

Процессы и аппараты химической и биотехнологии часть 2 (1)

Лекции – 36 час.

Практика – 18 час.

Лабор. Работы – 18 час.

Теплообменные процессы

Выпаривание (2)

- Выпаривание — это процесс концентрирования растворов нелетучих веществ путем удаления части летучего растворителя в виде паров (как правило, это вода).
- В промышленных условиях выпаривание обычно проводится при кипении, т.е. в условиях, когда давление пара над раствором равно давлению в рабочем объеме аппарата.

Аппараты для выпаривания (3)

- Выпаривания осуществляется в выпарных аппаратах, гл. составными частями которых являются греющая камера и сепаратор, Нагревание раствора производится путем передачи тепла в греющей камере раствору от греющего агента через стенку разделяющую их.
- Греющими агентами являются: топочные газы, ВОТ (высокотемпературные органические теплоносители) и чаще всего насыщенный водяной пар

Влияние давления на процесс выпаривания (4)

- Водяной пар, который используют как греющий агент называют первичным паром.
- Пар, образующийся над кипящим раствором при выпаривании, называется вторичным.
- Процессы выпаривания проводят под вакуумом, при повышенном и атмосферном давлениях. Выбор давления связан со свойствами раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.

Применение выпаривания (5)

- Выпаривание используется в производстве кормовых дрожжей, солей, термического обезвреживания промышленных стоков. В микробиологической промышленности выпаривание ведут для концентрирования растворов антибиотиков, аминокислот, ферментов, витаминов и др. веществ.

Продолжение слайда 5(6)

- В пищевой промышленности выпаривание используют в сахарном, консервном, кондитерском и молочном производствах – для получения сахарных и витаминных сиропов, фруктовых и томатных соков, сгущения молока.
- Выпариванию подвергаются водные растворы.

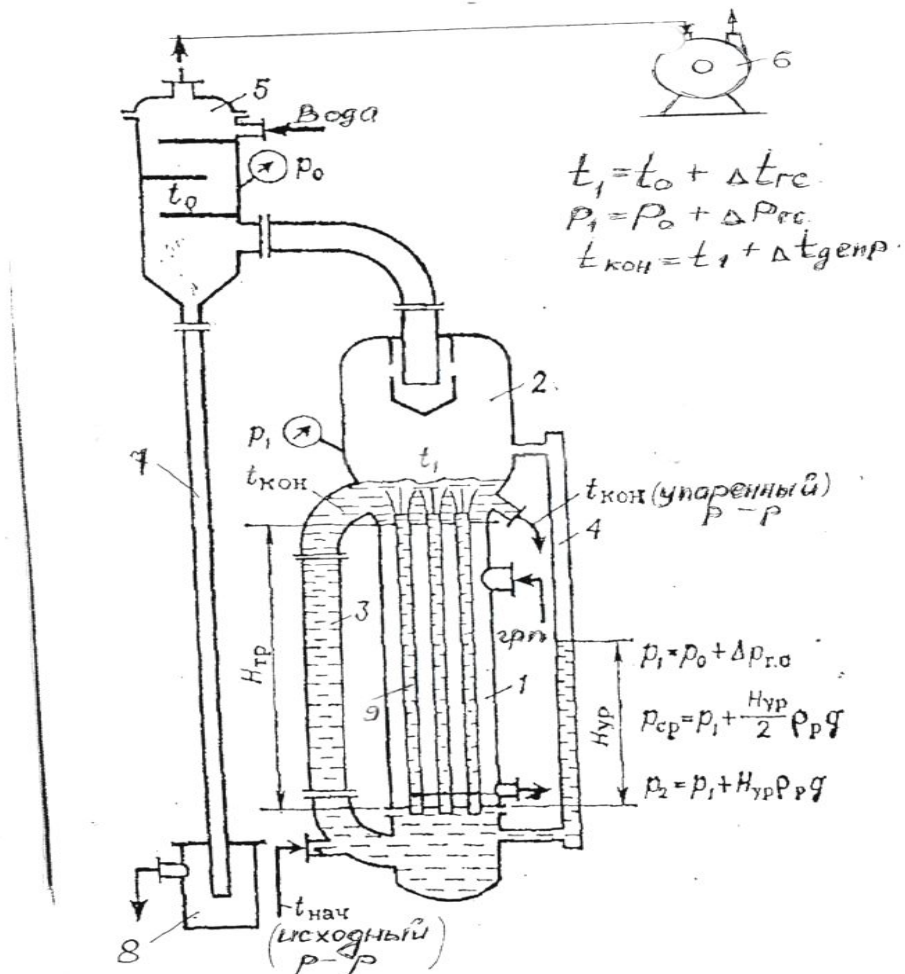
Влияние давления на процесс выпаривания (7)

- При выпаривании:
- под вакуумом становится возможным проводить процесс при более низких температурах, что важно при концентрировании растворов термически нестойких веществ.
- под давлением выше атмосферного можно использовать вторичный пар, как греющий для выпаривания при более низкой температуре, так и для других нужд. Вторичный пар, отбираемый на сторону, называют экстра-паром.
- под атмосферным давлением вторичный пар не используется, а обычно удаляется в атмосферу.

Классификация вакуум-выпарных установок (8)

- – по принципу действия: непрерывные и периодические
- - по числу корпусов: одно и – многокорпусные
- – по типу конденсаторов: с поверхностными конденсаторами и конденсаторами смешения.
- – по виду греющего агента - паровые, аммиачные
- – в зависимости от характера движения раствора в аппарате выпарные аппараты делятся: с естественной циркуляцией, принудительной циркуляцией и пленочные (без циркуляции).

Схема непрерывно действующей вакуум-выпарной установки с конденсатором мешения (9)



Составные части выпарного аппарата(10)

- 1–греющая камера, 2-сепаратор, 3-циркуляционная труба, 4 –водомерное стекло, 5- барометрический конденсатор, 6– вакуум насос, 7 – барометрическая труба, 8 – барометрический ящик, 9 кипятильные трубы.

Принцип действия выпарной установки (11)

- Упариваемый раствор, нагретый предварительно в теплообменнике, поступает в трубное пространство 9 греющей камеры 1. В межтрубное пространство подается греющий пар. Получая тепло конденсации пара через стенку, раствор кипит в трубках 9, образуя парожидкостную смесь ρ плотностью меньше плотности жидкости.

Продолжение сл.11(12)

- Парожидкостная смесь выбрасывается в сепаратор 2, где разделяется на жидкость и вторичный пар. Часть жидкости опускается по циркуляционной трубе 3, а часть выводится в качестве упариваемого готового продукта из сепаратора 2.

Продолжение сл.12(13)

- В аппарате происходит циркуляция раствора по контуру: кипяtilьные трубы – сепаратор– циркуляционная труба – кипяtilьные трубы. Причиной циркуляции является разность гидростатических давлений (плотностей) парожидкостной смеси в кипяtilьных трубках и раствора в циркул. трубе. $P = \rho H$.

Продолжение сл.13(14)

- Барометрический конденсатор 5 служит для конденсации вторичного пара, который поступает из сепаратора. Конденсация осуществляется водой. Для лучшего контакта пара и воды в конденсаторе установлены горизонтальные полки. Смесь конденсата и воды сливается через барометрическую трубу 7 в барометрический ящик 8.

Создание вакуума в аппарате(15)

- Вакуум в аппарате создается за счет конденсации вторичного пара, т.к. объем полученный при конденсации вторичного пара примерно в 800 раз меньше объема пара.
- За конденсатором 5 устанавливается вакуум-насос 6, позволяющий удалить воздух из конденсатора и поддерживать устойчивый вакуум в аппарате. Воздух попадает в аппарат с раствором, с водой и через неплотности в соединениях.

Движущая сила процесса выпаривания (16)

- Процесс выпаривания – теплообменный процесс и движущей силой является разность температур:
- Общая разность температур -
(1) - $\Delta t_{\text{ОБЩ.}} = t_{\text{ГР.П}} - t_{\text{ВТ.П}}$
- Полезная разность температур –
(2) $\Delta t_{\text{ПОЛ.}} = t_{\text{ГР.П}} - t_{\text{КИП.Р-РА}}$
- Температура кипения раствора -
(3) $t_{\text{КИП.Р-РА}} = t_{\text{ВТ.П}} + \sum \Delta t$
- Вставив 3 в 2 получим -
(4) $\Delta t_{\text{ПОЛ.}} = t_{\text{ГР.П}} - (t_{\text{ВТ.П.}} + \sum \Delta t)$
- Где $\sum \Delta t$ – сумма температурных потерь.

Температурные потери (17)

- Температурные потери включают 3 составляющих:

- (5)
$$\sum \Delta t = \Delta t_{Г.С.} + \Delta t_{ДЕПР.} + \Delta t_{Г.ЭФ.}$$

- $\Delta t_{Г.С.}$ – гидравлическая депрессия, или изменение температуры вторичного пара на участке сепаратор – барометрический конденсатор, вызванное падением давления из-за гидравлического сопротивления паропровода вторичного пара.

Гидравлическая депрессия (18)

- ,
$$\Delta t_{Г.С.} = t_1 - t_0 \quad (6)$$

- отсюда ,
$$t_1 = t_0 + \Delta t_{Г.С.} \quad (7)$$

- $$\Delta p = p_1 - p_0 \quad (8)$$

- где t_0, p_0 - температура и давление вторичного пара в барометрическом конденсаторе

- t_1, p_1 - температура и давление вторичного пара в сепараторе

- $\Delta t_{Г.С.}$ принимается равной 0,5 – 1,5 К.

- Температура кипения раствора в сепараторе, при которой упаренный (конечный) раствор выводится из аппарата:

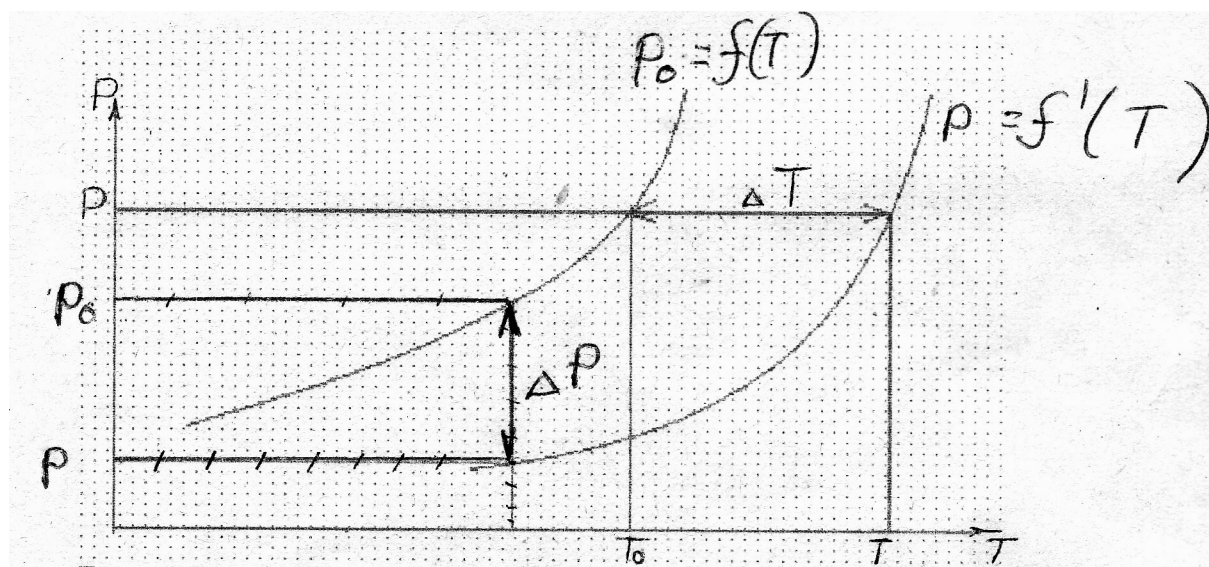
- (9)
$$t_{КОН.} = t_1 + \Delta t_{ДЕПР.}$$

Температурная депрессия(19)

- $\Delta t_{ДЕПР.}$ – температурная депрессия, выражающая повышение температуры кипения раствора по сравнению с температурой кипения чистого растворителя (воды) при том же давлении.

- $$\Delta t_{ДЕПР.} = t_{P-РА} - t_{P-ЛЯ} \quad (10)$$

Продолжение слайда 19(20)



• Рис.2.

Температурная депрессия(21)

- 1атм кипит при 105°C.
- Температурную депрессию определяют по справочным таблицам, составленным по опытным данным, которые получены при атмосферном давлении. Величину температурной депрессии при любом давлении для разбавленных растворов можно получить, пользуясь уравнением Тищенко И. А.

- $$\Delta t_{\text{темн.р}} = 1,62 \cdot 10^{-2} \frac{T^2}{r} \cdot \Delta t_{\text{темн.атм}} \quad (11)$$

- $\Delta t_{\text{темн.атм}}$ — температурная депрессия при атмосферном давлении, °К.
- T и r — температура кипения чистого растворителя (К) и его теплота испарения при данном давлении в кДж/кг

Гидростатическая депрессия(22)

- $\Delta t_{Г.ЭФ}$ - гидростатическая депрессия, связанная с тем, что нижележащие слои жидкости находятся под большим давлением и кипят при большей температуре.
- , $\Delta t_{Г.ЭФ} = t_{КИП.Р-РА} - t_{КОН.}$ $t_{КИП.Р-РА} = t_{КОН.} + \Delta t_{Г.ЭФ}$ или
- $p_{СР} = p_1 + \rho g H_{УР}$ (12)
- где $t_{КИП.Р-РА}$ $p_{СР}$ – температура кипения и давление раствора в среднем слое в трубках
- $t_{КОН.}$ - температура кипения раствора в сепараторе.

Правило БАБО (23)

- Используют для определения температуры кипения и температурной депрессии при любом давлении.
- $$\left(\frac{p}{p_0}\right)_t = K = const \quad (13)$$
- Отношение давления насыщенного пара над раствором (p) к давлению над чистым растворителем (p_0) при одной и той же температуре есть величина постоянная

Пример (24)

- Определить температуру кипения 25 % р-ра Са Cl₂ при абс давлении 0,36 кгс/см² .
- Известна температура кипения при 1 атм(p₀) (справочная величина) для хлористого Са. Составляет 107,50С. По этой температуре находим по табл. нас. вод. пара (p) –1,345 кгс/см² .
$$\left(\frac{1,033}{1,345}\right)_{107,5} = \left(\frac{0,36}{p}\right) = 0,77$$
- Отсюда находим p –0,467 кгс/см².

Продолжение примера (25)

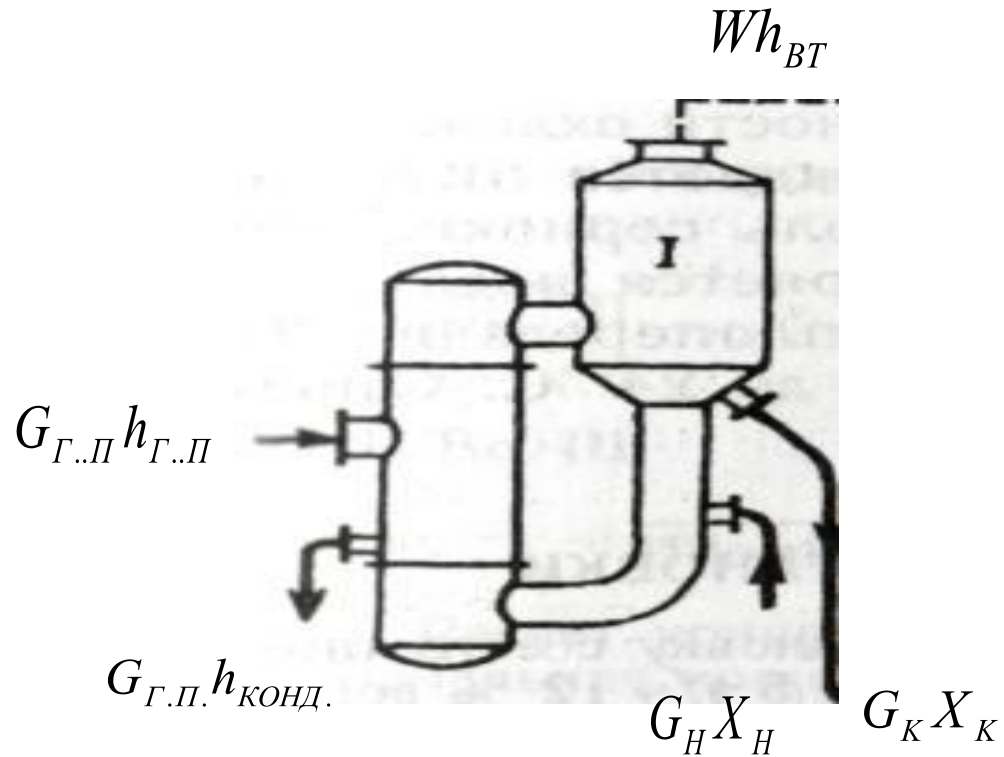
- Этому давлению соответствует температура кипения воды (табл. Св-ва нас. вод пара)–79,20 С. Это и есть температура кипения 25 % р-ра Са Cl₂.

$$\left(\frac{0,36}{0,467} \right)_{79,2} = 0,77$$

Теплоемкость растворов (26)

- Теплоемкость растворов является функцией температуры и концентрации растворенного вещества.
- Приближенные значения удельной теплоемкости для водных растворов с концентрацией растворенного вещества ниже 20% масс. Можно определить по формуле:
 - — $C = C_g(1 - \bar{x}) = 4,19 \cdot (1 - \bar{x})$ (14)
 - \bar{x} — массовая доля растворенного вещества
 - C_g — удельная теплоемкость воды, кДж/кг · К°.

Материальный баланс (27)



Обозначения (28)

- G_n, G_k - расход соответственно исходного, упаренного раствора (производительность) кг/с
- X_n, X_k - массовая доля растворенного вещества соответственно в исходном, упаренном растворе.
- W - расход выпариваемого растворителя (производительность), кг/с (вторичный пар)

Материальный баланс аппарата : (29)

• Общий: $G_H = G_K + W$ (16)

• По растворенному веществу: (17)

$$G_H x_H = G_K x_K$$

Производительность аппарата по конечному упаренному раствору составит (18)

$$G_K = \frac{G_H x_K}{x_H}$$

по выпариваемой воде: (19)

$$W = G_H - G_K = G_H \left(1 - \frac{x_H}{x_K} \right)$$

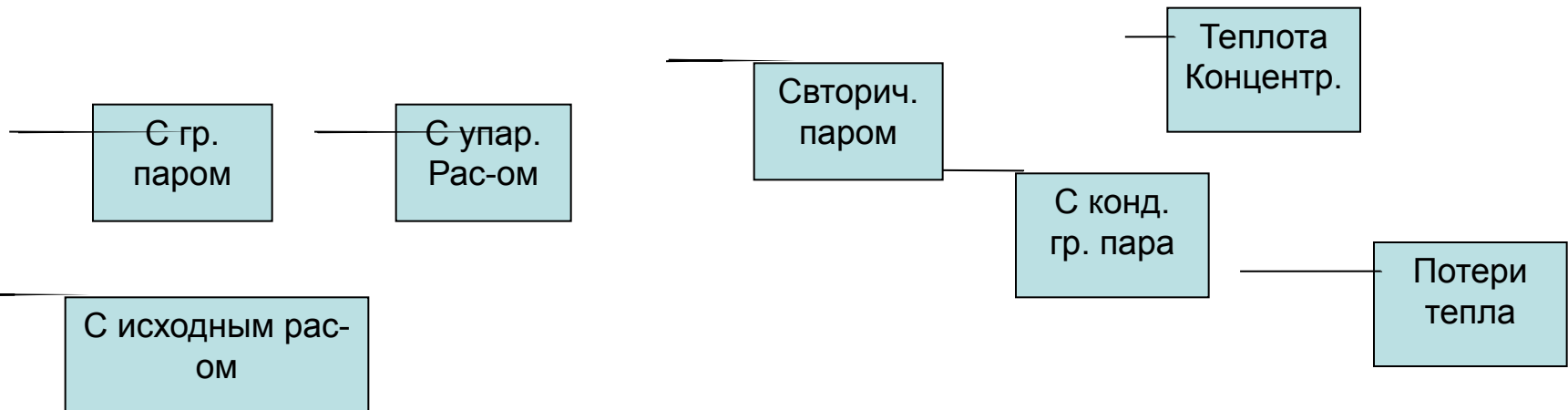
Тепловой баланс (30)

Уравнение (20)

Приход тепла

Расход тепла

$$G_H h_H + G_{zn} h_{zn} = G_K h_K + W \cdot h_{вт} + G_{zn} h_{конд} + Q_{конц} + Q_{пот}$$



Обозначения (31)

- $G_{г.п.}$ - расход греющего пара, кг/с
- $h_{г.п.}$ - энтальпия греющего пара, кДж/кг
- $h_{вт}$ - энтальпия вторичного пара, кДж/кг
- $h_n = C_n t_n$ - энтальпия исходного раствора, кДж/кг
- $h_k = C_k t_k$ - энтальпия конечного упаренного раствора, кДж/кг
- $h_{конд} = C_{конд} \theta_{конд}$ - энтальпия конденсата греющего пара, кДж/кг.
- $C_n, C_k, C_{конд}$ - средние удельные теплоемкости исходного, конечного раствора и конденсата от 0° до температуры жидкости
- t_n, t_k, θ - температуры исходного, конечного растворов и греющего пара, $^\circ\text{C}$

Тепловой баланс однокорпусной установки (32)

- Рассмотрим исходный раствор как смесь упаренного раствора и воды, подлежащей удалению.
- С учетом $h = ct$ при температуре кипения тепловой баланс смешения можно записать:

- $$G_H C_H t_K = G_K C_K t_K + W \cdot C'' \cdot t_K \quad (21)$$

- C'' - средняя удельная теплоемкость воды в пределах от 0 до t_K
- отсюда:

- $$G_H C_H = G_K C_K + W \cdot C'' \quad (22)$$

Тепловой баланс (33)

- Перепишем ур-ие (20) с учетом (22) :

$$G_H C_H t_H + G_{гн} h_{гн} = G_K C_K t_K - W \cdot C'' \cdot t_K + W \cdot h_{вт} + G_{гн} C_{конд} \theta + Q_{конц} + Q_{пот}$$

- (23)
- Из уравнения (23) определим количество тепла, подводимого в единицу времени с теплоносителем (греющим паром) или тепловую нагрузку Q аппарата:

Тепловая нагрузка на греющую камеру(34)

$$Q = G_{гн} (h_{гн} - C_{кон} \theta) = G_H C_H (t_K - t_H) + W (h_{вт} - C'' \cdot t_K) + Q_{конц} + Q_{ном}$$

Приход тепла
(теплота
конденсации
греющего пара)

Расход тепла
На нагрев исходного
раствора от начальной
температуры до
температуры кипения

Расход тепла
На испарение
растворителя
(воды)

(24)

Расход греющего пара на выпаривание (35)

- Потери в окружающую среду составляют 3-5% от Q. Расход греющего пара определяем из ур-ия (24).

$$G_{г.п.} = \frac{1,05 [G_H C_H (t_K - t_H) + W (h_{вт.п.} - C'' \cdot t_K) + Q_{конц}]}{h_{г.п.} - C_{конд} \theta} \quad (25)$$

Расход греющего пара (36)

- Если пренебречь $Q_{\text{конд}}$ и $Q_{\text{пот}}$ и считать, что раствор поступает в аппарат при t_k :

$$G_{г.п.} = \frac{W(h_{вт.п.} - C'' \cdot t_k)}{h_{г.п.} - C_{\text{конд}} \theta} = \frac{W \cdot r_{вт.п.}}{r_{г.п.}} \quad (26)$$

- $r_{г.п.}$ $r_{вт.п.}$ -
- - удельная теплота конденсации гр. пара и испарения воды из кипящего раствора, кДж/кг

Поверхность греющей камеры (37)

- Определяется из основного уравнения

теплопередачи: $F = \frac{Q}{K \Delta t_{пол}}$ (27)

$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \frac{\delta}{\lambda}}$ (28)

$$\Delta t_{пол} = t_{гр.н} - t_{кип.}$$

- α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке
- и от стенки к кипящему раствору, $\left[\frac{Вт}{м^2 К} \right]$

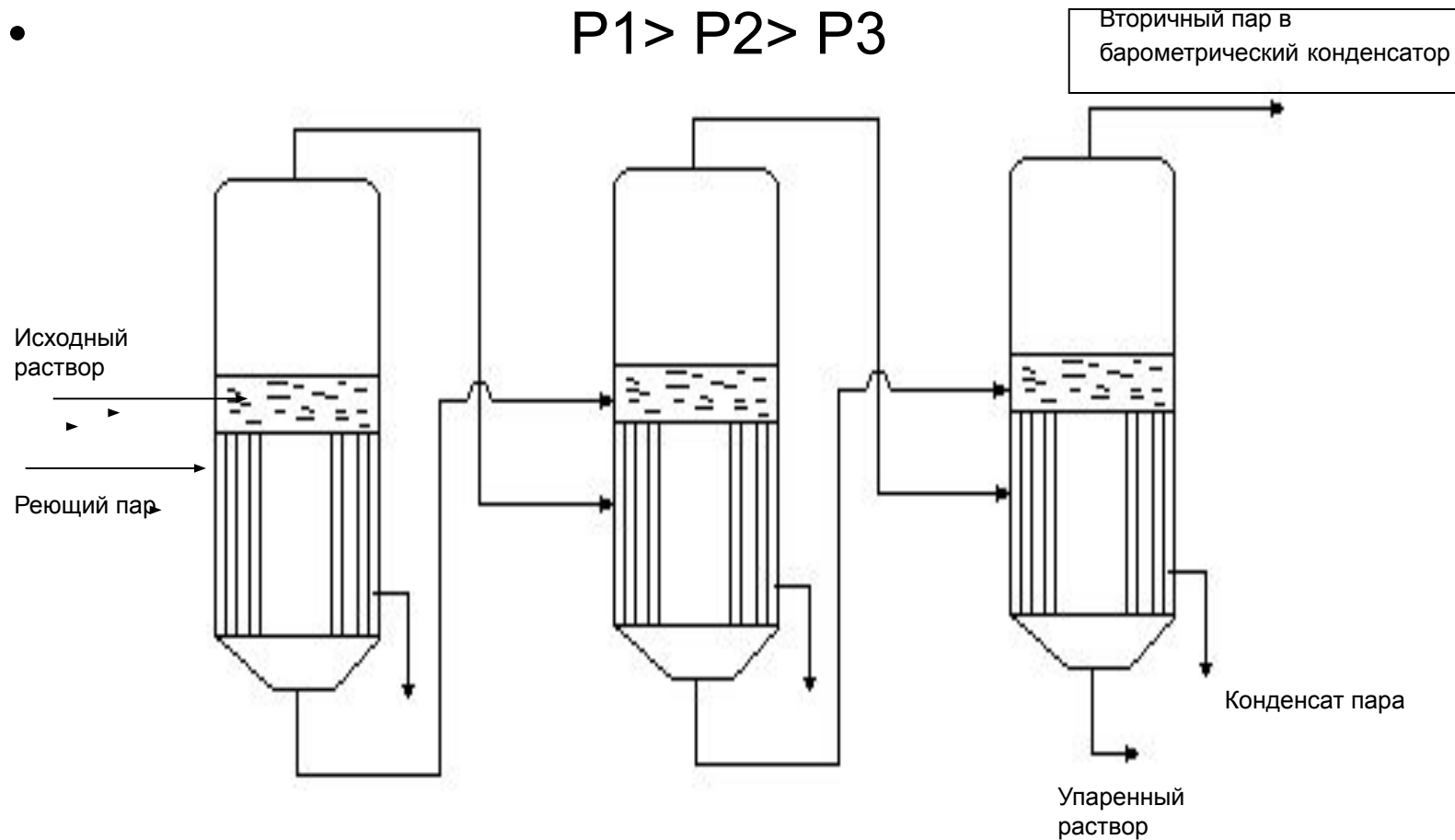
Способы повышения экономичности процесса выпаривания (38)

- Выпарные установки – потребители большого количества тепла.
- Теоретически на выпаривание 1кг воды затрачивается 1кг греющего пара.
Практически - с учетом потерь тепла - 1.1 кг
Экономия м.б. достигнута 2 способами.
- 1) Многокорпусное выпаривание
- 2) Выпаривание с тепловым насосом.

Многокорпусное выпаривание (39)

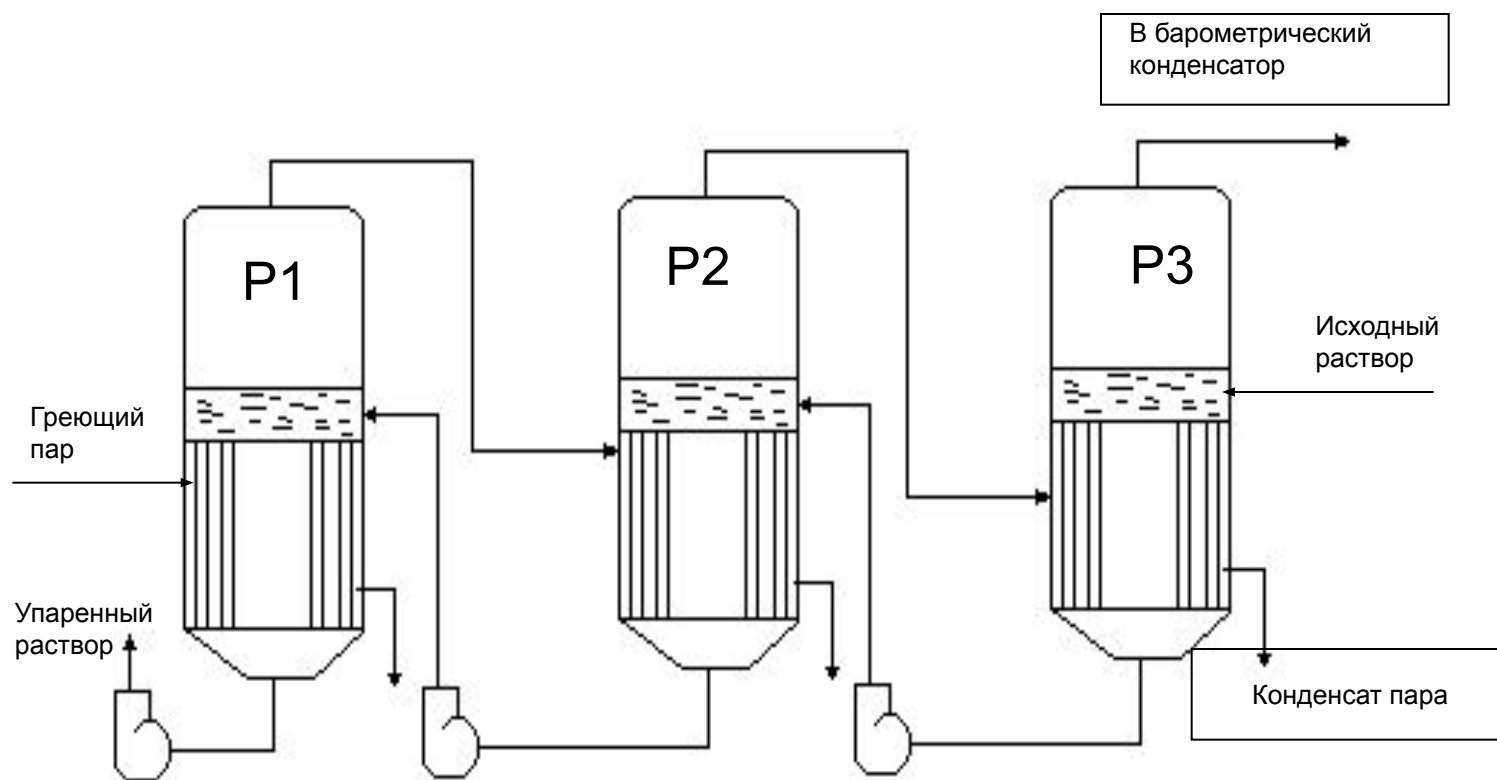
- Первый корпус обогревается свежим греющим паром, а последующие - вторичным паром предыдущих корпусов.
- Различают многокорпусные установки:
 - - прямоточные
 - - противоточные
 - - комбинированные

Прямоточная трехкорпусная установка (40)



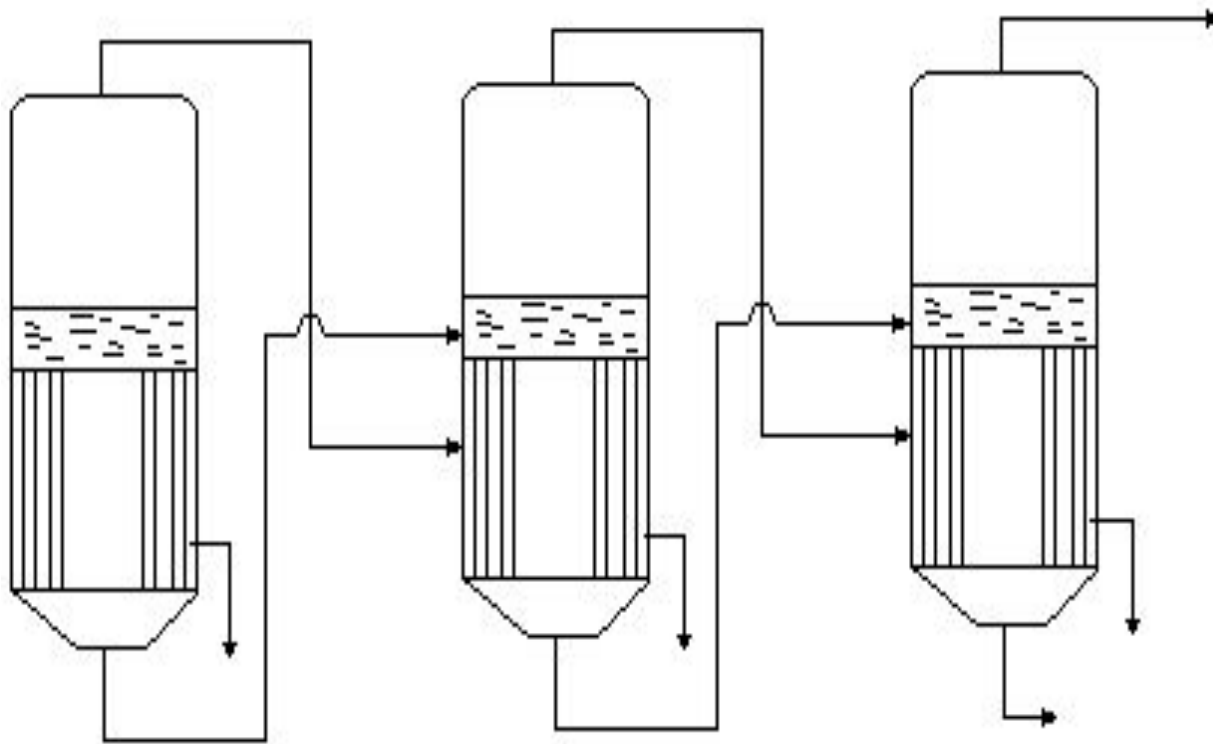
Противоточная выпарная установка (41)

- $P1 > P2 > P3$



Материальный и тепловой балансы

Многокорпусное выпаривание (42)



Материальный баланс многокорпусной установки (43)

- ,
$$G_1 = G_H - W_1 \quad (29)$$

- тогда
$$x_1 = \frac{G_H x_H}{G_H - W_1} \quad (30)$$

- Концентрация раствора на выходе из второго корпуса;

- ;
$$x_2 = \frac{G_H x_H}{G_H - W_1 - W_2} \quad (31)$$

- $$x_n = \frac{G_H x_H}{G_H - W_1 - W_2 - \dots - W_n} \quad (32)$$

- Общее количество упаренной воды:

- $$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n \quad (33)$$

Тепловой баланс многокорпусной установки

Обозначения (44)

- tk_1, tk_2, tk_3 – температуры кипения растворов в корпусах;
- t_n – начальная температура раствора;
- C_1, C_2, C_3 – средние удельные теплоемкости растворов по корпусам;
- $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – температура конденсации греющего пара по корпусам; (гр.п.).
- $С_{конд1}, С_{конд2}, С_{конд3}$ – средние удельные теплоемкости конденсата греющего пара по корпусам.
- $C_{в1}, C_{в2}, C_{в3}$ - средние удельные теплоемкости воды по корпусам;
- $Q_{конц1}, Q_{конц2}, Q_{конц3}$ - теплоты концентрирования раствора по корпусам;
- $Q_{п1}, Q_{п3}, Q_{п3}$ - потери тепла в окружающую среду по корпусам.

Тепловой баланс многокорпусной выпарной установки (45)

- Тепловой баланс первого корпуса (34)

$$Q_1 = G_{zn} (h_{zn} - C_{конд} \theta_1) = G_H C_H (t_{к1} - t_H) + W_1 (h_{вм1} - C_{в1} t_{к1}) + Q_{конц1} + Q_{n1}$$

- Тепловой баланс второго корпуса (35)

$$Q_2 = W_1 (h_{вм1} - C_{конд2} \theta_2) = (G_H - W_1) C_1 (t_{к2} - t_{к1}) + W_2 (h_{вм2} - C_{в2} t_{к2}) + Q_{конц2} + Q_{n2}$$

- Тепловой баланс третьего корпуса (36)

$$Q_3 := W_2 (h_{вм2} - C_{конд3} \theta_3) = (G_H - W_1 - W_2) C_2 (t_{к3} - t_{к2}) + W_3 (h_{вм3} - C_{в3} t_{к3}) + Q_{конц3} + Q_{n3}$$

Общая и полезная разность температур многокорпусной установки (46)

- Общая разность температур $\Delta t_{\text{общ}}$ многокорпусной выпарной установки – разность между температурой θ_1 первичного пара I-го корпуса и температурой насыщения пара в конденсаторе.

$$\Delta t_{\text{общ}} = \theta - t_0$$

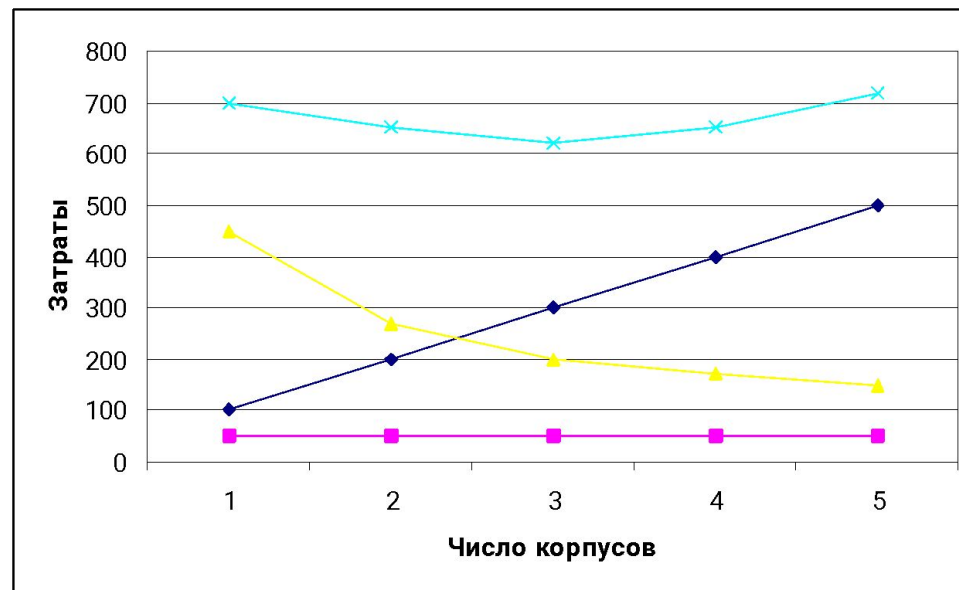
- Полезная разность температур $\Delta t_{\text{пол}}$ равна общей разности температур за вычетом температурных потерь, т. е. суммы депрессий.

$\Delta t_{\text{пол}}$ равна общей

$$\Delta t_{\text{пол}} = \Delta t_{\text{общ}} - \sum \Delta t_{\text{депр}} = \theta - t_0 - \sum \Delta t_{\text{депр}}$$

Выбор числа корпусов (47)

- Если упрощенно представить экономические затраты на выпаривание в виде трех основных характеристик:
- Стоимость теплоты.
- Затраты на обслуживание.
- Амортизационные расходы.



Список литературы(48)

- 1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. - 11-е изд., стереотипное, доработанное. Перепеч. С изд. 1973 г. - М.: ООО ТИД «Альянс», 2005. - 753 с.
- 2. Дытнерский Ю.И.: Учебник для вузов. Изд.3-е. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И.Дытнерский. - М.: Химия, 2002. – Т.1,2.
- 3. К.Ф. Павлов, Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов под ред.чл.-корр. Ан России П.Г. Романкова. - 12-е изд., стереотипное. Перепечатка с издания с издания 1987 г. - М.: ООО «Альянс», 2005 - 576 с.
- 4. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию /Под редакцией Дытнерского Ю.И.-2-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1991. - 496 с.
- Методическая литература.
- 1.. Массообменные процессы: учебно-методическое пособие. КамаловК.О., Мартинсон. Е.А. , Гребенкина З.И.– Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2014. – 81с.
- 2.Тепломассообменные процессы. Учебное пособие. КамаловК.О., Мартинсон.Е.А. , Гребенкина З.И.– Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2014. – 150с.
- 5. Рамм В.М. Абсорбция газов. - М.: Химия. 1976. - 655 с.
- 6. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. - М.: Химия, 1978.-277 с.
- 7. Лыков М.В. Сушка в химической