

Лекции

Теория основных тепловых процессов химической технологии. Тепловой баланс. Промышленные теплоносители. Теплопроводность. Тепловое излучение. Вычисление средней разности температур для прямотока, противотока, перекрестного и смешенного тока теплоносителей

Тепловые процессы

обмен теплом между двумя теплоносителями

Тепловые процессы имеют большое значение в химической промышленности поскольку:

- 1) большинство химических процессов являются эндо- или экзотермическими и, следовательно, управление химико-технологическими процессами (ХТП) в конечном счете сводится к подводу или отводу тепла
- 2) в себестоимости любой продукции химической промышленности стоимость тепловой энергии составляет значительную часть, т.е. эффективная организация тепловых процессов положительно сказывается на эффективности всего производства

Особенности тепловых процессов:

а) широкий диапазон температур теплопереноса (от температур, близких к абсолютному нулю, до несколько тысяч градусов выше нуля)

б) теплоперенос осуществляется в агрессивных средах и при высоких давлениях, что предъявляет особые требования к аппаратурному оформлению этих процессов



Основные характеристики тепловых процессов

- количество передаваемого тепла, от которого зависят размеры теплообменных аппаратов
- основной размер теплообменного аппарата – теплопередающая поверхность (или поверхность теплообмена)

Способы передачи теплоты

Теплопроводность – процесс передачи теплоты внутри тела от одних частиц к другим вследствие их движения и соударений. Передача теплоты происходит только в твердых телах (горячая наружная поверхность стакана с горячим чаем)

Конвекция – процесс распространения теплоты в результате движения объемов и перемещения частиц жидкостей или газов (обогрев комнаты радиаторной батареей)

Теплопередача излучением – перенос энергии, обусловленный процессами испускания, распространения и поглощения электромагнитных волн (люди, животные, растения на Земле существуют благодаря теплоте, получаемой от Солнца))



В реальных процессах все три способа теплообмена обычно сопутствуют друг другу.

В тепловых процессах, осуществляемых в теплообменном аппарате, происходит передача теплоты от одного теплоносителя к другому, причем эти теплоносители в большинстве случаев разделены стенкой.

Перенос теплоты от поверхности твердого тела к газообразной или жидкой среде (или наоборот) называется конвективной теплоотдачей или просто **теплоотдачей**.



Уравнение теплового баланса

Для того, чтобы найти количество теплоты, которое должно быть передано в теплообменном аппарате, необходимо составить уравнение теплового баланса.

В теплообменнике количество теплоты Q_1 , отдаваемое горячим теплоносителем в единицу времени, затрачивается на нагрев (Q_2) холодного теплоносителя, а часть теплоты ($Q_{\text{п}}$), рассеиваемая в окружающую среду, теряется. Соответственно,

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{п}}$$

Количество теплоты, переносимой в единицу времени, называют **ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ**. Если теплоносители не меняют своего агрегатного состояния (не происходит их конденсация и испарение), то уравнение теплового баланса принимает вид

$$G_1 c_1 (T_{1н} - T_{1к}) = G_2 c_2 (T_{2к} - T_{2н}) + Q_{п}$$

где G_1, G_2 – массовые расходы веществ, участвующих в процессе теплообмена, кг/с

c_1, c_2 – удельные теплоемкости этих веществ, Дж/кг·К

$T_{1н}, T_{1к}$ – начальная и конечная температуры горячего теплоносителя, К

$T_{2н}, T_{2к}$ – начальная и конечная температуры холодного теплоносителя, К

$Q_{п}$ – тепловые потери, Вт

Под **удельной теплоемкостью** понимают количество теплоты, сообщаемой 1 кг вещества для изменения его температуры на 1 К.

В тех случаях, когда теплообмен между двумя средами сопровождается фазовым переходом (кипение, конденсация), в уравнениях теплового баланса необходимо учитывать теплоту фазового перехода. Например, для конденсатора, в котором происходит конденсация паров горячего теплоносителя вследствие нагревания холодного теплоносителя, уравнение теплового баланса имеет вид

$$G_1 r_1 = G_2 c_2 (T_{2к} - T_{2н}) + Q_{п}$$

r_1 – удельная теплота конденсации горячего теплоносителя, Дж/кг (количество теплоты, выделяющейся при конденсации 1 кг теплоносителя)

- В зависимости от температурных и других условий проведения процесса применяют различные методы подвода и отвода тепла – для каждого конкретного процесса должен быть выбран тот метод, который оправдывает себя в технологическом и экономическом отношении.
- При подводе тепла применяют различные теплоносители, которые отдают получаемую от источников теплоты энергию в теплообменных аппаратах другому теплоносителю с более низкой температурой.

Греющие (горячие)

теплоносители

- первичные - топочные (дымовые) газы, представляющие собой газообразные продукты сгорания топлива, и электрическая энергия
- вторичные (промежуточные) - тепловая энергия, полученная от первичных теплоносителей и передающаяся нагреваемой среде (насыщенный водяной пар, горячие жидкости, различные высококипящие теплоносители – перегретая вода, органические жидкости и их пары, минеральные масла, жидкие металлы и др.)

- Отвод тепла во многих процессах химической технологии осуществляется с помощью охлаждающих теплоносителей (хладагентов).
- В качестве подобных теплоносителей в большинстве случаев выступают: воздух, вода, растворы солей (рассолы), фреоны.
- Для каждого конкретного случая теплообмена выбор теплоносителя должен быть индивидуален и определяться, прежде всего, величиной температуры нагревания (или охлаждения) и необходимостью ее регулирования.

Общие требования к выбору теплоносителя

- 1) теплоноситель должен обеспечивать высокую интенсивность теплопередачи
- 2) обладать высокими теплофизическими характеристиками (теплоемкость, теплопроводность, высокие коэффициенты конденсации парообразования)
- 3) низкой вязкостью
- 4) теплоноситель должен быть не токсичным, не ядовитым, пожаровзрывобезопасным, дешевым и доступным, термически устойчивым и не обладать корродирующим действием на материал теплообменника
- 5) должен быть доступным и недорогим веществом.

Греющие теплоносители - топочные газы

газообразные продукты сгорания твердого, жидкого или газообразного топлива

Преимущества:

отпадает использование промежуточных теплоносителей, нагрев до 1100°C

Недостатки:

низкий коэффициент теплоотдачи от газа к стенке;
сложность поддержания заданной температуры на заданном уровне;

неравномерность обогрева теплообменной поверхности;
выделение продуктов неполного сгорания, которые осаждаются на теплообменной поверхности, что приводит к увеличению сопротивления, корродирующего действия;
достаточно жесткие условия нагрева за счет высоких перепадов температур между топочными газами и нагреваемой средой

Нагревание

Электрическим током

Осуществляется в электропечах, которые подразделяются на электропечи сопротивления (прямого и косвенного действия) и печи индукционные и высокочастотные, в которых обогрев осуществляется током высокой частоты.

Достоинства: получение любого желаемого температурного режима, который можно легко поддерживать и регулировать.



Водяной пар

самый распространенный промежуточный теплоноситель

Достоинства:

- высокий коэффициент теплоотдачи
- легкость транспортировки на большие расстояния
- возможность точного регулирования температуры за счет изменения давлений
- доступность
- большое количество выделяемого тепла при конденсации
- возможно использовать при температурах до 200°C

Недостатки:

- водяной пар обладает коррозионной способностью,
- при росте температуры растет давление

Вода

можно использовать горячую воду с температурой до 100 °С или перегретую до 300...350 °С

Достоинства:

- дешевизна
- доступность

Недостатки:

- использование перегретой воды требует применения металлоемкой (толстостенной) аппаратуры и довольно сложной арматуры

Высококипящие органические теплоносители (ВОТ)

- органические теплоносители
- ионные теплоносители
- жидкометаллические
теплоносители

Органические теплоносители

глицерин

этиленгликоль

ароматические и неароматические масла
смеси органических веществ (смесь дифениловая)

Температурный диапазон органических теплоносителей достигает 350 °С, при этом давление не меняется, т.е. остается постоянным.

Эти теплоносители не ядовиты и не токсичны, однако являются пожаровзрывоопасными; термически не устойчивы (разлагаются на кокс и газы)



Ионные теплоносители

кремнийорганические жидкости (силиконы)
и расплавы солей или их смесей

В качестве примера можно привести нитрит-нитратную смесь (40 % NaNO_2 , 7 % NaNO_3 , 53 % KNO_3). Предельная температура лежит в области 550 °С и ограничивается термической стойкостью этих теплоносителей. Теплоносители данной группы отличаются малой токсичностью и агрессивностью по отношению к конструкционным материалам



Жидкометаллические теплоносители

жидкие металлы и их сплавы и характеризуются самой высокой термостойкостью (висмут, свинец, ртуть, натрий, литий, олово, кадмий)

Вследствие этого температурный диапазон обогрева находится в области до 2000 °С.

Большинство металлических теплоносителей огне-, пожаро- и взрывобезопасны и практически не воздействуют на малоуглеродистые и легированные стали. Исключение составляют калий и натрий, которые отличаются чрезвычайно высокой химической активностью и воспламеняются со скоростью взрыва. Главным **недостатком** этих теплоносителей является высокая токсичность их паров.

Хладагенты

1) **вода** – самый распространенный агент

В промышленности используется

артезианская вода – температура от 8 до 12 °С;

открытый водоем – температура от 4 до 25 °С;

оборотная вода – 30 °С.

Достоинства:

доступность, дешевизна, термически устойчива

Недостатки:

коррозионная активность,
температурный диапазон зависит от климатических
и временных условий

2) низкотемпературные жидкости

используют для создания температур ниже 5...20 °С, которые обычно не достигаются охлаждением водой.

жидкий аммиак, фреоны, диоксид углерода, холодильные рассолы – водные растворы неорганических солей, например, KCl, NaCl, CaCl (их температурный диапазон зависит от концентрации)

При охлаждении холодильными рассолами и парами низкокипящих жидкостей пользуются холодильными установками



3) **ВОЗДУХ**

по сравнению с водой более доступен, хотя обладает значительно меньшим коэффициентом теплоотдачи и объемной теплоемкости, в современной технологии наблюдается тенденция к замене воды как охлаждающего агента воздухом. Воздух в отличие от воды не загрязняет поверхность теплоотдачи отложениями, не корродирует теплообменную аппаратуру, что положительно сказывается на увеличении срока службы воздушных холодильников.

Наиболее широко воздух в качестве охлаждающего агента используется в смесительных теплообменниках – градирнях, являющихся основным элементом оборудования водооборотного цикла.



Передача теплоты теплопроводностью

•

•

•

Коэффициент теплопроводности показывает, какое количество теплоты проходит вследствие теплопроводности в единицу времени через стенку толщиной 1 м и площадью 1 кв. м при разности температур ее поверхностей 1 К. Размерность этого коэффициента – Вт/м·К

Значение коэффициента теплопроводности зависит от природы вещества и его температуры.



Передача теплоты конвекцией

Различают

Естественную конвекцию – при которой движение частиц вызвано разностью плотностей газа и жидкости в различных точках объема вследствие разности их температур в этих точках.

Принудительную конвекцию – при которой перемещение газа или жидкости осуществляется специальными устройствами – мешалками, вентиляторами, насосами и др.



Согласно закону Ньютона количество теплоты Q , отдаваемой стенкой омываемой ее жидкости (или воспринимаемой стенкой от жидкости) в единицу времени, прямо пропорционально площади S поверхности стенки и разности температур $T_{ст}-T_{ж}$ стенки и жидкости:

$$Q = \alpha S(T_{ст} - T_{ж})$$

α -коэффициент пропорциональности (теплоотдачи)



Коэффициент теплоотдачи

какое количество теплоты передается от 1 кв.м. поверхности стенки к жидкости (или от жидкости к стенке) в течение 1 с при разности температур стенки и жидкости 1 К

Размерность – Вт/кв.м·К

Коэффициент теплоотдачи не является постоянной величиной для данного вещества или материала, а зависит от скорости перемещения жидкости вдоль поверхности теплообмена, размеров и формы этой поверхности, а также плотности, вязкости, теплопроводности, удельной теплоемкости и коэффициента объемного расширения движущейся жидкости.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от этих факторов очень сложна и не может быть установлена теоретическим путем. Поэтому для определения его значений прибегают к экспериментальным исследованиям, а опытные данные обрабатывают **методом теории подобия**, получая зависимости, справедливые для данного класса явлений, в пределах которого возможно обобщение данного отдельного опыта.

Из дифференциальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен, с помощью теории подобия получены определенные комплексы, в которые входят тепловые величины, характеризующие основные случаи переноса теплоты. Эти комплексы называются **критериями подобия**.

К ним относятся:

1) число Рейнольдса

характеризует соотношение между инерционными силами и силами трения в подобных потокам

$$Re = vl\rho/\mu$$

v – скорость движения жидкости, м/с

l – характерный линейный размер, м

ρ – плотность жидкости, кг/куб.м

μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с



2) число Нуссельта

характеризует интенсивность теплообмена на границе между стенкой и средой

$$Nu = \alpha l / \lambda$$

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/кв.м·К

λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/м·К

3) число Пекле

характеризует соотношение между теплотой, переносимой путем конвекции, и теплопроводностью

$$Pe = vl/a$$

a - коэффициент температуропроводности, кв.м/с

4) число Прандтля

характеризует подобие физических свойств теплоносителей в процессах конвективного теплообмена

$$Pr = c\mu/\lambda$$

c – удельная теплоемкость жидкости,
Дж/кг·К

Используя указанные критерии, можно на основании опытных данных находить значения коэффициента теплоотдачи α для отдельных технически важных случаев теплообмена. Для вынужденного турбулентного течения жидкости в прямой трубе, не сопровождающегося изменением ее агрегатного состояния,

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$$

Тогда с помощью формулы, определяющей число Нуссельта, можно найти значение коэффициента α .

При изменении агрегатного состояния вещества (конденсация паров, кипение жидкости) явления теплообмена еще более осложняются. Данные о тепловых величинах, характеризующих частные случаи теплообмена, приводятся в справочниках по теплопередаче.

Передача теплоты излучением

Все тела способны излучать энергию в виде электромагнитных волн. Эта энергия поглощается другими телами, имеющими более низкую температуру, и превращается в теплоту.

Тепловое излучение соответствует инфракрасной, не видимой глазом части спектра электромагнитных колебаний с длиной волны $0,8 \text{ мкм}$.

Твердые тела обладают сплошным спектром излучения. Интенсивность теплового излучения резко возрастает с повышением температуры. При температуре, превышающей $600 \text{ }^\circ\text{C}$, тепловое излучение приобретает доминирующее значение по сравнению с другими способами передачи теплоты.

Физические тела пропускают, отражают и поглощают тепловую энергию. В зависимости от способности тел пропускать, отражать и поглощать тепловую энергию различают

абсолютно прозрачные – пропускают всю поступающую энергию теплового излучения

абсолютно белые – полностью отражают энергию теплового излучения

абсолютно черные – поглощают всю подводимую энергию



Однако в природе не существует тел, обладающих такими идеальными свойствами. Все реальные тела способны лишь частично пропускать, отражать и поглощать подводимую энергию электромагнитного излучения. Их называют **серыми**.

Лучеиспускательная способность серого тела

Согласно закону Стефана-Больцмана лучеиспускательная способность серого тела E пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры T его поверхности и его коэффициенту лучеиспускания $C^{\text{л}}$

$$E = C^{\text{л}} \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Лучепоглощательная и лучеиспускательная способность тел зависит от температуры.



Количество теплоты $Q_{л}$, переданное в единицу времени от более нагретого тела с температурой T_1 к менее нагретому телу с температурой T_2 , позволяет определить следующее уравнение

$$Q_{л} = C_{1-2}^{л} S \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi$$

- $C_{1-2}^{л}$ - коэффициент взаимного излучения, зависящий от взаимного расположения тел, Вт/м \cdot К 4
- S – площадь поверхности излучения, кв.м.
- T_1, T_2 - абсолютные температуры нагретого и нагреваемого тел, К
- φ – угловой коэффициент, зависящий от размеров поверхностей и расстояния между ними

Чтобы защитить от попадания излучения и нагрева какое-либо тело, между ним и излучателем устанавливают экран, изготовленный из материала с хорошими отражательными свойствами.

В отличие от твердых тел многоатомные газы CO_2 , SO_2 и пары воды излучают и поглощают энергию не поверхностью, а объемом.

Кроме того, эти вещества испускают и поглощают электромагнитное излучение не во всем спектре, как твердые тела, а лишь при определенных значениях длины волны, т.е. имеют полосы излучения и поглощения.



Количество теплоты, отдаваемое или воспринимаемое стенкой 1 кв.м. за счет излучения в течение 1 с при разности температур 1 К называется **коэффициентом лучеиспускания α_L** , Вт/кв. м·К

Процесс теплопередачи

В большинстве технологических процессов теплообмен между теплоносителями происходит через некоторую поверхность раздела. Этот вид теплообмена называется **теплопередачей**.

Основное уравнение теплопередачи

Количество теплоты, передаваемой в единицу времени, определяется основным уравнением теплопередачи

$$Q=KS(T_1-T_2)$$

Численное значение **коэффициента K** определяется количеством теплоты, которое передается от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку площадью 1 кв.м в течение 1 с при разности температур теплоносителей 1 К.

- Размерность коэффициента теплопередачи – Вт/кв. м·К •

Коэффициент теплопередачи K

определяется (без учета загрязнений с обеих сторон стенки) через уравнение

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}\right)}$$

α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю соответственно

$\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности стенки

$\delta_{ст}$ - ее толщина

Термическое сопротивление теплопередачи

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется термическим сопротивлением теплопередачи R , а величина $\delta_{ст}/\lambda_{ст}$ - термическим сопротивлением стенки.

$$R = 1/\alpha_1 + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_2$$

Движущая сила тепловых процессов

разность температур взаимодействующих сред

В промышленной аппаратуре теплопередача обычно протекает при переменной температуре теплоносителей.

Значение температуры теплоносителей изменяются вдоль поверхности разделяющей их стенки, поэтому в расчетах используют среднюю разность температур $\Delta T_{\text{ср}}$, которая и должна войти в основное уравнение теплопередачи



Количество теплоты, передаваемое в единицу времени через поверхность при теплообмене, пропорционально средней разности температур. Таким образом, основное уравнение теплопередачи принимает вид

$$Q=KS \Delta T_{\text{cp}}$$

Один из теплоносителей охлаждается от температуры $T_{1н}$ до $T_{1к}$, другой нагревается от $T_{2н}$ до $T_{2к}$.

При прямотоке разность температур теплоносителей на входе в теплообменник $\Delta T_б = T_{1н} - T_{2н}$, а на выходе из теплообменника $\Delta T_м = T_{1к} - T_{2к}$.

При противоточном движении теплоносителей значения $\Delta T_б$ и $\Delta T_м$ находят по начальным и конечным значениям температуры горячего и холодного теплоносителей.



При $\Delta T_b / \Delta T_m < 2$ средняя разность температур определяется как среднеарифметическая величина

$$\Delta T_{cp} = (\Delta T_b + \Delta T_m) / 2$$

При более интенсивном теплообмене в больших значениях разности температур, средняя разность температур будет среднелогарифмической величиной

$$\Delta T_{cp} = (\Delta T_b - \Delta T_m) / \ln(\Delta T_b / \Delta T_m)$$

При перекрестном токе теплоносителей и смешанном токе в многоходовых теплообменниках

$$\Delta T_{\text{ср}} = \varepsilon_T \Delta T_{\text{ср прот}}$$

ε_T – поправочный коэффициент к средней разности температур $\Delta T_{\text{ср прот}}$, рассчитанной для случая противоточного движения теплоносителей

Выпаривание

процесс концентрирования нелетучих или малолетучих веществ путем удаления летучего растворителя в виде пара при температуре кипения

- Выпаривание отличается от испарения тем, что испарение происходит с поверхности при различных температурах (даже ниже температуры кипения), а выпаривание происходит из всего объема кипящего раствора

- Выпаривание используется для повышения концентрации раствора или для получения чистых труднолетучих растворов. Скорость процесса выпаривания определяется скоростью подвода тепла.
- Для осуществления процесса выпаривания необходимо теплоту от теплоносителя передать кипящему раствору, что возможно лишь при наличии разности температур между ними. При расчете процесса выпаривания эту разность температур между теплоносителем и кипящим раствором называют *полезной разностью температур*.

- Тепло для выпаривания можно подводить любыми теплоносителями, применяемыми при нагревании. Однако в большинстве случаев в качестве греющего агента при выпаривании используют насыщенный водяной пар, который называют *греющим, или первичным*.
- Первичным служит пар, получаемый из парогенератора, либо отработанный пар, либо пар промежуточного отбора паровых турбин. Пар, образующийся при выпаривании кипящего раствора, называется *вторичным*.

- Тепло, необходимое для выпаривания раствора, обычно подводят через стенку, отделяющую теплоноситель от раствора. В некоторых случаях концентрирование растворов осуществляют при непосредственном соприкосновении выпариваемого раствора с топочными газами или другими газообразными теплоносителями.
- Таким образом, выпаривание является типичным процессом переноса тепла. Основное отличие процесса выпаривания от тепловых процессов заключается в особенностях его аппаратного оформления и методе расчета выпарных установок.

Процесс выпаривания

МОЖЕТ ПРОВОДИТЬСЯ

ПОД АТМОСФЕРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

ПОД ВАКУУМОМ

ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

- Выбор давления связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара

Под атмосферным давлением

- В случае выпаривания под атмосферным давлением вторичный пар чаще всего выбрасывается в атмосферу и не используется.
- Такой способ является простым, но экономически невыгодным.

Под вакуумом

Выпаривание под вакуумом позволяет уменьшить температуру кипения раствора, поэтому можно выпаривать нетермостойкие растворы, можно выпаривать растворы с высокой температурой кипения, например, растворов щелочей, а также концентрировать растворы с использованием теплоносителя (пара) невысоких параметров; увеличивается полезная разность температур, а следовательно, уменьшается поверхность теплообмена.

Применение вакуума дает возможность использовать в качестве греющего агента, кроме первичного пара, вторичный пар самой выпарной установки, что снижает расход первичного пара и, следовательно, затраты на проведение процесса.

- **Недостатки** - необходимость конденсации вторичного пара и применение вакуум-насоса для откачки неконденсирующегося пара, что ведет к увеличению эксплуатационных расходов и удорожанию установки.

Под избыточным давлением

В случае выпаривания под давлением выше атмосферного вторичные пары имеют повышенные параметры и их можно использовать как для выпаривания, так и для других нужд, не связанных с процессом выпаривания. Если этот пар используется для посторонних нужд, то его называют **экстра-паром**. Отбор экстра-пара позволяет лучше использовать тепло, чем при выпаривании под вакуумом. Однако подобное выпаривание сопряжено с повышением температуры кипения раствора. Поэтому данный способ применяется лишь для выпаривания термостойких веществ. Кроме того, для выпаривания под давлением необходимы греющие агенты с более высокой температурой.



Виды выпаривания

а) простое однокорпусное выпаривание

б) многократное (многокорпусное выпаривание) - это выпарные установки, состоящие из нескольких выпарных аппаратов, или корпусов, в которых вторичный пар каждого предыдущего корпуса направляется в качестве греющего в последующий корпус

в) выпаривание с тепловым насосом, применение которого позволяет сэкономить первичный пар.



Два последних способа энергетически выгодны при больших производительностях (от нескольких кубических метров выпариваемого раствора в час и выше), что характерно для промышленности, где выпаривание проводят по непрерывному принципу.

В аппаратах непрерывного действия обычно создают условия для интенсивной циркуляции раствора, то есть в таких аппаратах гидродинамическая структура потоков близка к модели идеального смешения, поэтому концентрация раствора в таких аппаратах ближе к конечной, что приводит к ухудшению условий теплопередачи.



Периодическое выпаривание проводят при малых производительностях и необходимости упаривания раствора до существенно высоких концентраций.

Процесс выпаривания проводят в выпарных аппаратах (ВА).