологических процессов, последние обычно включают многочисленные физические (в том числе механические) и физико-химические процессы.

Технология производства самых разнообразных химических продуктов и материалов включает ряд **однотипных** физических и физико-химических процессов, характеризуемых общими закономерностями.

Процессы и аппараты, общие для различных отраслей химической технологии, получили название основных процессов и аппаратов.

Одним из основных процессов является перегонка (ректификация) — процесс разделения жидких смесей, основанный на различии давления паров компонентов смеси.

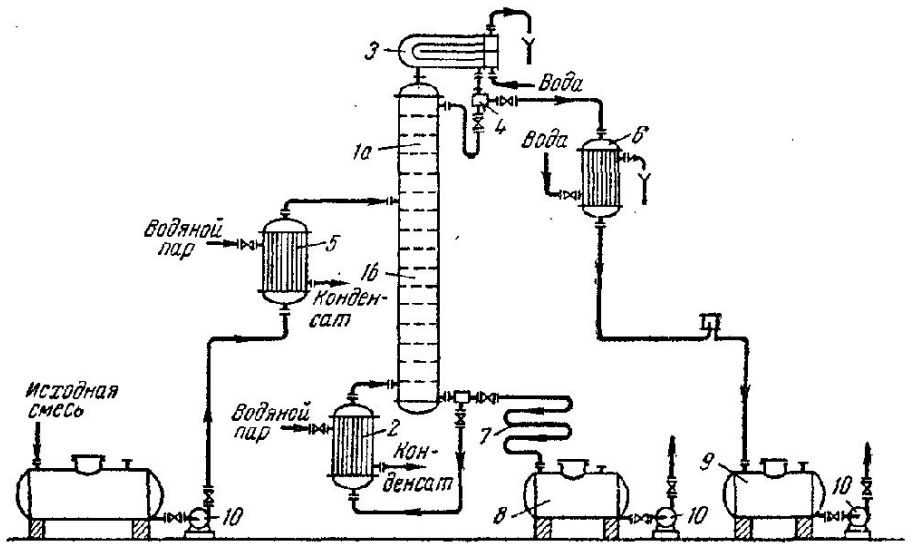

Рис. XII-14. Схема непрерывно действующей ректификационной установки:

1 — ректификационная колонна (а — укрепляющая часть; б — исчерпывающая часть); 2 — кипятильник; 3 — дефлегматор; 4 — делитель флегмы; 5 — подогреватель исходной смеси; 6 — холодильник дистиллята (или холодильник-конденсатор; 7 — холодильник остатка (или нижнего продукта); 8, 9 — сборники; 10 — насосы.

В курсе изучаются теория основных процессов, принципы устройства и методы расчета аппаратов и машин, используемых для проведения этих процессов.

Анализ закономерностей основных процессов и разработка обобщенных методов расчета аппаратов производятся исходя из фундаментальных законов физики, химии, физической химии, термодинамики, экономики и других наук.

Курс строится на основе выявления аналогии внешне разнородных процессов и аппаратов независимо от отрасли химической промышленности, в которой они используются.

В курсе изучаются также закономерности перехода от лабораторных процессов и аппаратов к промышленным.

Знание закономерностей перехода от одного масштаба к другому и переноса данных, полученных на одной системе — модели, на другую систему, представляющую собой объект натуральной величины (моделирование), необходимо для проектирования большинства процессов химической технологии.

Курс «ПиАХТ» является инженерной дисциплиной, представляющей собой важный раздел теоретических основ химической технологии. Этот курс можно охарактеризовать как составную часть комплекса дисциплин, освещающих различные аспекты химической технологии как науки,

История

Химическая промышленность в мире создавалась на рубеже XVIII-XIX веков и за весь своего существования стала одной из ведущих отраслей промышленности.

В России общность ряда основных процессов в химической промышленности высказаны в 1828 г. проф. Ф.А. Денисовым, аналогичные принципы развивались Д.И. Менделеевым, далее идеи развивались в конце XIX века А.К. Крупским и И.А. Тищенко – которые считаются основоположниками курса ПиАХТ.

Классификация основных процессов

Классификация основных процессов химической технологии может быть проведена на основе различных признаков.

В зависимости от основных законов, определяющих скорость процессов, различают:

1. **Гидромеханические процессы**, скорость которых определяется законами гидродинамики — науки о движении жидкостей и газов. К этим процессам относятся перемещение жидкостей, сжатие и перемещение газов, разделение жидких и газовых неоднородных систем в поле сил тяжести (отстаивание), в поле центробежных сил (центрифугирование), а также под действием разности давлений при движении через пористый слой (фильтрование) и перемешивание жидкостей.

2. **Тепловые процессы**, протекающие со скоростью, определяемой законами теплопередачи— науки о способах распространения тепла. Такими процессами являются нагревание, охлаждение, выпаривание и конденсация паров. К тепловым процессам могут быть отнесены . процессы охлаждения до температур более низких, чем температура окружающей среды (процессы умеренного и глубокого охлаждения). Однако вследствие многих специфических особенностей, эти процессы выделены ниже в отдельную группу холодильных процессов,

Скорость тепловых процессов в значительной степени зависит от гидродинамических условий (скоростей, режимов течения)), при которых осуществляется перенос тепла между обменивающимися теплом средами.

3. **Массообменные (диффузионные) процессы**, характеризующиеся переносом одного или нескольких компонентов исходной смеси из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз. Наиболее медленной и поэтому обычно лимитирующей стадией массообменных процессов является молекулярная диффузия распределяемого вещества. К этой группе процессов, описываемых законами массопередачи, относятся абсорбция, перегонка (ректификация), экстракция из растворов, растворение и экстракция из пористых твердых тел, кристаллизация, адсорбция и сушка.

Протекание процессов массообмена тесно связано с гидродинамическими условиями в фазах и на границе их раздела и часто — с сопутствующими массообмену процессами переноса тепла (теплообмена).

4. **Химические (реакционные) процессы**, которые протекают со скоростью, определяемой законами химической кинетики. Однако химическим реакциям обычно сопутствует перенос массы и энергии, и соответственно скорость химических процессов (особенно промышленных) зависит также от гидродинамических условий. Вследствие этого скорость реакций подчиняется законам макрокинетики и определяется наиболее медленным из последовательно протекающих химического взаимодействия и диффузии. Общие закономерности протекания химических процессов и принципы устройства реакторов рассматриваются в специальной литературе и дисциплинах.

5. **Механические процессы,** описываемые законами механики твердых тел. Эти процессы применяются в основном для подготовки исходных твердых. материалов и обработки конечных твердых продуктов, а также для транспортирования кусковых и сыпучих материалов. К механическим процессам относятся измельчение, транспортирование, сортировка (классификация) и смешение твердых веществ.

Особую группу механических процессов составляют процессы переработки химических продуктов в изделия — прессование, литье, экструзия и др. Эти процессы и машины для их проведения специфичны для производств синтетических материалов и рассматриваются в специальных курсах.

По способу организации основные процессы химической технологии делятся на периодические и непрерывные.

Периодические процессы проводятся в аппаратах, в которые через определенные промежутки времени загружаются исходные материалы; после их обработки из этих аппаратов выгружаются конечные продукты. По окончании разгрузки аппарата и его повторной загрузки процесс повторяется снова. Таким образом, периодический процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают в одном месте (в одном аппарате), но в разное время.

Непрерывные процессы осуществляются в проточных аппаратах. Поступление исходных материалов в аппарат и выгрузка конечных продуктов производятся одновременно и непрерывно. Следовательно, непрерывный процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают одновременно, но разобщены в пространстве, т. е. осуществляется в различных частях одного аппарата или же в различных аппаратах, составляющих данную установку.

Известны также комбинированные процессы. К ним относятся непрерывные процессы, отдельные стадии которых проводятся периодически, либо периодические процессы, одна или несколько стадий которых протекают непрерывно.

Преимущества непрерывных процессов:

1) нет перерывов в выпуске конечных продуктов, т. е. отсутствуют затраты времени на загрузку аппаратуры исходными материалами и выгрузку из нее продукции;
2) более легкое автоматическое регулирование и возможность более полной механизации;
3) устойчивость режимов проведения и соответственно большая стабильность качества получаемых продуктов;
4) большая компактность оборудования, что сокращает капитальные затраты и эксплуатационные расходы (на ремонты и пр.);
5) более полное использование подводимого (или отводимого) тепла при отсутствии перерывов в работе аппаратов; возможность использования (рекуперации) отходящего тепла.

В многотоннажных химических производствах имеется тенденция осуществлять преимущественно непрерывные процессы. Периодические процессы сохраняют свое значение главным образом в производствах относительно небольшого масштаба

Непрерывные процессы отличаются от периодических по распределению времени пребывания частиц среды в аппарате. В периодически действующем аппарате все частицы среды находятся одинаковое время, в то время как в непрерывно действующем аппарате времена пребывания их могут значительно различаться.

По распределению времен пребывания различают две теоретические (предельные) модели аппаратов непрерывного действия: идеального вытеснения и идеального смешения.

В аппаратах идеального вытеснения все частицы движутся в заданном направлении, не перемешиваясь с движущимися впереди и сзади частицами и полностью вытесняя находящиеся впереди частицы потока. Все частицы равномерно распределены по площади поперечного сечения такого аппарата и действуют при движении подобно твердому поршню. Время пребывания всех частиц в аппарате идеального вытеснения одинаково.

В аппаратах идеального смешения поступающие частицы сразу же полностью перемешиваются с находящимися там частицами, т. е. равномерно распределяются в объеме аппарата. В результате во всех точках объема мгновенно выравниваются значения параметров, характеризующих процесс. Время пребывания частиц в аппарате идеального смешения неодинаково.

Реальные непрерывно действующие аппараты представляют собой аппараты промежуточного типа.

Процессы могут быть также классифицированы в зависимости от изменения их параметров (скоростей, температур, концентраций и др.) во времени. По этому признаку процессы делятся на **установившиеся (стационарные)** и **неустановившиеся (нестационарные, или переходные).**

В установившихся процессах значения каждого из параметров, характеризующих процесс, постоянны во времени, а в неустановившихся — переменны, т. е. являются функциями не только положения каждой точки в пространстве, но и времени.

Анализ характеристик неустановившихся процессов представляет наибольший интерес для целей автоматического регулирования. В химической технологии неустановившимися являются менее распространенные периодические процессы. Для непрерывных процессов изменение параметров во времени должно учитываться при изменении режима работы и в период пуска установок, однако этот период является кратковременным и в расчете им пренебрегают.

Общие принципы анализа и расчета процессов и аппаратов

Расчеты процессов и аппаратов обычно имеют следующие основные цели:

а) определение условий предельного, или равновесного, состояния системы;

б) вычисление расходов исходных материалов и количеств получаемых продуктов, а также количеств потребной энергии (тепла) и расхода теплоносителей;

в) определение оптимальных режимов работы и соответствующей им рабочей поверхности или рабочего объема аппаратов;

г) вычисление основных размеров аппаратов.

Эти задачи определяют содержание и последовательность расчетов.

1. Исходным этапом являются расчет и анализ статики процесса, т. е. рассмотрение данных о равновесии, на основе которых определяют направление и возможные пределы осуществления процесса.
2. Пользуясь этими данными, находят предельные значения параметров процесса, необходимые для вычисления его движущей силы (см. ниже).
3. Затем составляют материальные и энергетические балансы, исходя из законов сохранения массы и энергии.
4. Последующий этап представляет собой расчет кинетики процесса, определяющей его скорость.
5. По данным о скорости и движущей силе при выбранном оптимальном режиме работы аппарата находят его рабочую поверхность или объем.
6. Зная поверхность или объем, определяют основные размеры аппарата.

Материальный баланс: (закон сохранения массы)

$$\sum G_{н} = \sum G_{к} + \sum G_{п} \qquad (1)$$

Материальный баланс составляют для процесса в целом или для отдельных его стадий.

Баланс составляют либо за единицу времени, например за 1 ч, за сутки (или за одну операцию в периодическом процессе) либо в расчете на единицу массы исходных или конечных продуктов.

На основе материального баланса определяют выход продукта, под которым понимают выраженное в процентах отношение полученного количества (массы) продукта к максимальному, т. е. теоретически возможному.

Энергетический баланс: (закон сохранения энергии)

Проведение химико-технологических процессов обычно связано с затратой различных видов энергии — механической, электрической и др. Эти процессы часто сопровождаются изменением энтальпии системы, в частности, вследствие изменения агрегатного состояния веществ (испарения, конденсации, плавления и т. д.). В химических процессах очень большое значение может иметь тепловой эффект протекающих реакций.

Частью энергетического баланса является тепловой баланс

$$\sum Q_{н} = \sum Q_{к} + \sum Q_{п} \qquad (2)$$

Кроме тепла необходимо учесть другие затраты энергии.

Интенсивность процессов и аппаратов.

Все процессы имеют движущую силу.

В первом приближении можно считать, что результат процесса, характеризуемый, массой М перенесенного вещества или количеством переданного тепла, пропорционален движущей силе (Δ), времени τ и некоторой величине А, к которой относят интенсивность процесса. Такой величиной может быть рабочая поверхность, через которую происходит перенос энергии или массы, рабочий объем, в котором осуществляется процесс, и т. п. Следовательно, уравнение любого процесса может быть представлено в общем виде:

$$M = KA\tau\Delta \qquad (3)$$

Коэффициент пропорциональности К в уравнении характеризует скорость процесса и, таким образом, представляет собой кинетический коэффициент, или коэффициент скорости процесса (коэффициент теплопередачи, коэффициент массопередачи и т. д.). Коэффициент К отражает влияние всех факторов, не учтенных величинами, входящими в правую часть уравнения, а также все отклонения реального процесса от этой упрощенной зависимости.

Под интенсивностью процесса понимают результат его, отнесенный к единице [illegible] величины А

$$\frac{M}{A\tau} = K\Delta \qquad (4)$$

Соответственно величину К можно рассматривать как меру интенсивности процесса — интенсивность, отнесенную к единице движущей силы.

Интенсивность процесса всегда пропорциональна движущей силе Δ и обратно пропорциональна сопротивлению R, которое является величиной, обратной кинетическому коэффициенту (например, гидравлическое сопротивление, термическое сопротивление, сопротивление массопередаче и т. д.). Таким образом, уравнение (3) может быть выражено также в форме:

$$M = \frac{A\,\tau\Delta}{R} \qquad (5)$$

Не менее важными являются технико-экономические характеристики.

От интенсивности процесса следует отличать объемную интенсивность аппарата — интенсивность, отнесенную к единице его общего объема.

С увеличением объемной интенсивности уменьшаются размеры аппарата и снижается расход материалов на его изготовление.

Однако объемная интенсивность может лишь до определенной степени служить мерой совершенства аппарата. Это объясняется тем, что объемная интенсивность аппарата связана с интенсивностью процесса, но с увеличением коэффициента скорости процесса его интенсивность обычно возрастает лишь до известного предела.

Определение основных размеров аппаратов.

Пользуясь уравнением (3), вычисляют основные размеры непрерывно действующего аппарата.

Моделирование и оптимизация процессов и аппаратов.

Исследование процессов и аппаратов в масштабах и условиях промышленного производства является, как правило, сложным, длительным и дорогостоящим. В связи с этим большое значение имеет моделирование— изучение закономерностей процессов на моделях при условиях, допускающих распространение полученных результатов на все процессы, подобные изученному, независимо от масштаба аппарата.

Расчеты сначала велись по системе МКС (метр-килограмм-секунда)

Из МКС возникли МКСА (+сила тока) и МКСК (+температура)

Затем перешли на МКГСС (метр - килограмм-сила - секунда)

Наряду с ней использовалась система СГС (сантиметр-грамм-секунда).

Сейчас применяют СИ и производные от нее величины:

Величина		Единица			
Наименование	Символ размерности	Наименование		Обозначение	
		русское	французское/английское	русское	международное
Длина	L	метр	mètre/metre	м	m
Масса	M	килограмм[К 2]	kilogramme/kilogram	кг	kg
Время	T	секунда	seconde/second	с	s
Сила электрического тока	I	ампер	ampère/ampere	А	A
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	kelvin	К	K
Количество вещества	N	моль	mole	моль	mol
Сила света	J	кандела	candela	кд	cd

Производные единицы, имеющие специальные наименования и обозначения

Величина	Единица		Обозначение		Выражение через основные единицы
	русское наименование	французское/английское наименование	русское	международное	
Плоский угол	радиан[К 3]	radian	рад	rad	$м \cdot м^{-1} = 1$
Телесный угол	стерадиан[К 3]	steradian	ср	sr	$м^2 \cdot м^{-2} = 1$
Температура Цельсия[К 4]	градус Цельсия	degré Celsius/degree Celsius	°C	°C	K
Частота	герц	hertz	Гц	Hz	$с^{-1}$
Сила	ньютон	newton	Н	N	$кг \cdot м \cdot с^{-2}$
Энергия	джоуль	joule	Дж	J	$Н \cdot м = кг \cdot м^2 \cdot с^{-2}$
Мощность	ватт	watt	Вт	W	$Дж/с = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3}$
Давление	паскаль	pascal	Па	Pa	$Н/м^2 = кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-2}$
Световой поток	люмен	lumen	лм	lm	кд·ср
Освещённость	люкс	lux	лк	lx	$лм/м^2 = кд \cdot ср/м^2$
Электрический заряд	кулон	coulomb	Кл	C	А·с
Разность потенциалов	вольт	volt	В	V	$Дж/Кл = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}$
Сопротивление	ом	ohm	Ом	Ω	$В/А = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$
Электроёмкость	фарад	farad	Ф	F	$Кл/В = с^4 \cdot А^2 \cdot кг^{-1} \cdot м^{-2}$
Магнитный поток	вебер	weber	Вб	Wb	$кг \cdot м^2 \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	tesla	Тл	T	$Вб/м^2 = кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Индуктивность	генри	henry	Гн	H	$кг \cdot м^2 \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	siemens	См	S	$Ом^{-1} = с^3 \cdot А^2 \cdot кг^{-1} \cdot м^{-2}$
Активность радиоактивного источника	беккерель	becquerel	Бк	Bq	$с^{-1}$
Поглощённая доза ионизирующего излучения, керма	грей	gray	Гр	Gy	$Дж/кг = м^2/с^2$
Эквивалент дозы ионизирующего излучения	зиверт	sievert	Зв	Sv	$Дж/кг = м^2/с^2$
Активность катализатора	катал	katal	кат	kat	моль/с

Examples of coherent derived units in terms of base units[3]:24

SI derived unit	Symbol	Derived quantity	Typical symbol
square metre	m^2	area	A
cubic metre	m^3	volume	V
metre per second	m/s	speed, velocity	v
metre per second squared	m/s^2	acceleration	a
reciprocal metre	m^{-1}	wavenumber	σ, $\tilde{\nu}$
kilogram per cubic metre	kg/m^3	density	ρ
kilogram per square metre	kg/m^2	surface density	ρ_A
cubic metre per kilogram	m^3/kg	specific volume	v
ampere per square metre	A/m^2	current density	j
ampere per metre	A/m	magnetic field strength	H
mole per cubic metre	mol/m^3	concentration	c
kilogram per cubic metre	kg/m^3	mass concentration	ρ, γ
candela per square metre	cd/m^2	luminance	L_v

Examples of derived units that include units with special names[3]:26

Name	Symbol	Quantity	In SI base units
pascal second	Pa·s	dynamic viscosity	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-1}$
newton metre	N·m	moment of force	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}$
newton per metre	N/m	surface tension	$kg\cdot s^{-2}$
radian per second	rad/s	angular velocity	s^{-1}
radian per second squared	rad/s^2	angular acceleration	s^{-2}
watt per square metre	W/m^2	heat flux density	$kg\cdot s^{-3}$
joule per kelvin	J/K	heat capacity, entropy	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
joule per kilogram kelvin	J/(kg·K)	specific heat capacity, specific entropy	$m^2\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
joule per kilogram	J/kg	specific energy	$m^2\cdot s^{-2}$
watt per metre kelvin	W/(m·K)	thermal conductivity	$m\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot K^{-1}$
joule per cubic metre	J/m^3	energy density	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
volt per metre	V/m	electric field strength	$m\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$
coulomb per cubic metre	C/m^3	electric charge density	$m^{-3}\cdot s\cdot A$
coulomb per square metre	C/m^2	surface charge density, electric flux density	$m^{-2}\cdot s\cdot A$
farad per metre	F/m	permittivity	$m^{-3}\cdot kg^{-1}\cdot s^4\cdot A^2$
henry per metre	H/m	permeability	$m\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
joule per mole	J/mol	molar energy	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot mol^{-1}$
joule per mole kelvin	J/(mol·K)	molar heat capacity, molar entropy	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}$
coulomb per kilogram	C/kg	exposure	$kg^{-1}\cdot s\cdot A$
gray per second	Gy/s	absorbed dose rate	$m^2\cdot s^{-3}$
watt per steradian	W/sr	radiant intensity	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}$
watt per square metre steradian	$W/(m^2\cdot sr)$	radiance	$kg\cdot s^{-3}$
katal per cubic metre	kat/m^3	catalytic activity concentration	$m^{-3}\cdot s^{-1}\cdot mol$

Таблица 1-1. **Единицы измерения величин и переводные множители в единицы СИ**

Расчетная величина	Система единиц	Единица измерения	Переводной множитель в единицу СИ
Длина	СИ	метр (*м*)	—
	МКГСС	метр (*м*)	—
	СГС	сантиметр (*см*)	10^{-2}
Масса	СИ	килограмм (*кг*)	—
	МКГСС	техническая единица массы (т. е. м.) *кгс·сек²/м*	9,81
	СГС	грамм (*г*)	10^{-3}
Сила	СИ	ньютон (*н*)	—
	МКГСС	килограмм-сила (*кгс*)	9,81
	СГС	дина (*дин*)	10^{-5}
Давление	СИ	ньютон на квадратный метр (*н/м²*)	—
	МКГСС	килограмм-сила на квадратный метр (*кгс/м²*)	9,81
	СГС	дина на квадратный сантиметр (*дин/см²*)	10^{-1}
	Внесистемные единицы	бар (*бар*)	10^{-5}
		техническая атмосфера (*ат*, 1 *кгс/см²*)	$9{,}81 \cdot 10^{4}$
		миллиметр водяного столба (*мм вод. ст.*)	9,81
		миллиметр ртутного столба (*мм рт. ст.*)	133,3
Работа, энергия	СИ	джоуль (*дж*)	—
	МКГСС	килограмм-сила-метр (*кгс·м*)	9,81
	СГС	эрг (*эрг*)	10^{-7}
	Внесистемные единицы	ватт-час (*вт·ч*)	3600
		киловатт-час (*квт·ч*)	$3{,}6 \cdot 10^{6}$
		лошадиная сила-час (*л. с·ч*)	$2{,}65 \cdot 10^{6}$
Мощность	СИ	ватт (*вт*)	—
	МКГСС	килограмм-сила-метр в секунду (*кгс·м/сек*)	9,81
	СГС	эрг в секунду (*эрг/сек*)	10^{-7}
Теплота	СИ	джоуль (*дж*)	—
	Внесистемная единица	килокалория (*ккал*)	4190