

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА «ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ»

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА
МНОГОКОРПУСНОЙ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ**

Методические указания для выполнения ОргСРС



РПК
«Политехник»
Волгоград
2011

Рецензент:

к.т.н., доцент П.В. Мишта

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Методика расчета многокорпусной выпарной установки:
методические указания для выполнения ОргСРС / Сост. Шагарова А.А.,
Дулькина Н.А., Фетисова Е.Г. Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград,
2011. – 28 с.

В методических указаниях описываются цели и задачи ОргСРС,
общие сведения о процессе выпаривания, основные расчетные
зависимости и пример выполнения технологического расчета
многокорпусной выпарной установки.

Предназначены для студентов очной формы обучения по
направлению 150400.62 «Технологические машины и оборудование».

© Волгоградский государственный
технический университет, 2011

Содержание

	Введение	4
1	Цель и задачи работы	5
2	Задание для самостоятельной работы и рекомендации по его выполнению	5
3	Принципиальная технологическая схема процесса	6
4	Классификация выпарных аппаратов	7
5	Расчетные зависимости	8
6	Пример расчета прямоточной трехкорпусной выпарной установки	13
7	Контрольные вопросы	26
	Список рекомендуемой литературы	27

Введение

В химической, пищевой и в смежных отраслях промышленности для многих процессов необходимо концентрирование растворов твердых нелетучих веществ. Процесс концентрирования жидких растворов нелетучих веществ испарением и удалением части растворителя из кипящего раствора называют выпариванием.

Поскольку удаление части растворителя происходит за счет его парообразования, то для процесса выпаривания требуется соответствующее количество внешней энергии, которая чаще всего подводится к упариваемому раствору с насыщенным водяным паром, отдающим кипящему раствору теплоту конденсации.

Греющий пар конденсируется в межтрубном пространстве выпарного аппарата. Пары растворителя, образующиеся в результате выпаривания из кипящего раствора, называют вторичным паром. Поскольку в большинстве случаев упариванию подвергаются водные растворы нелетучих веществ (в химической промышленности чаще всего - растворы солей), то вторичный пар представляет собой насыщенный водяной пар с температурой, соответствующей давлению над кипящим раствором.

Процесс выпаривания можно проводить при атмосферном давлении, при давлении больше атмосферного или при разрежении. Выбор величины давления для процесса выпаривания определяется многими факторами, основные из которых - влияние температуры на свойства упаренного раствора и способ использования вторичного пара.

При давлении выше атмосферного проводится выпаривание термически стойких растворов. При этом вторичный пар достаточно высокой температуры можно использовать для производственных нужд внутри или вне выпарной установки, что повышает общую эффективность теплоиспользования.

Основное преимущество выпаривания под разрежением (под вакуумом) - снижение температуры кипения раствора, что существенно для веществ, которые при более высоких температурах подвержены каким-либо нежелательным превращениям (термическое разложение, окисление, осмоление, значительное отложение твердых веществ на горячих кипятильных поверхностях и т. п.). Кроме того, понижение температуры кипения интенсифицирует процесс передачи теплоты, так как разность температур между греющим паром и кипящим раствором при этом увеличивается.

С другой стороны, создание разрежения в выпарном аппарате требует применения дополнительных устройств: конденсатора вторичного пара, вакуум-насоса для откачки воздуха и прочего, а на испарение того же количества растворителя расходуется несколько большее количество

греющего пара, поскольку при понижении давления увеличивается удельная теплота парообразования растворителя.

Экономически выгодно применять многокорпусные выпарные установки (МВУ), где в каждом последующем аппарате в качестве греющего пара используются пары растворителя, полученные в предыдущих аппаратах (корпусах). При этом лишь первый корпус должен обогреваться свежим, т. е. поступающим из котельной, греющим паром, а во все последующие корпуса выпарной установки подаются пары растворителя (вторичные пары), отдающие теплоту конденсации выпариваемому раствору.

При этом расход первичного пара убывает пропорционально числу корпусов установки, и соответственно снижаются расходы на выпаривание 1 кг влаги.

Выпариваемый продукт за счет разности давлений в корпусах может двигаться самотеком в том же направлении, что и греющий пар (прямоток), или перекачиваться насосами в направлении, обратном ходу пара, т.е. из корпуса пониженного давления в корпус с повышенным давлением (противоток).

1 Цель и задачи работы

Целью работы является закрепление теоретических знаний лекционного материала по разделу «Теплообменные процессы и аппараты» дисциплины «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» и приобретение студентом практических инженерных навыков аппаратурно-технологического оформления конкретного процесса проектирования аппаратов промышленных масштабов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи: изучить принцип действия многокорпусной выпарной установки, обосновать выбор конструкции выпарного аппарата и изучить принцип его работы; изучить методику и выполнить технологический расчет многокорпусной выпарной установки.

2 Задание для самостоятельной работы и рекомендации по его выполнению

Студент получает индивидуальное задание с указанием исходных данных для выполнения технологического расчета многокорпусной выпарной установки. Прежде чем приступить к выполнению технологического расчета выпарной установки, необходимо изучить устройство и принцип работы аппарата, назначение и использование его основных конструктивных элементов. Пояснения к устройству выпарных аппаратов и их отдельных элементов приводятся в литературе [1-8].

Изучение теоретических основ процесса выпаривания проводится по материалу, изложенному в литературе [1-6].

Текст расчетно-пояснительной записки оформляется в соответствии с требованиями СТП ВолгГТУ 025-02. В тексте обязательно указываются размерности используемых и вычисленных величин, конечные результаты приводятся в системе СИ. При использовании справочных данных необходимо дать ссылки на литературный источник, откуда они заимствованы.

3 Принципиальная технологическая схема процесса

В промышленной практике наиболее распространена прямоточная схема МВУ. Она не требует промежуточных насосов и обеспечивает большие производительности по испаряемой из растворов жидкости. Единственным недостатком прямоточной МВУ является подчас значительное увеличение вязкости раствора в последнем корпусе, препятствующее интенсивному циркуляционному движению раствора по кипяtilьным трубам и приводящее к быстрому отложению накипи на внутренней поверхности трубок.

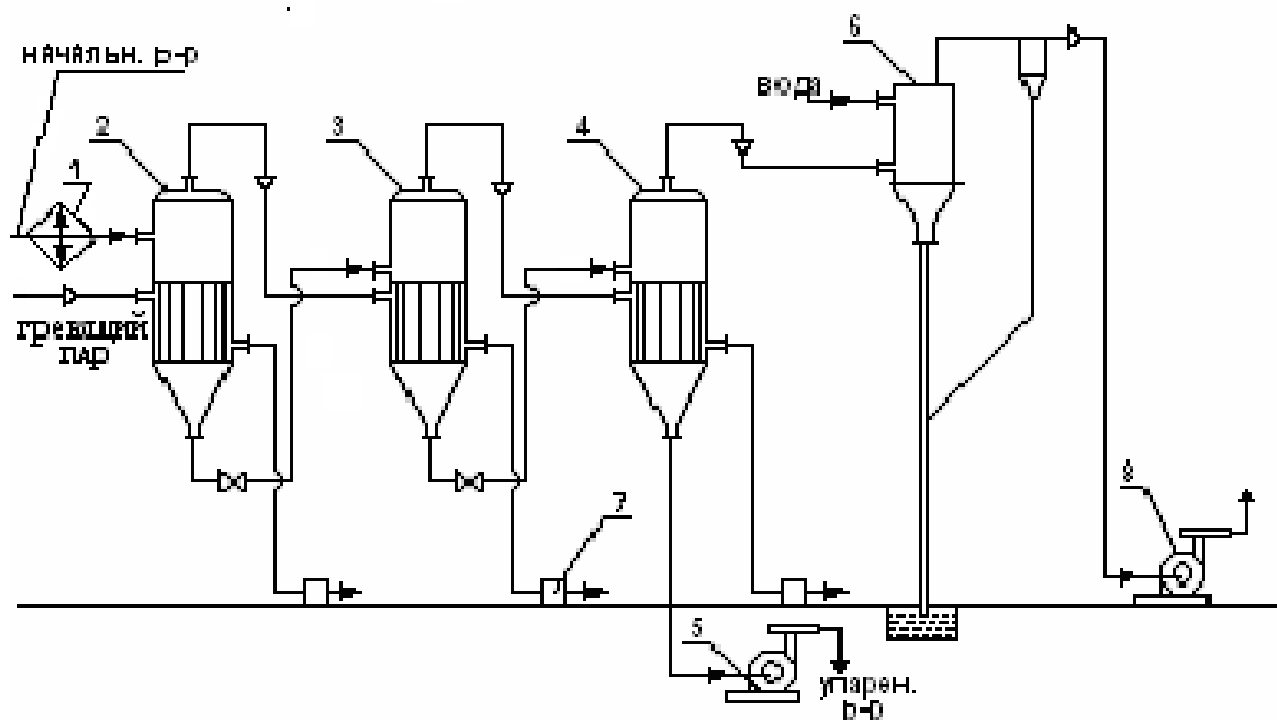
Технологическую схему многокорпусной выпарной установки рассмотрим на примере трехкорпусной прямоточной.

Начальный раствор, как правило, предварительно подогревается практически до температуры кипения в подогревателе 1 и поступает в первый корпус. Упаренный раствор первого корпуса поступает во второй корпус для дальнейшего выпаривания, а затем в третий.

Вторичный пар из первого корпуса подается в межтрубное пространство греющей камеры второго корпуса, а из второго корпуса в третий. Сконденсированный в греющих камерах пар отводится через конденсатоотводчики 7 в линию конденсата.

Давление пара по корпусам уменьшается от первого к последнему корпусу. Движение раствора из корпуса в корпус происходит под действием перепада давления в корпусах, для регулирования расхода на линиях движения раствора устанавливаются вентили. Из последнего корпуса раствор откачивается центробежным насосом 5. В дальнейшем раствор поступает или на последующие стадии технологического процесса, или после предварительного охлаждения в сборники. Вторичный пар последнего корпуса, имеющий невысокие энергетические параметры, поступает в барометрический конденсатор 6 и конденсируется; необходимое разрежение в конденсаторе поддерживается вакуум-насосом 8. Для нормальной работы выпарной установки требуется обеспечить постоянные уровни раствора в аппаратах и постоянную концентрацию упаренного раствора независимо от изменений производительности установки и параметров греющего пара. Это достигается применением схем автоматического регулирования, включающих уровнемеры,

расходомеры, манометры, преобразующие приборы и управляющие устройства, которые устанавливают в соответствующих местах аппаратов и технологических линий выпарной установки.



- 1 – подогреватель начального раствора; 2,3,4 – первый, второй, третий корпуса;
 5 – центробежный насос; 6 – барометрический конденсатор;
 7-конденсатоотводчик; 8-вакуум-насос

Рисунок 1 – Принципиальная схема прямоточной трехкорпусной выпарной установки

4 Классификация выпарных аппаратов

Наибольшее распространение в химической и в смежных отраслях промышленности получили высокопроизводительные выпарные аппараты непрерывного действия, особенно трубчатые выпарные аппараты различных типов. По принципу организации циркуляции кипящего раствора в аппарате различают выпарные аппараты с естественной и принудительной циркуляцией раствора, пленочные и барботажные (с погружными горелками) аппараты.

Хорошая циркуляция раствора в аппарате способствует интенсификации теплообмена, в первую очередь со стороны кипящей жидкости. Увеличение скорости движения жидкости приводит к уменьшению толщины теплового пограничного слоя, снижению его термического сопротивления и повышению коэффициента теплоотдачи. Кроме того, циркуляция раствора предотвращает быстрое отложение на стенках кипяtilьных труб твердой фазы (накипи). Появляется возможность

осуществлять выпаривание кристаллизующихся и высоковязких растворов.

При выборе конструкции выпарного аппарата учитывают теплофизические свойства раствора, склонность к кристаллизации, чувствительность к высоким температурам, полезную разность температур в каждом корпусе, площадь поверхности теплообменного аппарата, технологические особенности.

5 Расчетные зависимости

Расчет выпарного аппарата сводится к определению его теплообменной поверхности и к последующему подбору данного аппарата из каталога выпарных установок [7,8].

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\pi}}, \text{ м}^2 \quad (1)$$

где Q – тепловая нагрузка, Вт;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К;

Δt_{π} – полезная разность температур (движущая сила), °С.

5.1 Количество удаляемой влаги

$$W = G_H \left(1 - \frac{x_H}{x_K} \right), \text{ кг/с} \quad (2)$$

где G_H – массовый расход исходного раствора, кг/с;

x_H, x_K – начальная и конечная концентрации выпариваемого продукта (масс).

5.2 Производительность по упаренному раствору

$$G_K = G_H - W, \text{ кг/с} \quad (3)$$

5.3 Количество тепла на выпаривание

Потери тепла в окружающую среду принимаются в размере 3÷5% от общего количества тепла на выпаривание.

$$Q = (1,03 \div 1,05) W \cdot r_{\text{в}} = D \cdot r_d \quad (4)$$

где D – расход греющего (первичного пара), кг/с;

$r_{\text{в}}, r_d$ – соответственно удельные теплоты парообразования вторичного и первичного пара, Дж/кг.

5.4 Количество первичного (греющего) пара

$$D = \frac{Q}{r_d \cdot \chi}, \text{ кг/с} \quad (5)$$

где χ – степень сухости пара.

5.5 Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К} \quad (6)$$

где $\alpha_1 = \alpha_{\text{конд}}$ – коэффициент теплоотдачи при конденсации первичного пара, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$;

$\alpha_2 = \alpha_{\text{кип}}$ – коэффициент теплоотдачи при кипении раствора, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$;

$\sum r$ – суммарные термические сопротивления стенки и накипи, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$.

5.6 Коэффициент теплоотдачи при конденсации пара

В выпарных аппаратах реализуется, как правило, пленочная конденсация пара. При конденсации пара на наружной поверхности вертикальной стенки можно воспользоваться уравнением:

$$\alpha_1 = 2,04 \sqrt[4]{\frac{\lambda_1^3 \cdot \rho_1^2 \cdot r}{\mu_1 \cdot H \cdot \Delta t}}, \text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}, \quad (7)$$

или
$$\alpha_1 = 2,04 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{r}{H \cdot \Delta t} \right)^{0,25}, \text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}, \quad (8)$$

где λ_1 , ρ_1 , μ_1 – соответственно теплопроводность ($\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$), плотность ($\text{кг} / \text{м}^3$) и вязкость ($\text{Па} \cdot \text{с}$) конденсата пара, определяемые при средней температуре пленки: $t_{\text{пл}} = (t_{\text{конд}} + t_{\text{ст}}) / 2$;

r – удельная теплота парообразования ($\text{Дж} / \text{кг}$), определяемая при температуре конденсации;

H – высота трубы;

Δt – разность между температурами конденсации пара и стенки: $\Delta t = t_{\text{конд}} - t_{\text{ст}}$.

Для воды зависимость коэффициента A_1 от температуры приведена на рисунке 2.

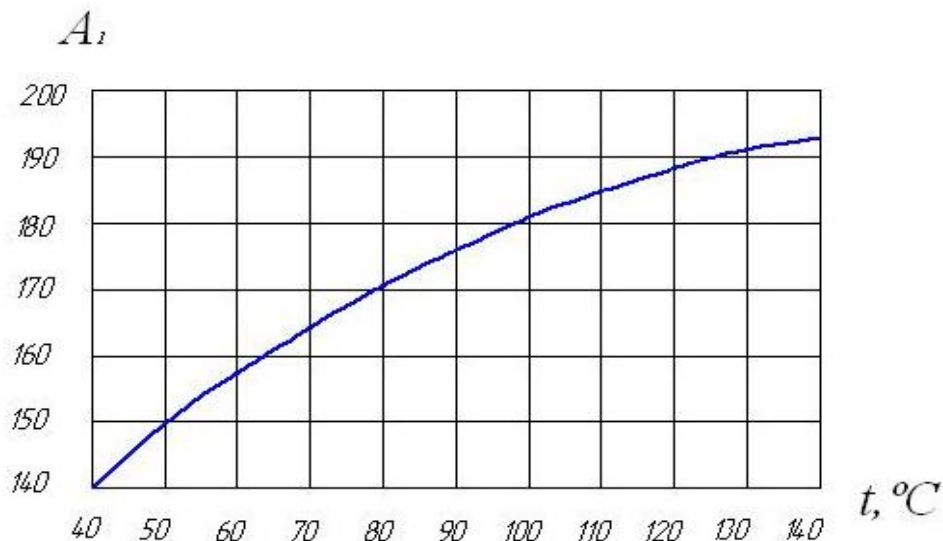


Рисунок 2

5.7 Коэффициент теплоотдачи при кипении растворов

В выпарных аппаратах имеет место пузырьковый режим кипения. Для водных растворов коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\alpha_2 = 780 \frac{\lambda_2^{1,3} \cdot \rho_2^{0,5} \cdot \rho_{вп}^{0,06}}{\sigma_2^{0,5} \cdot r^{0,6} \cdot \rho_{вп,0}^{0,66} \cdot C_2^{0,3} \cdot \mu_2^{0,3}} \cdot q^{0,6}, \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К} \quad (9)$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности раствора, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;

ρ_2 – плотность раствора, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\rho_{вп.}, \rho_{вп,0}$ – плотность вторичного пара соответственно при его давлении и атмосферном давлении, $\text{кг}/\text{м}^3$;

σ_2 – поверхностное натяжение раствора, $\text{Н}/\text{м}$;

r – удельная теплота парообразования (конденсации) вторичного пара при его давлении, $\text{Дж}/\text{кг}$;

C_2 – удельная теплоемкость раствора, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$;

μ_2 – динамическая вязкость раствора, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

q – удельная тепловая нагрузка, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Все теплофизические параметры раствора определяются при его температуре кипения.

При теплоотдаче от стенки к кипящей жидкости в любом режиме кипения коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha_2 = A_2 \cdot q^{0,65}, \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}, \quad (10)$$

где

$$A_2 = 0,125 \frac{\lambda_2 (r \cdot \rho_{вп})^{0,05} \cdot \rho_2^{0,3}}{\mu_2^{0,32} \cdot C_2^{0,02} \cdot \sigma_2^{0,35} \cdot T_1^{0,35}}$$

Коэффициент теплоотдачи для растворов, кипящих в вертикальных трубах выпарных аппаратов с естественной циркуляцией при температуре кипения до 120°C можно рассчитать по формуле:

$$\alpha_2 = A_2 \cdot q^{0,6}, \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}, \quad (11)$$

где A_2 – коэффициент, зависящий от физических свойств кипящей жидкости и определяемый по рисунку 3.

5.8 Полезная разность температур

Полезная разность температур для всей установки будет меньше общей разности температур на величину температурных потерь

$$\Delta t_n = \Delta t_{общ} - \sum \Delta \quad (12)$$

В многокорпусной прямоточной установке общая разность температур $\Delta t_{общ}$ представляет собой разность между температурой θ_1 первичного пара греющего первый корпус, и температурой вторичного пара $\theta_{бар}$, поступающего в барометрический конденсатор.

$$\Delta t_{общ} = \theta_1 - \theta_{бар} \quad (13)$$

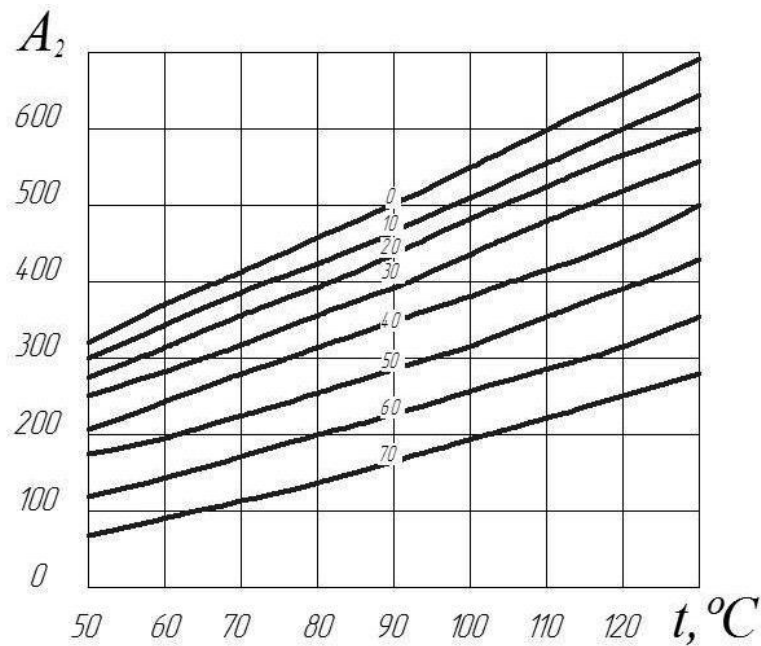


Рисунок 3

Температурные потери в выпарной установке:

$$\sum \Delta = \sum_{i=1}^m (\Delta'_i + \Delta''_i + \Delta'''_i) \quad (14)$$

где Δ' - потери температуры от температурной депрессии; °C.

Δ'' - потери температуры от гидростатического эффекта; °C.

Δ''' - потери температуры вследствие гидравлического эффекта; °C.

m – число корпусов.

Величина повышения температуры кипения раствора по сравнению с температурой кипения чистого растворителя называется температурной депрессией.

$$\Delta'_0 = t_p - t_0$$

где Δ'_0 – температурная депрессия при атмосферном давлении;

t_p – температура кипения раствора;

t_0 – температура кипения чистого растворителя (воды);

Можно вычислить температуру кипения раствора данной концентрации при произвольном давлении, если известна таковая для одного давления, используя эмпирическое правило Бабо: «Относительное понижение упругости пара растворителя над раствором данной концентрации есть величина постоянная, не зависящая от температуры кипения», т.е.

$$\left(\frac{P_1}{P} \right)_t = B,$$

где P_1 – упругость пара раствора;

P - упругость пара чистого растворителя;

B – константа Бабо для данного раствора.

В технической литературе приводятся сведения по температурам кипения растворов различных концентраций как правило при атмосферном давлении - $\Delta'_{\text{атм}}$, которую легко определить по справочникам. При других давлениях Δ' находят с помощью уравнения Тищенко:

$$\Delta' = 1,62 \cdot 10^{-2} \frac{T^2}{r} \Delta'_{\text{атм}}, \quad (15)$$

где T – температура кипения чистого растворителя, K ;

r – теплота испарения чистого растворителя при данном давлении, $кДж/кг$.

$f = 1,62 \cdot 10^{-2} \frac{T^2}{r}$ - поправочный коэффициент принимается по таблице 1.

Таблица 1

Темпера- тура вторичного пара $t_{\text{вп}}$ $^{\circ}\text{C}$	f	Темпера- тура вторичного пара $t_{\text{вп}}$ $^{\circ}\text{C}$	f	Темпера- тура вторичного пара $t_{\text{вп}}$ $^{\circ}\text{C}$	f
40	0,66	80	0,88	120	1,14
50	0,71	90	0,94	130	1,18
60	0,76	100	1,00	140	1,22
70	0,82	110	1,07	150	1,25

Гидростатическая депрессия Δ'' обусловлена разностью давлений в среднем слое кипящего раствора $P_{\text{ср}}$ и на его поверхности (т.е давлением над раствором P_0); она зависит от плотности кипящего раствора ρ , высоты кипятильных труб H :

$$P_{\text{ср}} = P_0 + 0,5\rho \cdot g \cdot H \quad (16)$$

По ГОСТ 11987-81 [7, 8] для большинства типов трубчатых аппаратов $H=4 \div 6\text{м}$.

Гидравлическая депрессия – разность между температурами вторичного пара на выходе его из выпарного аппарата и на входе в греющую камеру последующего корпуса

При проектировании выпарной установки гидравлическая депрессия принимается в пределах $\Delta''_i = 1 \div 2^{\circ}\text{C}$.

5.9 Распределение полезной разности температур между отдельными корпусами

В основе способов распределения Δt_n лежат экономические соображения. Наиболее распространены следующие два способа.

Первый способ основан на принципе равенства поверхностей теплопередачи в каждом корпусе. В этом случае в установке возможно применение аппаратов с одинаковыми конструктивными

характеристиками; при этом обеспечивается взаимозаменяемость аппаратов, упрощается и удешевляется их эксплуатация.

Распределение Δt_n при условии равенства поверхностей нагрева корпусов:

$$\Delta t_{ni} = \frac{\Delta t_n \cdot Q_i / K_i}{\sum_{i=1}^{i=m} Q_i / K_i}, \quad (17)$$

где Q_i – тепловая нагрузка корпуса, Bm ;

K_i – коэффициент теплопередачи в корпусе, $Bm/m^2 \cdot K$;

m – число корпусов.

Второй способ основан на принципе нахождения минимальной суммарной поверхности теплообмена корпусов установки и применяется для экономии дефицитного и дорогостоящего материала, из которого изготавливаются выпарные аппараты.

Распределение Δt_n при условии минимальной суммарной поверхности нагрева корпусов:

$$\Delta t_{ii} = \frac{\Delta t_i \cdot \sqrt{Q_i / K_i}}{\sum_{i=1}^{i=m} \sqrt{Q_i / K_i}}, \quad (18)$$

6 Пример расчета прямоточной трехкорпусной выпарной установки

Рассчитать трехкорпусную выпарную установку для упаривания раствора каустика (NaOH) производительностью 9000кг/час. Начальная концентрация раствора $X_n = 15\%$ (масс.), конечная $X_k = 40\%$ (масс.) Давление греющего пара $P_{гр.} = 0,55$ МПа, давление в барометрическом конденсаторе $P_{б.к.} = 0,008$ МПа.

6.1 Обоснование типа выпарного аппарата

Раствор каустика, в котором загрязнения практически отсутствуют, относится к некристаллизующимся растворам и имеет относительно невысокую вязкость. Такие растворы можно выпаривать в аппаратах с подвесной греющей камерой, с центральной или выносной циркуляционной трубой.

Аппараты с выносной циркуляционной трубой обеспечивают большую скорость циркуляции и более высокую интенсивность теплового процесса по сравнению с двумя другими. Так как заданная производительность достаточно высока, то выбор типа аппарата с выносной циркуляционной трубой обоснован.

6.2 Первое приближение

1) Температура в барометрическом конденсаторе.

По таблице LVII [9 с.549] определяем для давления 0,008 МПа (0,082 ат) температуру конденсации водяного пара в барометрическом конденсаторе

$$\theta_{бар} = 41,5^{\circ}\text{C}$$

2) Температурные потери вследствие гидравлического эффекта при перетекании вторичного пара корпуса в барометрический конденсатор примем равными: $\Delta_3''' = 1,5^{\circ}\text{C}$

3) Температура вторичного пара в последнем корпусе

$$\theta_3' = \theta_{бар} + \Delta_3'''$$

$$\theta_3' = 41,5 + 1,5 = 43^{\circ}\text{C}$$

4) Давление вторичного пара в последнем корпусе. Давление P_3' определяется из таблицы LVI [9, с. 548] по температуре θ_3' :

$$P_3' = 0,0887 \text{ ат} = 0,0087 \text{ МПа}$$

5) Давление вторичного пара по корпусам

$$P_m' = \frac{P_1 - P_3'}{3} \cdot m \quad (19)$$

$$P_1' = 0,55 - \frac{0,55 - 0,0087}{3} \cdot 1 = 0,37 \text{ МПа} = 3,77 \text{ ат}$$

$$P_2' = 0,55 - \frac{0,55 - 0,0087}{3} \cdot 2 = 0,189 \text{ МПа} = 1,93 \text{ ат}$$

$$P_3' = 0,0087 \text{ МПа} = 0,0887 \text{ ат}$$

6) Суммарный массовый расход выпариваемой воды во всех корпусах установки (ф-ла (2):

$$W = 9000 \left(1 - \frac{15}{40} \right) = 5625 \text{ кг/час}$$

7) Распределение количества выпаренной влаги по корпусам. Для прямоточной установки на основании опытных данных установлено следующее соотношение количества выпаренной влаги по корпусам:

$$W_1 : W_2 : W_3 = 1 : 1,1 : 1,21$$

На основании последнего соотношения определяем количество выпаренной влаги по корпусам:

$$\text{I корпус:} \quad W_1 = W \cdot \frac{1}{1 + 1,1 + 1,21} = 5625 \cdot \frac{1}{3,31}$$

$$W_1 = 1699 \text{ кг/час} = 0,472 \text{ кг/с}$$

$$\text{II корпус:} \quad W_2 = W_1 \cdot 1,1 = 5625 \cdot 1,1$$

$$\begin{aligned} W_2 &= 1869 \text{ кг/час} = 0,519 \text{ кг/с} \\ \text{III корпус: } W_3 &= W_2 \cdot 1,1 = 1869 \cdot 1,1 \\ W_3 &= 2056 \text{ кг/час} = 0,571 \text{ кг/с} \end{aligned}$$

8) Знание концентраций необходимо для определения температурных депрессий, температур кипения в корпусах, физико-химических констант раствора. Из уравнения материального баланса по нелетучему веществу:

$$x_1 = \frac{G_H \cdot x_H}{G_H - \sum_{i=1}^m W_i} \quad (20)$$

$$\text{В первом корпусе: } x_1 = \frac{G_H \cdot x_H}{G_H - W_1} = \frac{9000 \cdot 15}{9000 - 1699} = 18,5 \% \text{ масс.};$$

Во втором корпусе:

$$x_2 = \frac{G_H \cdot x_H}{G_H - (W_1 + W_2)} = \frac{9000 \cdot 15}{9000 - (1699 + 1869)} = 24,85 \% \text{ масс.};$$

В третьем корпусе: $x_3 = 40 \% \text{ масс.}$

9) Температура греющего пара θ_1 определяется по давлению греющего пара (табл. LVII [9, с.549]).

$$\begin{aligned} P_1 &= 0,55 \text{ МПа} = 5,6 \text{ ат} \\ \theta_1 &= 155,3^\circ \text{C} \end{aligned}$$

10) Общая разность температур:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{общ}} &= \theta_1 - \theta_{\text{бар}} \\ \Delta t_{\text{общ}} &= 155,3 - 41,5 = 113,8^\circ \text{C} \end{aligned} \quad (21)$$

11) Температурная депрессия по корпусам. Температурная депрессия по корпусам рассчитывается по правилу Бабо:

$$\text{I корпус: } x_1 = 18,5 \% \text{ масс} \quad P'_1 = 0,37 \text{ МПа} = 3,77 \text{ ат}$$

Температурная депрессия 18,5 % - водного раствора NaOH при атмосферном давлении ($P_0 = 0,1013 \text{ МПа}$) составляет: $\Delta'_0 = 7,4^\circ \text{C}$.

Температура кипения раствора:

$$t_{\text{оп-ра}} = 100 + 7,4 = 107,4^\circ \text{C}$$

Находим давление, при котором чистый растворитель (вода) кипит при $t_{\text{к1}} = 107,4^\circ \text{C}$, используя данные таблицы по свойствам сухого насыщенного водяного пара:

$$\begin{aligned} t &= 105^\circ \text{C} & p &= 1,232 \text{ ат} \\ t &= 110^\circ \text{C} & p &= 1,461 \text{ ат} \end{aligned}$$

Тогда:

$$P_{\text{оп-ля}} = 1,232 + (1,461 - 1,232) \cdot \frac{2,4}{5} = 1,342 \text{ ат}$$

Коэффициент Бабо для 18,5 % - ного раствора NaOH составляет:

$$B = \frac{0,1013}{0,1342} = 0,75$$

Температура кипения раствора при давлении P_1' равна температуре кипения растворителя при давлении:

$$P_{p-ля} = \frac{P_1'}{B} = \frac{0,37}{0,75} = 0,493 \text{ МПа} = 5 \text{ ат}$$

и составляет:

$$t_{p-ра} = 151,1^\circ\text{C}$$

Температура кипения растворителя при давлении:

$$P_1' = 0,37 \text{ МПа} = 3,77 \text{ ат}$$

составляет:

$$\theta_1' = 132,9 + (142,9 - 132,9) \cdot 0,77 = 140,6^\circ\text{C}$$

Температурная депрессия в первом корпусе равна:

$$\Delta_1' = t_{p-ра} - \theta_1'$$

$$\Delta_1' = 151,1 - 140,6 = 10,5^\circ\text{C}$$

На основании аналогичных расчетов определено:

$$\Delta_2' = 14,5^\circ\text{C} \quad \Delta_3' = 18,8^\circ\text{C}$$

12) Температурные потери вследствие гидростатического эффекта. По каталогу выбираем выпарной аппарат с высотой трубок – 4000мм.

Таблица 1- Плотность раствора каустика при температуре вторичного пара

Корпус	Концентрация, % массовые	Плотность, кг/м ³
I	18,5	1133
II	24,85	1198
III	40	1400

Увеличение давления в среднем по высоте сечения греющей камеры по корпусам определяется по формуле: $\Delta P_i' = \frac{1}{2} \rho_i \cdot g \cdot h$

$$\text{I корпус: } \Delta P_1' = \frac{1}{2} \cdot 1133 \cdot 9,8 \cdot 4 = 2,22 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,227 \text{ ат}$$

$$\text{II корпус: } \Delta P_2' = \frac{1}{2} \cdot 1198 \cdot 9,8 \cdot 4 = 2,35 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,24 \text{ ат}$$

$$\text{III корпус: } \Delta P_3' = \frac{1}{2} \cdot 1400 \cdot 9,8 \cdot 4 = 2,74 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,28 \text{ ат}$$

Давление в среднем по высоте сечения греющей камеры составляет:

$$\text{I корпус: } P_{кипл1} = P_1' + \Delta P_1' = 0,37 + 0,0222 = 0,392 \text{ МПа} = 4 \text{ ат}$$

$$\text{II корпус: } P_{кипл2} = 0,189 + 0,0235 = 0,213 \text{ МПа} = 2,17 \text{ ат}$$

$$\text{III корпус: } P_{кипл3} = 0,0087 + 0,0274 = 0,036 \text{ МПа} = 0,37 \text{ ат}$$

Для найденных давлений определим температуру кипения растворителей.

I корпус: $\theta_{кип1} = 142,9^\circ C$

II корпус: $\theta_{кип2} = 121,9^\circ C$

III корпус: $\theta_{кип3} = 73,4^\circ C$

Температуры кипения растворителя при давлениях вторичного пара θ'_i определены в пункте 11 и составляют:

$$\theta'_1 = 140,6^\circ C, \quad \theta'_2 = 118,4^\circ C, \quad \theta'_3 = 43,6^\circ C$$

Гидростатическая депрессия определяется по разности температур кипения растворителя в среднем сечении греющей камеры и на поверхности раствора:

$$\Delta''_i = \theta_{кипi} - \theta'_i$$

I корпус: $\Delta''_1 = 142,9 - 140,6 = 2,3^\circ C$

II корпус: $\Delta''_2 = 121,9 - 118,4 = 3,5^\circ C$

III корпус: $\Delta''_3 = 73,4 - 43,6 = 29,8^\circ C$

13) Температурные потери вследствие гидравлического эффекта при перетекании вторичного пара из предыдущего в последующий корпус.

$$\text{Примем: } \Delta'''_1 = \Delta'''_2 = \Delta'''_3 = 1,5^\circ C.$$

14) Суммарные температурные потери.

$$\sum \Delta = \sum_{m=1}^{m=3} (\Delta'_m + \Delta''_m + \Delta'''_m)$$

$$\sum \Delta = (10,5 + 2,3 + 1,5) + (14,5 + 3,5 + 1,5) + (18,8 + 29,8 + 1,5) = 83,9^\circ C$$

15) Полезная разность температур.

$$\Delta t_n = \Delta t_{общ} - \sum \Delta = 113,8 - 83,9 = 29,9^\circ C$$

16) Коэффициенты теплопередачи по корпусам.

Теплоперенос от греющего пара к кипящему раствору рассматривается как теплопередача через плоскую стенку, с одной стороны которой происходит пленочная конденсация греющего пара при температуре θ_i , а с другой – кипение раствора с температурой t_i . Зонами переохлаждения конденсата и зонами кипения раствора, отличных от режима интенсивного кипения, пренебрегают.

При такой модели процесса теплопередачи воспользуемся критериальными уравнениями теплоотдачи.

Для конденсации пара на вертикальной стенке – уравнение (8).

Для кипения раствора – уравнение (10).

I корпус

$$\text{Исходные данные: } \theta_1 = 155,3^\circ C \quad t_1 = \theta'_1 + (\Delta'_1 + \Delta''_1)$$

$$t_1 = 140,6 + (10,5 + 2,3) = 153,4^\circ C$$

Выбираем конструкционный материал для изготовления корпусов установки, стойкий в среде выпариваемого кипящего раствора в интервале заданных концентраций и находим его теплопроводность в справочной

литературе [9]. Коэффициент теплопроводности для углеродистой стали: $\lambda_{cm} = 46,5 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$. Толщина стенки трубы: $\delta_{cm} = 0,002 \text{ м}$.

Термическое сопротивление загрязнений со стороны греющего пара равно нулю, а со стороны раствора:

$$\frac{\delta_3}{\lambda_3} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{Вт} \cdot \text{К}$$

Общее термическое сопротивление стенки:

$$\sum r = \frac{\delta_{\text{нб}}}{\lambda_{\text{нб}}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c}$$

$$\sum r = \frac{0,002}{46,5} + 2 \cdot 10^{-4} = 2,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{Вт} \cdot \text{К}$$

Теплофизические свойства раствора определяем при температуре кипения. Коэффициент теплопроводности раствора: $\lambda_{p-pa} = 0,618 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$

Плотность пара: $\rho_n = \rho_0 \frac{p_{\text{кип}}}{p_0}$,

где p_0 , ρ_0 - давление и соответствующая ему плотность водяного пара, выбранная по таблице [9].

При $p_{\text{кип}} = 4 \text{ ат}$, $\rho_n = 2,12 \text{ кг} / \text{м}^3$

Теплота парообразования: $r = 2141 \text{ кДж} / \text{кг} = 2141 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}$.

Вязкость раствора при температуре кипения определится по правилу линейности, за эталонную жидкость примем воду. Расчет сведен в таблицу 2.

Таблица 2

Температура раствора справочная $t_{\mu}, ^\circ\text{C}$	Вязкость раствора $\text{Па} \cdot \text{с}$	Температура воды, соответствующая вязкости раствора $\theta_{\mu}, ^\circ\text{C}$	Коэффициент линейности $\frac{t_{\mu 2} - t_{\mu 1}}{\theta_{\mu 2} - \theta_{\mu 1}}$	Температура воды, соответствующая вязкости раствора при t_1	Вязкость раствора $\text{Па} \cdot \text{с}$
20	$1,53 \cdot 10^{-3}$	4,5	1,176	$\theta_{\mu} = 4,5 + \frac{153,4 - 20}{1,176} = 117,9 ^\circ\text{C}$	$0,236 \cdot 10^{-3}$
40	$0,97 \cdot 10^{-3}$	21,5			

Теплоемкость раствора:

$$C_{p-pa} = C_v(1 - X) + C_{\text{соли}} \cdot X, \quad (22)$$

где C_v , $C_{\text{соли}}$ - соответственно теплоемкости воды и соли, Дж/кг·К.

Примечание: теплоемкость большинства кристаллических солей и щелочей лежит в пределах 900-950 Дж/кг·К.

$$C_{p-pa} = 4190 \cdot (1 - 0,185) + 920 \cdot 0,185 = 3585 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$$

Поверхностное натяжение 18,5% раствора NaOH: $\sigma_{t=20^\circ\text{C}} = 0,0845 \text{ н} / \text{м}$.

При температуре кипения раствора поверхностное натяжение уменьшается: $\sigma(t=153,4)=0,0768 \text{ н/м}$.

$$A_2 = 0,125 \frac{(0,618)^{0,07} \cdot (2141 \cdot 10^3 \cdot 2,12)^{0,05} \cdot (1133)^{0,3}}{(0,236 \cdot 10^{-3})^{0,32} \cdot (3585)^{0,02} \cdot (0,0768)^{0,35} \cdot (273 + 153,4)^{0,35}} = 6,26$$

Для расчета коэффициента теплопередачи задаются температурой стенки со стороны греющего пара на 0,5-5 °С ниже температуры конденсации (θ_1):

$t'_{cm1} = 154,9^\circ\text{C}$	$t''_{cm1} = 155^\circ\text{C}$
$t_{пл} = 155^\circ\text{C}$	$t_{пл} = 155,2^\circ\text{C}$
$A_1 = 193$	$A_1 = 193$
$\Delta t = 0,4$	$\Delta t = 0,3$
$\alpha = 2,04 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{r}{H \cdot \Delta t} \right)^{0,25}$	
$\alpha'_1 = 2,04 \cdot 193 \cdot \left(\frac{2104 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,4} \right)^{0,25}$	$\alpha''_1 = 2,04 \cdot 193 \cdot \left(\frac{2104 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,3} \right)^{0,25}$
$\alpha'_1 = 13333 \text{ Вт/м}^2$	$\alpha''_1 = 14327 \text{ Вт/м}^2$
$q_{t1} = \alpha_1 \cdot (\theta_1 - t_{cm1})$	
$q'_{t1} = 13333 \cdot 0,4 = 5333 \text{ Вт/м}^2$	$q''_{t1} = 14327 \cdot 0,3 = 4298 \text{ Вт/м}^2$
$t_{cm2} = t_{cm1} - q_{t1} \cdot \sum r$	
$t'_{cm2} = 154,9 - 5333 \cdot 2,43 \cdot 10^{-4} = 153,6^\circ\text{C}$	$t''_{cm2} = 155 - 4298 \cdot 2,43 \cdot 10^{-4} = 154^\circ\text{C}$
$\alpha_2 = A_2 \cdot q_t^{0,65}$	
$\alpha'_2 = 6,26 \cdot 5333^{0,65} = 1656 \text{ Вт/м}^2$	$\alpha''_2 = 6,26 \cdot 4298^{0,65} = 1440 \text{ Вт/м}^2$
$q_{t2} = \alpha_2 \cdot (t_{cm2} - t_1)$	
$q'_{t2} = 1656 \cdot (153,6 - 153,4) = 331 \text{ Вт/м}^2$	$q''_{t2} = 1440 \cdot (154 - 153,4) = 864 \text{ Вт/м}^2$

По данным расчета строят нагрузочный график зависимости $q_{t1} = f(t_{cm1})$ и $q_{t2} = f(t_{cm1})$ (рисунок 4), корректируют температуру стенки и проводят уточненный расчет коэффициента теплопередачи.

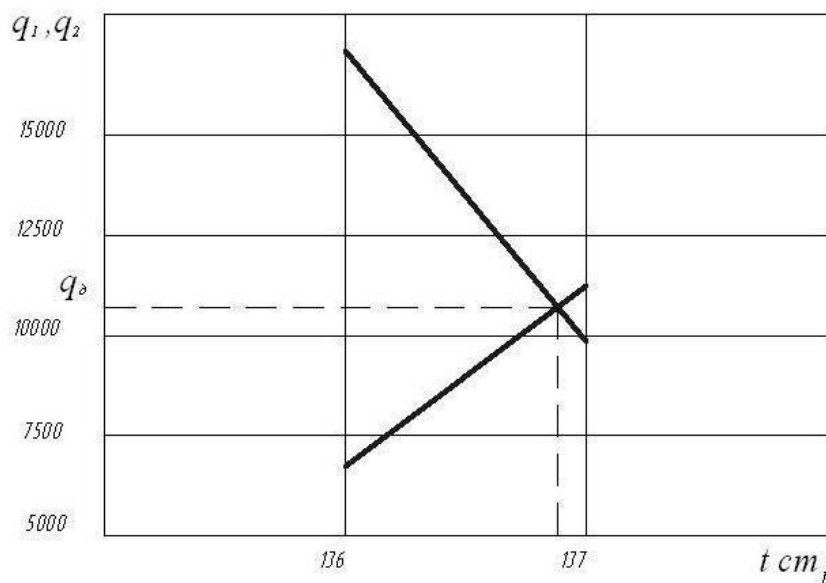


Рисунок 4 – Зависимость удельной тепловой нагрузки от температуры стенки

В данном расчете:

$$t_{cm1} = 155,25^{\circ}C \quad q_o = 2100 Bm / m^2$$

Тогда коэффициент теплопередачи примет значение:

$$K = \frac{q_t}{\theta_1 - t_1} = \frac{2100}{155,3 - 153,4} = 1105 Bm / m^2$$

В первом приближении для двух корпусов коэффициенты теплопередачи целесообразно определить, используя соотношение, установленное на основании расчетных и экспериментальных данных:

$$K_1 : K_2 : K_3 = 1 : (0,6 \div 0,9) : (0,4 \div 0,7)$$

Примем: $K_1 : K_2 : K_3 = 1 : 0,8 : 0,5$

Тогда коэффициенты теплопередачи по корпусам:

$$K_2 = 884 Bm / m^2 \cdot K, \quad K_3 = 553 Bm / m^2 \cdot K$$

17) Тепловая нагрузка по корпусам.

В первом приближении в тепловом балансе можно пренебречь самоиспарением раствора, теплотой растворения вещества и тепловыми потерями. При сделанных допущениях количество тепла, передаваемое от греющего пара к раствору, определится из выражения:

$$Q_i = r_i \cdot W_i \quad (23)$$

$$Q_1 = 2104 \cdot 10^3 \cdot 0,472 = 0,99 \cdot 10^6 Bm$$

$$Q_2 = 1,09 \cdot 10^6 Bm, \quad Q_3 = 1,2 \cdot 10^6 Bm$$

18) Распределение полезной разности температур по корпусам.

Условие равной поверхности греющих камер (формула (37)):

$$\Delta t_{n1} = \frac{(0,99 \cdot 10^6 / 1105) \cdot 29,9}{\frac{0,99 \cdot 10^6}{1105} + \frac{1,09 \cdot 10^6}{884} + \frac{1,2 \cdot 10^6}{553}}$$

$$\Delta t_{n1} = 6,2^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{n2} = 8,6^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{n3} = 15,1^{\circ}\text{C}$$

Условие минимальной суммарной поверхности греющих камер (формула (38)):

$$\Delta t_{n1} = \frac{\sqrt{\frac{0,99 \cdot 10^6}{1105}} \cdot 29,9}{\sqrt{\frac{0,99 \cdot 10^6}{1105}} + \sqrt{\frac{1,09 \cdot 10^6}{884}} + \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^6}{553}}}$$

$$\Delta t_1 = 8^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{n2} = 9,4^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{n3} = 12,5^{\circ}\text{C}$$

19) Поверхность греющих камер.

Условие равной поверхности греющих камер:

$$F_1 = F_2 = F_3 = \frac{0,99 \cdot 10^6}{1105 \cdot 6,2} = \frac{1,09 \cdot 10^6}{884 \cdot 8,6} = \frac{1,2 \cdot 10^6}{553 \cdot 15,1} = 144 \text{ м}^2$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = 432 \text{ м}^2$$

Условие минимальной суммарной поверхности греющих камер:

$$F_1 = \frac{0,99 \cdot 10^6}{1105 \cdot 8} = 112 \text{ м}^2$$

$$F_2 = \frac{1,09 \cdot 10^6}{884 \cdot 9,4} = 131 \text{ м}^2$$

$$F_3 = \frac{1,2 \cdot 10^6}{553 \cdot 15,1} = 144 \text{ м}^2$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = 112 + 131 + 144 = 387 \text{ м}^2$$

При подборе аппаратов по каталогу оказывается целесообразным остановиться на варианте равной поверхности греющих камер, если их суммарная поверхность не превышает минимальную суммарную поверхность более чем на 30%.

20) Температуры кипения раствора вторичного пара и греющего пара по корпусам.

$$t_1 = \theta_1 - \Delta t_{n1} = 155,3 - 6,2 = 149,1^{\circ}\text{C}$$

$$\theta'_1 = t_1 - (\Delta'_1 + \Delta''_1) = 149,1 - (10,5 + 2,3) = 136,3^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_2 = \theta'_1 - \Delta'''_1 = 136,3 - 1,5 = 134,8^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = \theta_2 - \Delta t_{n2} = 134,8 - 8,6 = 126,2^{\circ}\text{C}$$

$$\theta'_2 = t_2 - (\Delta'_2 + \Delta''_2) = 126,2 - (14,5 + 3,5) = 108,2^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_3 = \theta'_2 - \Delta'''_2 = 108,2 - 1,5 = 106,7^{\circ}\text{C}$$

$$t_3 = \theta_3 - \Delta t_{n3} = 106,7 - 15,1 = 91,6^{\circ}\text{C}$$

$$\theta'_3 = t_3 - (\Delta'_3 + \Delta''_3) = 91,6 - (18,8 + 29,8) = 43^\circ\text{C}$$

21) Давление греющего пара по корпусам P_i определяется по температуре греющего пара θ_i :

$$\theta_1 = 155,3^\circ\text{C} \quad P_1 = 5,6 \text{ ат} = 0,55 \text{ МПа}$$

$$\theta_2 = 134,8^\circ\text{C} \quad P_2 = 3,2 \text{ ат} = 0,31 \text{ МПа}$$

$$\theta_3 = 106,7^\circ\text{C} \quad P_3 = 1,3 \text{ ат} = 0,13 \text{ МПа}$$

22) Давление вторичного пара по корпусам.

Давление вторичного пара по корпусам P'_i определяется по температуре вторичного пара по корпусам:

$$\theta'_1 = 136,3^\circ\text{C} \quad P'_1 = 3,3 \text{ ат} = 0,32 \text{ МПа}$$

$$\theta'_2 = 108,2^\circ\text{C} \quad P'_2 = 1,4 \text{ ат} = 0,14 \text{ МПа}$$

$$\theta'_3 = 43^\circ\text{C} \quad P'_3 = 0,0887 \text{ ат} = 0,0087 \text{ МПа}$$

Сопоставление предварительно определенных величин в пункте 5 и уточненных в данном пункте показывает, что расхождение результатов значительно и превышает 5%.

23) Теплота конденсации греющего пара.

Теплота конденсации греющего пара r_i определяется по температуре греющего пара:

$$\theta_1 = 155,3^\circ\text{C} \quad r_1 = 2104 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

$$\theta_2 = 134,8^\circ\text{C} \quad r_2 = 2166 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

$$\theta_3 = 106,7^\circ\text{C} \quad r_3 = 2243 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

24) Коэффициенты самоиспарения.

При проектировании технологической трехкорпусной выпарной установки остановимся на варианте с предварительным подогревом исходной смеси до температуры кипения.

Коэффициенты испарения определяются по уравнениям:

$$\beta_i = \frac{t_{mi} - t_i}{r_i}. \quad (24)$$

$$\beta_1 = \frac{149,1 - 149,1}{2104 \cdot 10^3} = 0$$

$$\beta_2 = \frac{149,1 - 126,2}{2166 \cdot 10^3} = 1,06 \cdot 10^{-5}$$

$$\beta_3 = \frac{126,2 - 91,6}{2243 \cdot 10^3} = 1,54 \cdot 10^{-5}$$

6.3 Второе приближение

В основу расчета по второму приближению положена методика, разработанная профессором Тищенко И.А.

1) Расход греющего пара

$$D = \frac{1}{x} \left(W - G \cdot C_{\epsilon} \cdot Y + \sum_{m=1}^{m=3} E_m \cdot K_m \right), \quad (25)$$

где $x = 3 - 2(\beta_2 + \beta_3) \cdot C_{\epsilon}$, $Y = 3\beta_1 + 2\beta_2 + \beta_3$,

K_m - коэффициент при экстрапаре.

Для трехкорпусной выпарной установки $K_1 = (2 - \beta_3)$, $K_2 = 1$

$$D = \frac{1}{3 - 2(1,06 + 1,54) \cdot 10^{-5} \cdot 4190} [5625 - 9000 \cdot 4190 \cdot (3 \cdot 0 + 2 \cdot 1,06 \cdot 10^{-5} + 1,54 \cdot 10^{-5})] = 1526 \text{ кг/ч}$$

Количество выпаренной влаги по корпусам:

$$W'_1 = D + G_H \cdot C_{\epsilon} \cdot \beta = 1526 \text{ кг/ч}$$

$$W'_2 = W'_1 + C_{\epsilon} (G_H - W'_1) \cdot \beta_2,$$

$$W'_2 = 1526 + 4190(9000 - 1526) \cdot 1,06 \cdot 10^{-5} = 1858 \text{ кг/ч}$$

$$W'_3 = W'_2 + C_{\epsilon} (G_H - W'_1 - W'_2) \cdot \beta_3,$$

$$W'_3 = 1858 + 4190(9000 - 1526 - 1858) \cdot 1,54 \cdot 10^{-5} = 2220 \text{ кг/ч}.$$

Суммарное количество выпаренной влаги:

$$W' = W'_1 + W'_2 + W'_3$$

$$W' = 1526 + 1858 + 2220 = 5604 \text{ кг/ч}$$

3) Расход греющего пара по корпусам.

Так как отбора экстрапара по корпусам нет, то расходы греющего пара по корпусам равны:

$$D_1 = 1526 \text{ кг/ч},$$

$$D_2 = W'_1 = 1526 \text{ кг/ч},$$

$$D_3 = W'_2 = 1858 \text{ кг/ч}$$

2) Тепловая нагрузка по корпусам:

$$Q_{t_i} = D_i \cdot r_i,$$

$$Q_1 = \frac{1}{3600} \cdot 1526 \cdot 2104 \cdot 10^3 = 0,89 \cdot 10^6 \text{ Вт},$$

$$Q_2 = \frac{1}{3600} \cdot 1526 \cdot 2166 \cdot 10^3 = 0,92 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

$$Q_3 = \frac{1}{3600} \cdot 1858 \cdot 2243 \cdot 10^3 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

5) Уточнение концентраций по корпусам:

$$x_1 = \frac{G_H \cdot x_H}{G_H - W'_1} = \frac{9000 \cdot 15}{9000 - 1526} = 18,1 \% \text{масс.}$$

$$x_2 = \frac{G_H \cdot x_H}{G_H - W'_1 - W'_2} = \frac{9000 \cdot 15}{9000 - 1526 - 1858} = 24 \% \text{масс.}$$

$$x_3 = 40 \% \text{масс.}$$

Расхождение концентраций раствора по корпусам с величинами, определенными в первом приближении невелико. Поэтому при расчетах величин, определяемых концентрацией раствора, возможно, использовать величины из первого приближения.

6) Температурная депрессия по корпусам:

I корпус $x_1 = 18,1 \% \text{масс.}, P'_1 = 3,3 \text{ ат} = 0,32 \text{ МПа},$
 $\Delta'_1 = 12,2^\circ \text{C},$

II корпус $x_2 = 24 \% \text{масс.}, P'_2 = 1,4 \text{ ат} = 0,14 \text{ МПа},$
 $\Delta'_2 = 16,2^\circ \text{C},$

III корпус $x_3 = 40 \% \text{масс.}, P'_3 = 0,0887 \text{ ат} = 0,0087 \text{ МПа},$
 $\Delta'_3 = 19,4^\circ \text{C}.$

7) Температурные потери вследствие гидростатического эффекта. По уточненным концентрациям определяем плотности раствора по корпусам и при соответствующих значениях давления вторичного пара, пересчитанные значения гидростатической депрессия будут равны:

$$\Delta''_1 = 2,5^\circ \text{C} \quad \Delta''_2 = 4,4^\circ \text{C} \quad \Delta''_3 = 29,8^\circ \text{C}$$

8) Температурные потери вследствие гидравлического эффекта

$$\Delta'''_1 = \Delta'''_2 = \Delta'''_3 = 1,5^\circ \text{C}$$

9) Суммарные температурные потери

$$\sum \Delta = (12,2 + 2,5 + 1,5) + (16,2 + 4,4 + 1,5) + (19,4 + 29,8 + 1,5) = 89^\circ \text{C}$$

10) Полезная разность температур

$$\Delta t_n = \Delta t_{\text{общ}} - \sum \Delta = 113,8 - 89 = 24,8^\circ \text{C}$$

11) Коэффициенты теплопередачи по корпусам

I корпус

Так как изменение параметров раствора в 1 корпусе незначительно, то возможно использовать значение коэффициента теплопередачи, определенное в первом приближении:

$$K_1 = 1105 \text{ Вт/м}^2,$$

II корпус $\theta_2 = 134,8^\circ \text{C}, t_2 = 128,8^\circ \text{C}.$

По методике, изложенной в пункте 16, определяется коэффициент теплопередачи во втором корпусе:

$$K_2 = 900 \text{ Вт/м}^2,$$

III корпус $\theta_3 = 106,7^\circ \text{C}, t_3 = 92,2^\circ \text{C}.$

На основании аналогичных расчетов определяется:

$$K_1 = 650 \text{ Вт/м}^2.$$

12) Распределение полезной разности температур.

Условие равной поверхности греющих камер:

$$\Delta t_{n1} = \frac{(0,89 \cdot 10^6 / 1105) \cdot 24,8}{\frac{0,89 \cdot 10^6}{1105} + \frac{0,92 \cdot 10^6}{900} + \frac{1,2 \cdot 10^6}{650}} = 5,4^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{n2} = 6,9^\circ\text{C}, \quad \Delta t_{n3} = 12,5^\circ\text{C}.$$

13) Поверхность греющих камер

$$F_1 = F_2 = F_3 = \frac{0,89 \cdot 10^6}{1105 \cdot 5,4} = \frac{0,92 \cdot 10^6}{900 \cdot 6,9} = \frac{1,2 \cdot 10^6}{650 \cdot 12,5} = 148 \text{ м}^2$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = 444 \text{ м}^2$$

В выпарной станции следует установить 3 аппарата с греющей поверхностью 160 м^2 .

14) Температуры греющего и вторичного паров по корпусам

$$\theta_1 = 155,3^\circ\text{C}$$

$$\theta'_1 = \theta_1 - (\Delta t_{n1} + \Delta'_1 + \Delta''_1) = 135,2^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \theta'_1 - \Delta'''_1 = 135,2 - 1,5 = 133,7^\circ\text{C}$$

$$\theta'_2 = \theta_2 - (\Delta t_{n2} + \Delta'_2 + \Delta''_2) = 106,2^\circ\text{C}$$

$$\theta_3 = \theta'_2 - \Delta'''_2 = 106,2 - 1,5 = 104,7^\circ\text{C}$$

$$\theta'_3 = 43^\circ\text{C}$$

15) Давление вторичного пара по корпусам.

По температуре θ'_m определяется давление вторичного пара:

$$\begin{array}{ll} \theta'_1 = 135,2^\circ\text{C} & P'_1 = 3,2 \text{ ат} = 0,31 \text{ МПа} \\ \theta'_2 = 106,2^\circ\text{C} & P'_2 = 1,3 \text{ ат} = 0,13 \text{ МПа} \\ \theta'_3 = 43^\circ\text{C} & P'_3 = 0,0887 \text{ ат} = 0,0087 \text{ МПа} \end{array}$$

16) Различия между давлениями, рассчитанными в первом приближении и во втором, не превышают 5%.

По ГОСТ 11987-81 (Приложение 4.2 [8]) выбираем выпарной аппарат (тип 1, исполнение 3) со следующими характеристиками:

Номинальная поверхность теплообмена $F, \text{ м}^2$	160
Диаметр труб $d, \text{ мм}$	38x2
Высота труб $H, \text{ мм}$	4000
Диаметр греющей камеры $D, \text{ мм}$	2400
Диаметр сепаратора $D_1, \text{ мм}$	2200
Диаметр циркуляционной трубы $D_2, \text{ мм}$	700
Общая высота аппарата $H_a, \text{ мм}$	16000
Масса аппарата $M, \text{ кг}$	12500

7 Контрольные вопросы

1. В чем заключается процесс выпаривания? Какие растворы концентрируют выпариванием?
2. Охарактеризуйте методы проведения процесса выпаривания.
3. Раскройте конструктивные особенности выпарных аппаратов, их основные отличия от теплообменников?
4. С какой целью в выпарных аппаратах создают условия для циркуляции выпариваемого раствора? Покажите циркуляционный контур в выпарных аппаратах с естественной циркуляцией раствора.
5. Что понимается под полезной разностью температур выпарного аппарата?
6. Перечислите направления и покажите масштабы температурных потерь в многокорпусных выпарных установках
7. С какой целью в выпарных аппаратах применяют принудительную циркуляцию выпариваемого раствора?
8. От чего зависит температурная депрессия и как она рассчитывается?
9. Постройте температурный график выпарной установки.
10. От чего зависит количество выпаренной воды?
11. Как определяется расход греющего пара при выпаривании? На что в основном расходуется греющий пар?
12. Покажите распределение общей полезной разности температур многокорпусной выпарной установки по корпусам.
13. Из чего складывается сумма потерь общей разности температур (депрессий)?
14. Перечислите способы экономии греющего пара при выпаривании.
15. За счет чего происходит экономия греющего пара в многокорпусных выпарных установках?
16. В чем заключается расчет выпарных установок?
17. Какие конструкции выпарных установок применяют в промышленности?
18. Как выбирается оптимальное число корпусов выпарной установки?

Список рекомендуемой литературы

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для ВУЗов. Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 2002. - 400с.
2. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». СПб.: Химиздат, 2003. -608с.
3. Кавецкий Процессы и аппараты пищевых производств
4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд. М.: Химия, 2005. - 750с.
5. Таубман Е.И. Выпаривание. М.: Химия, 1982. – 328с.
6. Чернобыльский И.И. Выпарные установки. Киев: Высшая школа, 1970. – 240 с.
7. Каталог УКРНИИХИММАШа Выпарные аппараты вертикальные трубчатые общего назначения. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1979.-38с
8. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского, 4-е изд., стереотипное. М.: ООО ИД «Альянс», 2008.-496с.
9. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1987.- 576с.
10. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М., Курочкина М.И. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). СПб.: Химия, 1993. - 495с.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. – 720 с.
12. Дж. Перри. Справочник инженера - химика. – М.: Химия, 1974. – 448 с.

Составители: Анжелика Анатольевна **Шагарова**
Наталия Александровна **Дулькина**
Екатерина Геннадьевна **Фетисова**

**Методические указания
для выполнения ОргСРС**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА
МНОГОКОРПУСНОЙ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ**

Темплан 2011 г., поз № ____

Подписано в печать ____ . Формат 60x84 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. ____ . Тираж 100 экз. Заказ ____ . Бесплатно.

Волгоградский государственный технический университет.
400131 Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28.

РПК «Политехник» Волгоградского государственного
технического университета.
400131 Волгоград, ул. Советская, 35.