

## Лекция №9. Процессы нагревания

Вещества, участвующие в процессе передачи тепла, называются теплоносителями. Теплоносители, имеющие более высокую температуру, чем нагреваемая среда, и отдающие тепло, называют нагревающими агентами.

В качестве прямых источников тепла в химической технологии используют топочные газы, представляющие собой газообразные продукты сгорания топлива, и электрическую энергию. Вещества, получающие тепло от этих источников и отдающие его через стенку теплообменника нагреваемой среде, носят название промежуточных теплоносителей. К числу распространённых промежуточных теплоносителей относятся водяной пар и горячая вода, а также высокотемпературные теплоносители – перегретая вода, минеральные масла, органические жидкости (и их пары), расплавленные соли, жидкие металлы и их сплавы.

Выбор теплоносителя зависит в первую очередь от требуемой температуры нагрева. Промышленный теплоноситель должен обеспечивать достаточно высокую интенсивность теплообмена при небольших массовых и объёмных его расходах. Соответственно он должен обладать малой вязкостью, но высокими плотностью, теплоёмкостью и теплотой парообразования.

## Нагревание “острым” паром

Одним из наиболее широко применяемых греющих агентов является насыщенный водяной пар. В результате конденсации пара получают большие количества тепла при относительно небольшом расходе пара. Теплота конденсации пара составляет  $\approx 2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг (540 ккал/кг) при  $P = 9,8 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup> (1 атм).

Важным достоинством насыщенного пара является постоянство температуры его конденсации, что даёт возможность точно поддерживать температуру нагрева.

Основной недостаток водяного пара – значительное возрастание давления с повышением температуры. Вследствие этого температуры, до которых можно производить нагревание насыщенным водяным паром, обычно не превышает 180-190°C (150-170°C), что соответствует давлению пара 10-12 атм.

Для нагревания используют так называемый “острый”, либо “глухой” пар. Острый пар вводят непосредственно в нагреваемую жидкость, в которой он конденсируется, отдавая теплоту конденсации нагреваемой жидкости, причём конденсат смешивается с жидкостью.

Обогрев острым паром непригоден, если недопустимо смешивание конденсата с нагреваемой жидкостью или её разбавление.

## Нагревание “глухим” паром

При нагревании глухим паром тепло передаётся жидкости через разделяющую их стенку. Пар, соприкасаясь с более холодной стенкой, конденсируется на ней, и плёнка конденсата стекает по поверхности стенки. Для того, чтобы облегчить удаление конденсата, пар вводят в верхнюю часть аппарата, а конденсат отводят из его нижней части.

Расход  $D$  глухого пара при непрерывном нагревании определяют их уравнения теплового баланса:

$$D = GC(t_2 - t_1) + Q_n / (J_{\text{п}} - J_{\text{к}}) \quad (1),$$

где  $G$  – расход нагреваемой среды,

$C$  – средняя удельная теплоёмкость нагреваемой среды,

$t_1, t_2$  – начальная и конечная температуры нагреваемой среды,

$J_{\text{п}}, J_{\text{к}}$  – энтальпии греющего пара и конденсата,

$Q_n$  – потеря тепла в окружающую среду.

Расход острого пара определяют:

$$D = GC(t_2 - t_1) + Q_n / (J_{\text{п}} - C_{\text{в}} t_2)$$

где  $C_{\text{в}}$  – теплоёмкость конденсата.

## Нагревание дымовыми газами

При нагревании дымовыми газами можно достичь температуры  $1000^{\circ}\text{C}$  и выше. Однако, для обогрева дымовыми газами характерны следующие существенные недостатки:

1. Низкий коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам обогреваемых аппаратов ( $\alpha = 15\text{-}30 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}$ ).
2. Малая объёмная удельная теплоёмкость газов ( $C_v = 3,6 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}$ ), что вызывает необходимость пропускания значительных объёмов газа.
3. Неравномерность обогрева вследствие охлаждения газов при отдаче ими теплоты.
4. Вследствие высоких температур топочных газов и трудности их регулирования возможны перегревы нагреваемых продуктов.
5. Загрязнение продукта при передаче теплоты при непосредственном соприкосновении.
6. Нагревание дымовыми газами легколетучих и легковоспламеняющихся материалов опасно.

Дымовые газы образуются при сжигании твёрдого, жидкого или газообразного топлива в топках или печах различной конструкции.

## Нагревание промежуточными теплоносителями

Для большинства химических процессов, протекающих при высокой температуре, требуется проводить равномерный обогрев аппаратуры. В этом случае применяют промежуточные теплоносители (различные жидкости или пары, циркулирующие в системе, воспринимающие теплоту от дымовых газов/или электрического тока) и передающие её к стенке аппарата.

Циркуляция промежуточных теплоносителей в системе может быть естественной или принудительной.

Естественная циркуляция происходит за счёт разности плотностей. Скорость циркуляции при этом составляет 0,2 м/сек. Для обеспечения циркуляции теплообменник должен быть расположен выше печи на 4-5 м. В силу малой скорости циркуляции коэффициент теплопередачи очень низкий. Принудительная циркуляция осуществляется с помощью насоса. В качестве промежуточных теплоносителей применяются минеральные масла, перегретая вода, органические теплоносители, расплавленные соли, ртуть и др. Перегретая вода под давлением, близким к критическому ( $22,1 \text{ Мк/м}^2$  (225 атм)), применяется для нагревания до  $300\text{-}350^\circ\text{C}$  по циркуляционному способу.

## Нагревание промежуточными теплоносителями

Всю систему заполняют при помощи ручного насоса дистиллированной водой. Затем нагревают воду, при нагревании вода расширяется и давление в системе возрастает: давление регулируют, постепенно выпуская воду. Затем температуру доводят до критических параметров -  $374^{\circ}\text{C}$ . Обогрев маслом производят только в том случае, когда нельзя применить другие, более рациональные способы нагревания  $250^{\circ}\text{C}$ . К группе высокотемпературных органических теплоносителей относятся индивидуальные органические вещества: глицерин, этиленгликоль, нафталин и его замещённые, а также некоторые производные ароматических углеводородов (дифенил, дифениловый эфир, дифенилметан и др.). Наибольшее промышленное применение получила дифенильная смесь, состоящая из 26,5% дифенила и 73,5% дифенилового эфира. При  $P = 1$  атм можно нагреть до  $250^{\circ}\text{C}$ .

## Нагревание электрическим током

Нагревание электрическим током производят в электрических печах. В зависимости от способа превращения электрической энергии в тепловую различают электрические печи сопротивления, дуговые и индукционные.

В электропечах сопротивления можно получить температуру 1000-1100°C при равномерном нагреве объёма. Нагревательные элементы выполняют, главным образом, из проволоки или ленты нихрома – сплава никеля, хрома и железа. Пропуская ток через металлическую проволоку, электроэнергия трансформируется в тепловую. При этом выделяется теплота

$$Q = 860W\tau, \text{ ккал}$$

где 860 – количество теплоты в ккал, эквивалентное электрической мощности в 1 кВт · час.

$W$  – мощность нагревателя (кВт), равная произведению силы тока  $J$  (ампер) на напряжение  $V$  (вольт).

$\tau$  - время, ч.

Дуговые печи дают возможность получить температуру до 2000°C и выше.

## Выпаривание

Выпариванием называется процесс концентрирования растворов путём удаления растворителя испарением при кипении жидкости.

Выпаривание применяется для повышения концентрации разбавленных растворов или для выделения из них растворённого вещества путём кристаллизации.

Особенностью процесса выпаривания является переход в парообразное состояние только растворителя. Температура кипения растворов всегда выше температуры кипения растворителей, она зависит от химической природы растворённых веществ и растворителей и растёт с увеличением концентрации растворов и внешнего давления.

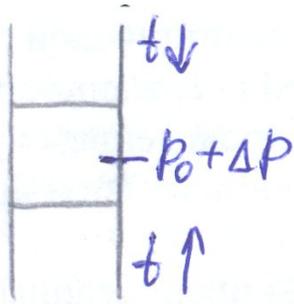
Разность между температурами кипения раствора  $t$  и чистого растворителя при одинаковом внешнем давлении называется температурной депрессией  $\Delta t_g$

$$\Delta t_g = t - t_p \quad (1)$$

Повышение температуры кипения раствора определяется также гидростатической и гидравлической депрессиями.

Повышение температуры кипения за счёт гидростатического давления столба жидкости в вертикальной трубе называется гидростатической депрессией  $\Delta t_{г.д.}$

## Выпаривание



где  $P_0$  – давление в паровом пространстве аппарата  
 $\Delta P$  – гидростатическое давление столба жидкости

Повышение температуры кипения раствора из-за повышения давления в аппарате вследствие гидравлических потерь при прохождении вторичного пара называется гидравлической депрессией  $\Delta t_{\text{гр.д.}}$ . Пар, образующийся при выпаривании кипящего раствора, называется вторичным. При расчётах  $\Delta t_{\text{гр.д.}} = 1^\circ\text{C}$ .

При кипении чистой воды (растворитель) температурный напор равен разности температуры греющего пара и температуры кипящей воды, которая равна температуре насыщения вторичного пара. При кипении раствора температура насыщения вторичного пара, соответствующая давлению в аппарате, не изменяется, а температура кипения раствора повышается на величину депрессии. Следовательно, на ту же величину депрессии уменьшается и температурный напор. Таким образом, депрессия вызывает потерю температурного напора, вследствие чего её называют температурной потерей. Полная депрессия  $\Delta t_{\text{п}}$  равна сумме температурной, гидростатической и гидравлической депрессий.

$$\Delta t_{\text{п}} = \Delta t_{\text{д}} + \Delta t_{\text{г.д.}} + \Delta t_{\text{гр.д.}}$$

Выпаривание сопровождается ростом плотности и вязкости раствора, что ведёт к уменьшению коэффициента теплопередачи.

## Способы выпаривания

Выпаривание производится за счёт теплоты извне, передаваемой чаще всего через поверхность нагрева и реже путём непосредственного контакта раствора с теплоносителем.

В качестве теплоносителей используют водяной пар, а также высококипящие жидкости и их пары и топочные газы.

Процессы выпаривания проводят под вакуумом, при повышенном и атмосферном давлениях. Выбор давления связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.

Выпаривание под вакуумом имеет определённые преимущества перед выпариванием при атмосферном давлении. При выпаривании под пониженным давлением вакуум в аппарате создают за счёт конденсации вторичного пара в конденсаторе вакуум-насосом. Вакуум-выпарка позволяет понизить температуру кипения раствора, а также увеличить разность температуры между греющим агентом и кипящим раствором, что даёт возможность уменьшить поверхность теплообмена.

При выпаривании под повышенным давлением образующийся вторичный пар может быть использован в качестве греющего агента, для отопления или других технологических нужд.

## Способы выпаривания

В промышленности широко применяют как однокорпусные, так и многокорпусные выпарные установки. Многокорпусные выпарные установки состоят из нескольких (до четырёх) соединённых друг с другом аппаратов. Прямоточные установки работают под давлением, понижающимся от первого корпуса к последнему. В таких установках вторичный пар, образующийся в каждом предыдущем корпусе, используют для обогрева последующего корпуса. Свежим паром обогревают только первый корпус. Вторичный пар из последнего корпуса направляют в конденсатор (если этот корпус работает под разрежением) или используют вне установки (если последний корпус работает под повышенным давлением).

В многокорпусных установках осуществляется многократное использование одного и того же количества тепла (тепла, отдаваемого греющим паром в первом корпусе), что позволяет значительно уменьшить количество потребляемого свежего пара, т.е. повысить технико-экономические показатели установки.

Практически расход пара на 1 кг выпаренной воды составляет: в однокорпусной выпарке – 1,1 кг, в двухкорпусной – 0,57 кг, в трёхкорпусной – 0,40; четырёхкорпусной – 0,30, пятикорпусной – 0,27.

## Выпарные аппараты

Выпарные аппараты бывают горизонтальные и вертикальные, которые представляют собой котлы, снабжённые нагревательными рубашками и змеевиками для парового и жидкого обогрева или топками для газового обогрева. Наибольшее распространение в химической промышленности получили вертикальные выпарные аппараты с естественной и принудительной циркуляцией, а также плёночные выпарные аппараты. Выпарной аппарат с естественной циркуляцией раствора состоит из греющей камеры, парового пространства, сепаратора, циркуляционной трубы. Упариваемый раствор циркулирует по трубкам снизу вверх и опускается вниз по циркуляционной трубе. Уменьшение скорости вторичного пара (т.е. увеличение диаметра аппарата) и увеличение высоты парового пространства приводят к уменьшению брызгоуноса.

Необходимый объём парового пространства можно определить по формуле:

$$V = W/d_{\text{масс}}, \text{ м}^3 \quad \text{или} \quad V = W/\rho_{\text{в.п.}} \cdot d_{\text{об}}, \text{ м}^3,$$

где  $W$  – количество выпариваемой воды (вторичного пара), кг/час;  $d_{\text{масс}}$  – допустимое массовое напряжение парового пространства (количество выпариваемой воды на единицу объёма парового пространства в единицу времени),  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ ;  $d_{\text{об}}$  – допустимое объёмное напряжение парового пространства (объём выпариваемой воды на единицу парового пространства в единицу времени,  $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{час}$ );  $\rho_{\text{в.п.}}$  – плотность вторичного пара,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

## Материальный баланс выпарного аппарата

Материальный баланс выпарного аппарата можно представить по всему количеству веществ

$$G_1 = G_2 + W \quad (1)$$

и по растворённому веществу

$$G_1 a_1 = G_2 a_2 \quad (2),$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – начальное и конечное количество раствора,

$a_1$  и  $a_2$  – начальная и конечная концентрация раствора в%,

$W$  – количество выпаренной воды, кг.

Если известны начальное количество раствора  $G_1$ , начальная и конечная концентрации  $a_1$  и  $a_2$ , то

$$G = G_1 a_1 / a_2$$

и количество выпаренной воды

$$W = G_1 - G_2 = G_1 (1 - a_1 / a_2).$$

Если известны  $G_1$ ,  $W$ ,  $a_1$ , то

$$a_2 = G_1 \cdot a_1 / G_2 = G_1 \cdot a_1 / (G_1 - W)$$

и количество конечного раствора  $G_2 = G_1 - W$ .

## Тепловой баланс выпарного аппарата

Приход теплоты в выпарном аппарате складывается из теплоты с поступающим раствором  $G_1 c_1 t_o$  и теплоты, которая отдаётся аппарату нагревающим агентом  $Q$ . Расход теплоты на выпаривание включает: теплоту, уносимую вторичным паром  $W_i$ , теплоту с уходящим раствором  $G_2 c_2 t$ , теплоту, затрачиваемую на дегидратацию  $Q_{\text{дег}}$  потери теплоты в окружающую среду  $Q_{\text{п}}$ . Таким образом, можно написать уравнение теплового баланса:

$$Q + G_1 c_1 t_o = W_i + G_2 c_2 t + Q_{\text{дег}} + Q_{\text{п}},$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – удельные теплоёмкости поступающего  $G_1$  и уходящего  $G_2$  растворов, Дж/кг · К;

$t_o$  и  $t$  – температуры поступающего и уходящего растворов, град;

$i$  – энтальпия вторичного пара, Дж/кг.

Теплота дегидратации представляет собой затрату теплоты на повышение концентрации раствора и она равна по величине и обратно по знаку теплоте парообразования раствора.

## Тепловой баланс выпарного аппарата

Поступающий раствор можно рассматривать как смесь упаренного раствора и испарившейся воды:

$$G_1 c_1 t = G_2 c_2 t + W c_{\text{воды}} t$$
$$G_2 c_2 = G_1 c_1 - W c_{\text{воды}}$$

где  $c_{\text{воды}}$  — удельная теплоёмкость воды.

$$Q + G_1 c_1 t_0 = W i + G_1 c_1 t - W c_{\text{воды}} t + Q_{\text{п}}$$

или

$$Q = G_1 c_1 (t - t_0) + W (i - c_{\text{воды}} t) + Q_{\text{п}}$$

Энтальпия вторичного пара  $i$  принимается равной энтальпии насыщенного водяного пара при давлении в аппарате и находятся по справочным таблицам.

Определив тепловую нагрузку  $Q$  выпарного аппарата и зная температуру конденсата, можно вычислить расход пара.

$Q = D_i - D_{\Theta}$ , где  $D$  — количество пара, кг;  $i$  — теплосодержание пара, Дж/кг  
 $\Theta$  — температура конденсата.

$$D = \frac{G_1 c_1 (t - t_0) + W (i - c_{\text{ф}} t) + Q_{\text{п}}}{i - \Theta}$$

Пренебрегая расходом теплоты на подогрев раствора до температуры кипения  $G_1 c_1 (t - t_0)$  и  $Q_{\text{п}}$ , удельный расход греющего пара определяется по уравнению

$$\frac{D}{W} \approx \frac{i - c_{\text{ф}} t}{i - \Theta}$$