

Лекция 6 «Выпаривание. Определение температурной депрессии. Способы выпаривания. Выпарные аппараты. Тепловой и материальный балансы выпарных аппаратов»

Цель: Охарактеризуйте выпаривание и способы выпаривания. Сформулируйте материальный баланс выпарного аппарата и приведите основные уравнения. Опишите тепловой баланс выпарного аппарата и приведите основные уравнения.

Краткий конспект лекции: *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 Δt_d

$$\Delta t_d = t - t_{\text{раствора}} \quad (1)$$

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 $\Delta t_{г.д.}$.

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

Полная депрессия Δt_n равна сумме температурной, гидростатической и гидравлической депрессий

$$\Delta t_n = \Delta t_d + \Delta t_{г.д.} + \Delta t_{гр.д.} \quad (2)$$

Температура кипения раствора определяется в зависимости от температуры насыщения вторичного пара по формуле

$$T_{\text{кип. р-ра.}} = t_{\text{нас.втор.пара}} + \Delta t_d \quad (3)$$

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.

Выпарные аппараты

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.

При выпаривании малых количеств растворов применяются горизонтальные и вертикальные аппараты, которые представляют собой котлы, снабжённые нагревательными рубашками и змеевиками для парового и жидкого обогрева или топками для газового обогрева.

В химической промышленности наибольшее распространение получили вертикальные выпарные аппараты с естественной и принудительной циркуляцией, а также плёночные выпарные аппараты.

Выпарной аппарат с естественной циркуляцией раствора состоит из греющей камеры **1**, куда поступает пар, плит **2**, в которые завальцованы трубы **3** длиной от 2 до 4 м, парового пространства **4**, сепаратора **5**, циркуляционной трубы **6** (рис. 1).

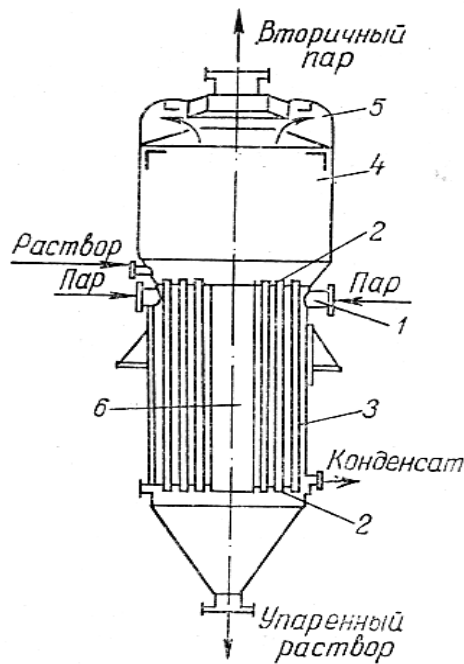


Рис. 1. Выпарной аппарат с естественной циркуляцией

Упариваемый раствор циркулирует по трубкам снизу вверх и опускается вниз по циркуляционной трубе. Циркуляция в аппарате происходит за счет разницы удельных весов жидкости в опускной циркуляционной трубе и парожидкостной эмульсии в кипятильных трубах. Наличие парового пространства **4** над выпариваемым раствором должно обеспечить удовлетворительную сепарацию брызг выпариваемого раствора от вторичного пара.

Недостаточная сепарация брызг ведет к потере раствора, а при многокорпусном выпаривании к загрязнению поверхности нагрева следующего корпуса и конденсата вторичного пара. Уменьшение скорости вторичного пара (т.е. увеличение диаметра аппарата) и увеличение высоты парового пространства приводят к уменьшению брызгоуноса [3].

Материальный баланс выпарного аппарата

Материальный баланс выпарного аппарата можно представить по всему количеству веществ

$$G_1 = G_2 + W \quad (4)$$

и по растворённому веществу

$$G_1 a_1 = G_2 a_2, \quad (5)$$

где G_1 и G_2 – начальное и конечное количество раствора, кг/с; a_1 и a_2 – начальная и конечная концентрация раствора в весовых долях; W – количество выпаренной воды, кг/с.

В приведенные уравнения (4) и (5) входят пять переменных, из которых какие-либо три величины должны быть заданы. В практических расчетах наиболее часто

бывают известными следующие величины: расход исходного раствора G_1 , его начальная концентрация a_1 и требуемая конечная концентрация a_2 упаренного раствора. Тогда по уравнениям (4) и (5) определяют производительность аппарата:

по упаренному раствору

$$G_2 = \frac{G_1 a_1}{a_2} \quad (6)$$

по выпаренной воде

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \left(1 - \frac{a_1}{a_2}\right) \quad (7)$$

Если заданы расход исходного раствора G_1 , его начальная концентрация a_1 и количество выпаренной воды W , то из уравнений материального баланса (4) и (5), можно вычислить конечную концентрацию раствора

$$a_2 = \frac{G_1 a_1}{G_2} = \frac{G_1 a_1}{G_1 - W} \quad (8)$$

и количество конечного раствора

$$G_2 = G_1 - W \quad (9)$$

Тепловой баланс выпарного аппарата

Приход теплоты в выпарном аппарате складывается из теплоты с поступающим раствором $G_n c_n t_n$ и теплоты, которая отдаётся аппарату нагревающим агентом Q .

Расход теплоты на выпаривание включает: теплоту, уносимую вторичным паром $W i_{вт.п}$; теплоту с уходящим раствором $G_k c_k t_k$; теплоту, затрачиваемую на дегидратацию Q_d ; потери теплоты в окружающую среду $Q_{п}$.

Таким образом, можно написать уравнение теплового баланса:

$$Q + G_n c_n t_n = W i_{вт.п} + G_k c_k t_k + Q_d + Q_{п}, \quad (10)$$

где c_n и c_k – удельные теплоёмкости поступающего G_n и уходящего G_k растворов, Дж/(кг·К); t_n и t_k – температуры поступающего и уходящего растворов, °С; $i_{вт.п}$ – удельная энтальпия вторичного пара, на выходе из выпарного аппарата, Дж/кг.

Теплота дегидратации представляет собой затрату теплоты на повышение концентрации раствора и она равна по величине и обратно по знаку теплоте парообразования раствора. Обычно теплота дегидратации невелика и поэтому не учитывается.

Рассматривая исходный раствор как смесь упаренного раствора и подлежащей испарению воды и допуская, что теплоемкость c_n исходного раствора в пределах температуры t_n до t_k остается постоянной, запишем тепловой баланс смешения при температуре кипения раствора в аппарате:

$$G_H c_H t_K = G_K c_K t_K + W c_B t_K \quad (11)$$

Откуда

$$G_K c_K t_K = G_H c_H t_K - W c_B t_K \quad (12)$$

где c_B – средняя удельная теплоёмкость воды (в пределах температур от 0 °С до t_K), Дж/(кг·К).

Подставляя значение (12) в уравнение теплового баланса (10), получим, пренебрегая Q_D :

$$Q + G_H c_H t_H = W i_{\text{вт.п}} + G_H c_H t_K - W c_B t_K + Q_{\text{п}} \quad (13)$$

или

$$Q = G_H c_H (t_K - t_H) + W (i - c_B t_K) + Q_{\text{п}} \quad (14)$$

В этом уравнении член $W(i - c_B t)$ представляет собой расход теплоты на испарение воды.

Входящая в уравнение теплового баланса удельная теплоемкость раствора может быть рассчитана в зависимости от его концентрации a по приближенной формуле

$$c = c_{\text{ТВ}} a + c_B (1 - a), \quad (15)$$

где $c_{\text{ТВ}}$ – удельная теплоемкость безводного твердого растворенного вещества (для двухкомпонентных растворов).

Теплоемкость растворов (многокомпонентных) может быть вычислена по общей формуле

$$c = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3, \quad (16)$$

где c_1, c_2, c_3 – теплоемкости компонентов; x_1, x_2, x_3 – массовые доли компонентов.

При отсутствии непосредственных экспериментальных данных удельную теплоемкость химического соединения можно приближенно рассчитать по правилу аддитивности:

$$c = \sum_i n_i c_{a,i} / M, \quad (17)$$

где n_i и $c_{a,i}$ – число атомов и атомная теплоемкость i -го элемента (табл. 1), входящего в химическое соединение; M – молярная масса соединения, кг/кмоль.

В таблице 1 приведены теплоёмкости элементов.

Таблица 1. Атомная теплоемкость элементов

Элемент	Атомная теплоемкость элементов для химических соединений, кДж/(кг·атом·К)		Элемент	Атомная теплоемкость элементов для химических соединений, кДж/(кг·атом·К)	
	в твердом состоянии	в жидком состоянии		в твердом состоянии	в жидком состоянии

C	7,5	11,7	F	21,0	29,3
H	9,6	18,0	P	22,6	31,0
B	11,3	19,7	S	22,6	31,0
Si	15,9	24,3	Остальные	26,0	33,6
O	16,8	25,1			

Для приближенного расчета удельной теплоемкости разбавленных водных растворов ($x \leq 0,2$) можно не учитывать теплоемкость растворенного вещества ввиду ее относительной малости:

$$c = 4,19 \cdot 10^3 (1 - x), \quad (18)$$

где $4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воды.

Необходимый расход греющего водяного пара ($G_{г.п}$) для выпарного аппарата пропорционален требующемуся количеству теплоты:

$$G_{г.п} = \frac{q}{(i'' - i')x} = \frac{q}{r_{г.п}x}, \quad (19)$$

где i'' и i' – удельные энтальпии сухого насыщенного греющего пара и его конденсата при температуре конденсации, Дж/кг; x – степень сухости (паросодержание) греющего пара (в большинстве случаев $x \approx 0,95 \div 0,98$; $r_{г.п}$ – удельная теплота конденсации греющего пара, Дж/кг.

Удельный расход греющего пара (d) характеризует эффективность использования греющего пара по отношению к количеству выпариваемого растворителя [1-3]:

$$d = \frac{G_{г.п}}{W} \quad (20)$$

Вопросы для самоконтроля:

1. Охарактеризуйте выпаривание и способы выпаривания.
2. Сформулируйте материальный баланс выпарного аппарата и приведите основные уравнения.
3. Опишите тепловой баланс выпарного аппарата и приведите основные уравнения.

Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 392 с. – 40 экз.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.