Библиотека СОК

ВВЕДЕНИЕ

Выпаривание – термический процесс концентрирования растворов нелетучих твердых веществ при кипении и частичном удалении жидкого растворителя в виде пара. В технике процесс выпаривания (упаривания) получил широкое распространение, так как многие вещества (сахар, поваренная соль, соли щелочных металлов, аммиачная селитра и многие другие) получают в виде слабых водных растворов, а в готовом для потребления, хранения или транспорта виде они должны быть полностью или частично обезвожены.

Впервые выпаривание, как технологический процесс, получило применение в производстве сахара. В России в 1802 году был построен первый сахарный завод с применением упаривания сахарного сиропа. Глубокое научное обоснование и анализ процессов выпаривания дан в 1915 году русским ученым И.А.Тищенко в монографии «Современные выпарные аппараты и их расчет». Российские ученые Н.И. Гельперин, В.Н. Стабников, И.И. Чернобыльский внесли большой вклад в теорию и практику выпарной техники.

Материал учебного пособия соответствует программе подготовки дипломированных специалистов по направлению 650800 «Теплоэнергетика». Оно ориентировано главным образом на изучение студентами специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика» дисциплины «Тепломассообменное оборудование предприятий». Пособие может быть использовано при выполнении курсового проекта и в процессе дипломного проектирования.

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ (МВУ)

Выпарная установка предназначена для осуществления термического процесса кипения раствора с выделением практически чистого пара растворителя, в результате которого в растворе происходит повышение концентрации растворенного вещества. В технологических процессах промышленности преимущественно выпариваются водные растворы различных нелетучих веществ, поэтому весь дальнейший материал изложен применительно к водным растворам.

Для выполнения проекта выпарной установки необходимо иметь следующие исходные данные:

1. Теплофизические свойства выпариваемого раствора во всем диапазоне изменения концентрации и температуры.

2. Расход начального (слабого) раствора G_H или сгущенного (крепкого) раствора G_K.

3. Начальную и конечную концентрацию раствора b_H и b_K.

4. Температуру раствора, поступающего в I ступень МВУ, t'_H.

Кроме того, могут быть заданы или выбраны следующие дополнительные параметры:

1. Давление и температура греющего пара, поступающего на МВУ, $\mathbf{P_1}$ и t_1.

2. Давление пара в конденсаторе или последней ступени МВУ, P_K.

3. Тип установки.

4. Число ступеней выпаривания МВУ, n.

5. Тип выпарных аппаратов.

Рекомендуется следующая последовательность проведения расчета многоступенчатой выпарной установки.

1. Выбирают тепловую схему выпарной установки, увязывают ее с тепловой схемой промышленного предприятия и определяют расходы вторичного пара E_i, кг/ч, для внешних потребителей. Так как режим работы МВУ не всегда известен в начале расчета, то давление отбираемых вторичных паров предварительно принимается ориентировочно.

2. Производят тепловой расчет выпарной установки с целью определения поверхности теплообмена выпарных аппаратов и расхода греющего пара на 1-ю ступень МВУ.

3. Производят конструктивный и прочностной расчеты аппаратов.

4. Выполняют все необходимые расчеты теплообменных аппаратов, входящих в состав МВУ.

5. Рассчитывают конденсационную установку: конденсатор и вакуум – насос, а также определяют расход охлаждающей воды.

6. Подбирают насосы для подачи раствора в выпарные аппараты.

7. Выбирают вспомогательное оборудование: систему сбора и отвода конденсата, расширители, тепловую изоляцию, паровые, конденсатные и растворные трубопроводы, различные емкости.

8. Разрабатывают систему теплового и технологического контроля и автоматики МВУ, а также определяют технико-экономические показатели работы выпарной установки.

Интенсивность теплопередачи – самая главная проблема при проектировании выпарного аппарата и МВУ в целом, так как наибольшая часть капитальных затрат приходится на сооружение поверхности теплообмена. При прочих равных условиях останавливаются на том типе выпарного аппарата, который имеет самый высокий, в данном случае, коэффициент теплопередачи. Отделение пара от жидкости в паровом пространстве имеет также большое значение для предупреждения уноса раствора, в противном случае неизбежны потери про-

дукта, загрязнение вторичного пара, загрязнение или коррозия поверхности, на которой конденсируется вторичный пар.

Основная цель проектирования МВУ – получение продукта высокого качества при минимальных затратах. Достижение этой цели требует анализа и учета большого числа факторов. К важнейшим факторам процесса выпаривания относятся:

1) начальное давление греющего пара (учитывается его стоимость);

2) конечное давление (в зависимости от температуры охлаждающей воды, ее стоимости, режима теплопередачи и качества конечного раствора);

3) число ступеней выпаривания (стоимость пара, воды и электроэнергии для перекачивающих насосов);

4) распределение площади поверхности теплообмена между корпусами (стоимость МВУ);

5) тип выпарного аппарата (стоимость и продолжительность процесса выпаривания);

6) конструкционные материалы (их влияние на качество сгущенного раствора, продолжительность службы трубок и аппарата, а также его стоимость);

7) коррозия, эрозия и расход электроэнергии (учитывается скорость жидкости в кипятильных трубках);

8) продолжительность ремонтного периода;

9) эксплуатационные расходы;

10) способы подачи слабого раствора и использование систем для рекуперации тепла;

11) стоимость рекуперационных теплообменников;

12) возможность отбора пара из промежуточных ступеней для использования на промышленном предприятии.

Наибольшее влияние на стоимость МВУ оказывает число ступеней. Технико-экономическим расчетом можно установить оптимальное число ступеней там, где оно не ограничивается вязкостью, агрессивностью, температурой кристаллизации, повышением температуры кипения или термочувстви-

тельностью раствора. Обычно экономия воды и пара оправдывает дополнительные капиталовложения, эксплуатационные расходы и стоимость электроэнергии приблизительно до семи ступеней (при благоприятных свойствах раствора).

2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР МВУ

По технологическим признакам промышленные выпарные установки непрерывного действия можно разделить на несколько групп:

1. По числу ступеней выпарные установки могут быть одноступенчатыми и многоступенчатыми (МВУ), при этом в одной ступени могут быть один, два и более включенных корпусов выпарной установки.

2. По давлению вторичного пара в последней ступени выпарные установки бывают:

- с разрежением;
- с повышенным давлением;
- с ухудшенным вакуумом.

3. По относительному движению греющего пара и выпариваемого раствора:

- прямоточные – для растворов, имеющих высокую температурную депрессию (рис. 1, а);
- противоточные – для растворов с быстро растущей вязкостью при повышении их концентрации (рис. 1, б);
- с параллельным питанием корпусов выпариваемым раствором при склонности его к кристаллизации (рис. 1, в);
- со смешанным питанием корпусов для растворов с повышенной вязкостью (рис. 1, г).

Чтобы правильно спроектировать МВУ для заданного раствора, необходимо экономически обоснованно выбрать:

- схему подогрева раствора;
- схему питания аппаратов раствором;

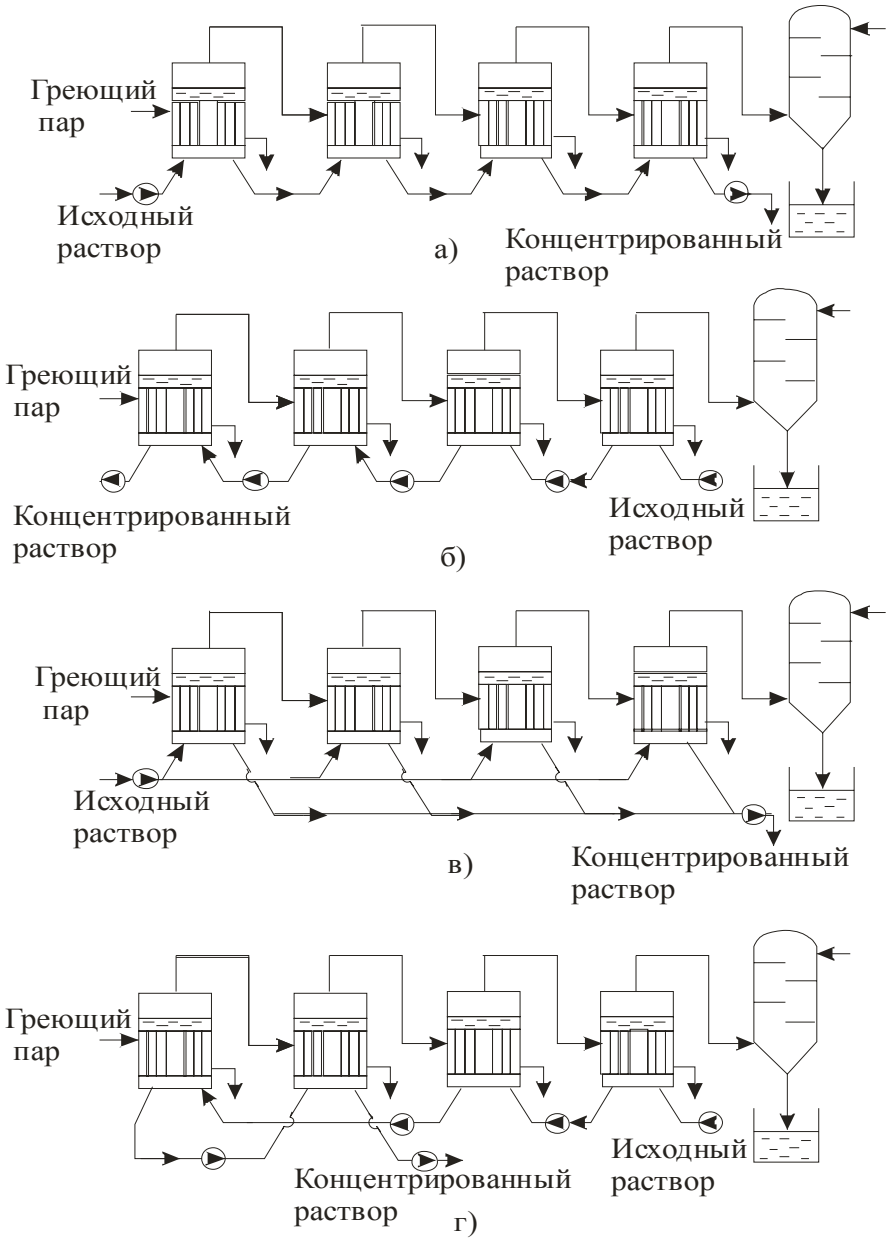


Рис. 1 Схемы МВУ

- рациональную систему использования вторичного тепла;

- оптимальное число ступеней установки.

Греющий пар для первой ступени МВУ должен иметь такую температуру, чтобы, с одной стороны, обеспечить полезный перепад температур в первом корпусе не менее 8..10 °С и чтобы, с другой стороны, располагаемая разность температур на всей установке была достаточна для обеспечения полезного перепада температур в каждой ступени и компенсации суммарной температурной депрессии.

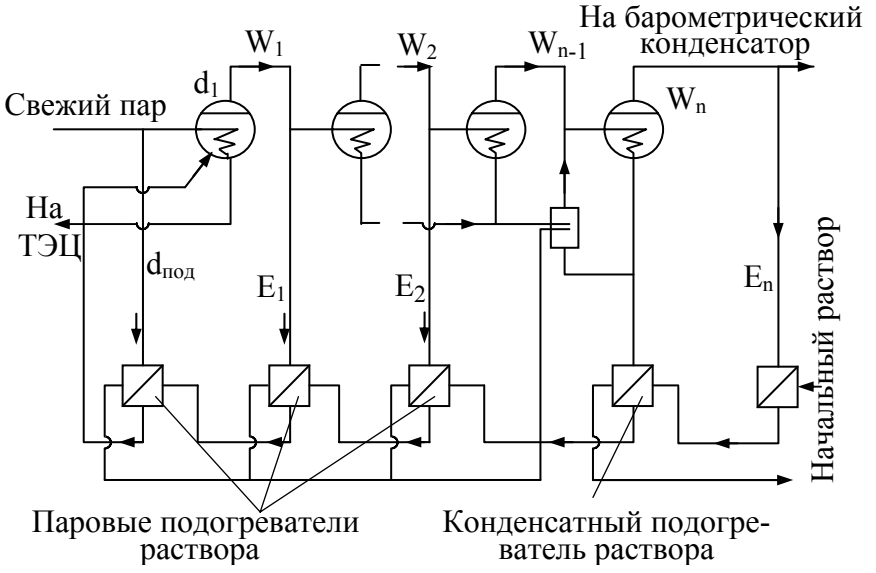


Рисунок 2.1 Схема подогрева раствора конденсатом и экстрапаром (вторичным паром)

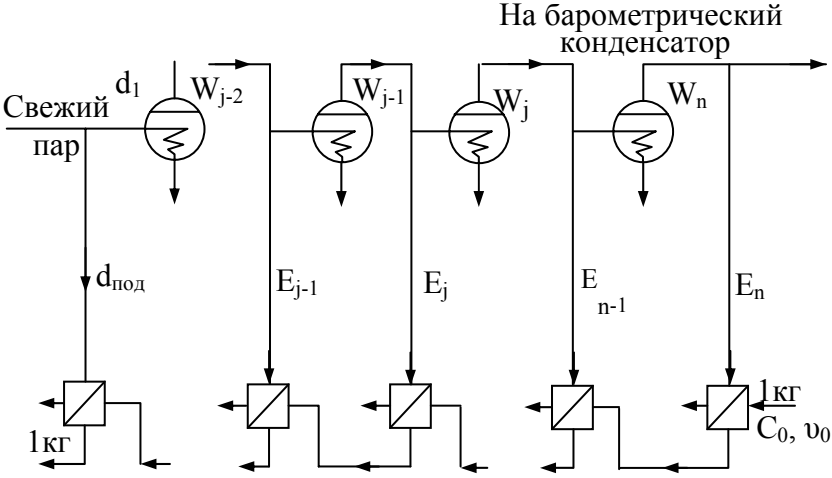


Рисунок 2.2 Схема подогрева раствора экстрапаром из отдельных ступеней МВУ

Температура раствора, поступающего на I ступень МВУ, должна быть близкой к температуре кипения. В прямоточных схемах для регенеративного подогрева раствора необходимо использовать вторичный пар и конденсат последней ступени, а затем последовательно подогревать раствор в каскаде теплообменников вторичным паром и конденсатом из ступеней более высокого давления. Окончательный подогрев раствора производится в специальном теплообменнике свежим паром, подаваемым для обогрева первой ступени МВУ (рис. 2.1 и 2.2).

В противоточных МВУ ступенчатый регенеративный подогрев не применяется, так как слабый раствор поступает на выпаривание в ″холодном″ конце выпарной установки.

Прямоточная схема подачи раствора в МВУ наиболее проста и экономична и получила наиболее широкое распространение в промышленности.

В особых случаях, когда МВУ предназначена для обработки растворов с сильно возрастающей вязкостью в процессе выпаривания, можно остановиться на варианте противоточной схемы питания. В такой схеме одновременно с увеличением концентрации и вязкости по ходу раствора от ступени к ступени повышается его температура, что вызывает снижение вязкости. Недостатком противоточной схемы является необходимость применения насосов для перекачивания раствора перед каждой ступенью установки.

Схемы с параллельным питанием применяют для упаривания кристаллизирующихся растворов, близких к насыщению, в которых при незначительной разнице в концентрациях образуются кристаллы, усложняющие эксплуатацию установки.

Смешанный ток может найти применение в тех же случаях, в каких применяется противоток. Преимуществом смешанного тока перед противотоком является уменьшение количества насосов при сохранении положительных качеств противоточной схемы.

Если отсутствует постоянный потребитель низкопотенциального тепла, то МВУ проектируется с конденсатором за последней ступенью, в котором поддерживается $\mathbf{P_k}$ =0,1…0,25 бар.

При наличии в схеме МВУ или на производстве потребителей низкопотенциального тепла целесообразно проектировать установку с ухудшенным вакуумом или с противодавлением вторичного пара в последней ступени. Температура вторичного пара из МВУ должна быть в этом случае на

8…10°С выше конечной температуры теплоносителя у потребителя тепла.

Если потребителю низкопотенциального тепла необходим подогрев теплоносителя до температуры большей, чем температура вторичного пара последней ступени, то нужно применять многоступенчатый подогрев с использованием вторичных паров промежуточных ступеней МВУ (от низкого потенциала к высокому).

2.1. **Выбор числа ступеней выпаривания**

С учетом потерь тепла расход греющего пара **D** в установке с n ступенями приближенно определяется по формуле

$$\mathbf{D} = \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{0{,}85\,n}}\mathbf{,\ кг/ч,} \qquad (1)$$

где **W,** кг/ч, - количество выпариваемого растворителя во всех ступенях установки.

Из (1) ясно, что увеличение числа ступеней в обратной пропорциональности снижает расход пара на МВУ, но также в прямой пропорции увеличивает общую поверхность теплообмена выпарных аппаратов, т. е. увеличивает капитальные затраты.

Разработана методика технико-экономического анализа и определения оптимального числа ступеней МВУ по эксплуатационным затратам в зависимости от стоимости обслуживания установки, а также затрат на греющий пар, воду и электроэнергию [1]. Оптимальное число ступеней по названной методике $\mathbf{n_{опт}}$ ориентировочно можно определять по формуле

$$n_{опт} = 60\left[\frac{K_n\left(t_1' - \vartheta_n\right)}{A\chi\left[\left(i_n'' - i_{p,n}'\right) - \frac{G_н c_o}{W}\left(\vartheta_o - \vartheta_n\right)\right]} \cdot \left[\frac{B}{0{,}85} + \frac{C \cdot i_n''}{c_B\left(t_B'' - t_B'\right)}\right]\right]^{0.5}, \quad (2)$$

где K_n - коэффициент теплопередачи в последней ступени выпарной установки, Вт/(м^2·К). На рис. 3 показаны обычные пределы изменения коэффициента теплопередачи для вертикальных выпарных аппаратов с естественной и принудительной циркуляцией выпариваемого раствора, значениями которых можно пользоваться для предварительных расчетов [2]. Высокие коэффициенты теплопередачи имеют место при выпаривании разбавленных растворов, а низкие – при выпаривании вязких высококонцентрированных растворов. Штриховая линия на рис.3 приближенно представляет нижний предел для растворов с вязкостью $\mu \approx 0{,}1$ Па·с.

χ - поправочный коэффициент, учитывающий уменьшение коэффициента теплопередачи от ступени к ступени МВУ; можно принимать $\chi = 1$;

t_1' - температура насыщения греющего пара на входе в установку, °С;

i_n'' - энтальпия вторичного пара в последней ступени установки, Дж/кг. Определяется из [3] по давлению вторичного пара в последней ступени P_K, бар;

$i_{p,n}'$ - энтальпия кипящего раствора в последней ступени установки, Дж/кг. Ориентировочная величина $i_{p,n}'$ определяется следующим образом:

а) из [3] по давлению P_K определяется температура вторичного пара последней ступени установки t_K, °С;

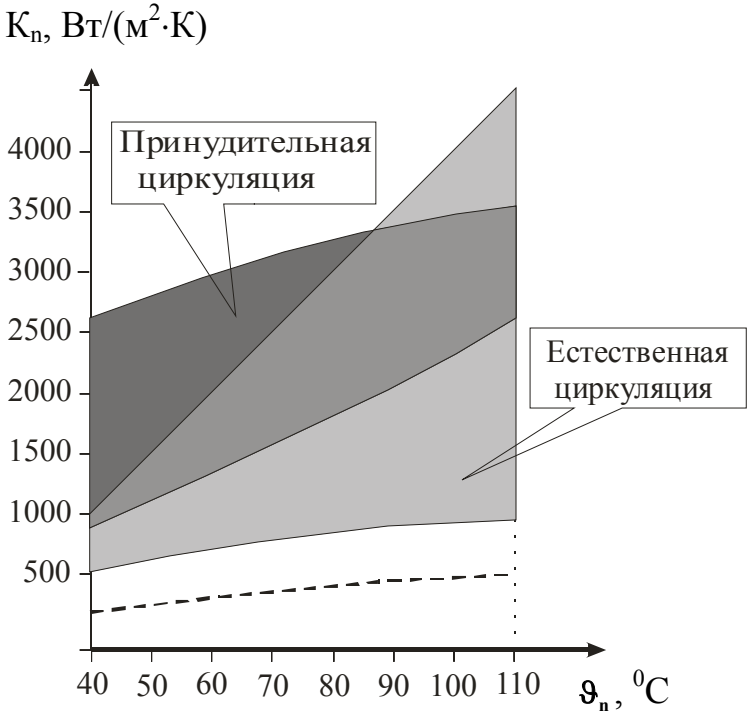


Рис.3 Пределы изменения коэффициентов теплопередачи для вертикальных выпарных аппаратов с естественной и принудительной циркуляцией

б) из [4,7,13] по конечной концентрации раствора b_K определяется нормальная физико-химическая температурная депрессия для данного раствора Δ_1, °С;

в) по формуле И.А. Тищенко определяется действительная физико-химическая температурная депрессия для раствора в последней ступени МВУ $(\Delta_1)_n$:

$$(\Delta_1)_n = 0{,}01622\frac{(t_K + 273{,}16)^2}{r_n}\cdot\Delta_1,\ °C, \qquad (3)$$

где r_n - теплота парообразования вторичного пара последней ступени, кДж/кг. Определяется из [3] по давлению P_K. В случае противоточной схемы МВУ физико-химическая температурная депрессия $(\Delta_1)_n$ вычисляется по начальной концентрации раствора b_n, давлению вторичного пара P_K и его теплоте парообразования r_n и с использованием формулы И.А.Тищенко;

г) гидростатическая температурная депрессия в последней ступени $(\Delta_2)_n$ может быть для предварительных расчетов выбрана в пределах 2…5 °С, причем большая цифра относится к высококонцентрированным растворам;

д) температура кипения раствора в аппарате последней ступени определяется по соотношению:

$$\vartheta_n = t_k + (\Delta_1)_n + (\Delta_2)_n,\ °C; \qquad (4)$$

е) по конечной концентрации раствора b_k и температуре ϑ_n из [4,27,30] или из Приложения 2 определяется средняя теплоемкость раствора c_n Дж/(кг·К). В случае противоточной схемы МВУ средняя теплоемкость раствора c_n выбирается по его начальной концентрации b_n и температуре ϑ_n;

ж) определяется энтальпия кипящего раствора по формуле:

$$i'_{p.n} = c_n \cdot \vartheta_n,\ Дж/\ кг, \qquad (5)$$

ϑ_0 - температура раствора, подаваемого в первую ступень установки, °С. В противоточной МВУ раствор в первую ступень подается из второй ступени установки с температурой ниже температуры кипения раствора в первой ступени. Принимаем температуру кипения раствора в первой ступени на 8..12 ^{0}С ниже температуры насыщения греющего пара на входе в установку, тогда $\mathbf{t}_{н1} = \mathbf{t}_1^{'} - (8..12)$, ^{0}С. Далее предварительно принимаем разность температур кипения раствора в первой и второй ступенях установки порядка 6..10 ^{0}С; тогда $\vartheta_0 = \mathbf{t}_{н1} - (6..10)$, ^{0}С;

G_n - расход начального раствора на установку, кг/ч;

c_0 - теплоемкость начального раствора, Дж/(кг·К). Определяется из [4,27,30] или из Приложения 2 по концентрации $\mathbf{b}_н$ и температуре ϑ_0 раствора, подаваемого в МВУ;

$c_в$ - теплоемкость охлаждающей воды для конденсатора МВУ, Дж/(кг·К). Определяется из [4] по средней температуре воды в конденсаторе;

$t_в'$ - начальная температура охлаждающей воды, °С; $t_в''$ - конечная температура охлаждающей воды, °С. Разница между температурами конденсации вторичного пара и уходящей воды составляет в противоточных конденсаторах $\delta = t_к - t_в'' = 1..3$ °С, а в прямоточных $\delta = 5..6$ °С. После конденсатора в естественные водоемы рекомендуется сбрасывать воду с температурой не более 60 °С;

А – стоимость обслуживания, ремонта и автоматизации 1 м^2 поверхности теплообмена МВУ, руб/(м^2·ч);

В – стоимость греющего пара, руб/кг;

С – стоимость охлаждающей воды, руб/кг.

В первую очередь формула (2) применима для МВУ с аппаратами принудительной циркуляции. В аппаратах с естественной циркуляцией раствора гидродинамика и теплообмен

целиком определяются величиной полезной разности температур $\Delta t_{пол}$, а с увеличением числа ступеней МВУ эта величина на каждую ступень уменьшается.

При выпаривания растворов с вязкостью до 0,002 Па·с в аппаратах с естественной циркуляцией $\Delta t_{пол}$ на ступень должен составлять 10..15 °С, при увеличении вязкости до 0,005 Па·с $\Delta t_{пол}$ увеличивается на 7..9 °С. В аппаратах с принудительной циркуляцией минимальная $\Delta t_{пол}$ может быть равной 6..8 °С на ступень.

3. ВЫБОР ТИПА ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ

Наибольшее распространение в промышленности получили типы выпарных аппаратов, у которых греющий пар направляется в межтрубное пространство греющей камеры, а в трубках кипит выпариваемый раствор:

1. Аппараты с естественной циркуляцией.
2. Аппараты с принудительной циркуляцией.
3. Прямоточные (пленочные) аппараты.

1. Наиболее часто на промышленных предприятиях встречаются аппараты с естественной циркуляцией. К ним относятся аппараты системы Роберта с центральной внутренней циркуляционной трубой (рис.4) и аппараты с внешними циркуляционными трубами (рис.5), у которых полностью устранен нагрев раствора в опускных каналах.

Для того чтобы снизить потери на трение в циркуляционной трубе, площадь сечения циркуляционной трубы должна быть такой же, как и суммарная площадь сечения кипятильных трубок.

Выпарные аппараты с подвесной греющей камерой (рис.6) применяются для выпаривания кристаллизующихся,

агрессивных и умеренно вязких растворов. В таких аппаратах вследствие большого сечения кольцевого канала между обечайкой и внутренней паровой камерой улучшена циркуляция раствора, а свободная подвеска греющей камеры исключает нарушение герметичности вальцовочных соединений кипятильных труб.

Преимущества аппаратов с естественной циркуляцией:

1. Высокий коэффициент теплопередачи при большой разности температур.
2. Простота механической очистки от накипи.
3. Относительно невысокая стоимость.

Недостатки аппаратов с естественной циркуляцией:

1. Низкий коэффициент теплопередачи при малой разности температур и низкой температуре кипения.
2. Плохая теплопередача при выпаривании вязких жидкостей.
3. Большие производственные площадь и масса.
4. Относительно большое время пребывания продукта в аппарате.

Области применения аппаратов с естественной циркуляцией:

1. Выпаривание чистых растворов.
2. Выпаривание малоагрессивных жидкостей (корпус из химически стойких материалов имеет очень высокую стоимость).
3. Выпаривание растворов, образующих мягкую накипь, допускающую механическую очистку поверхности теплообмена.

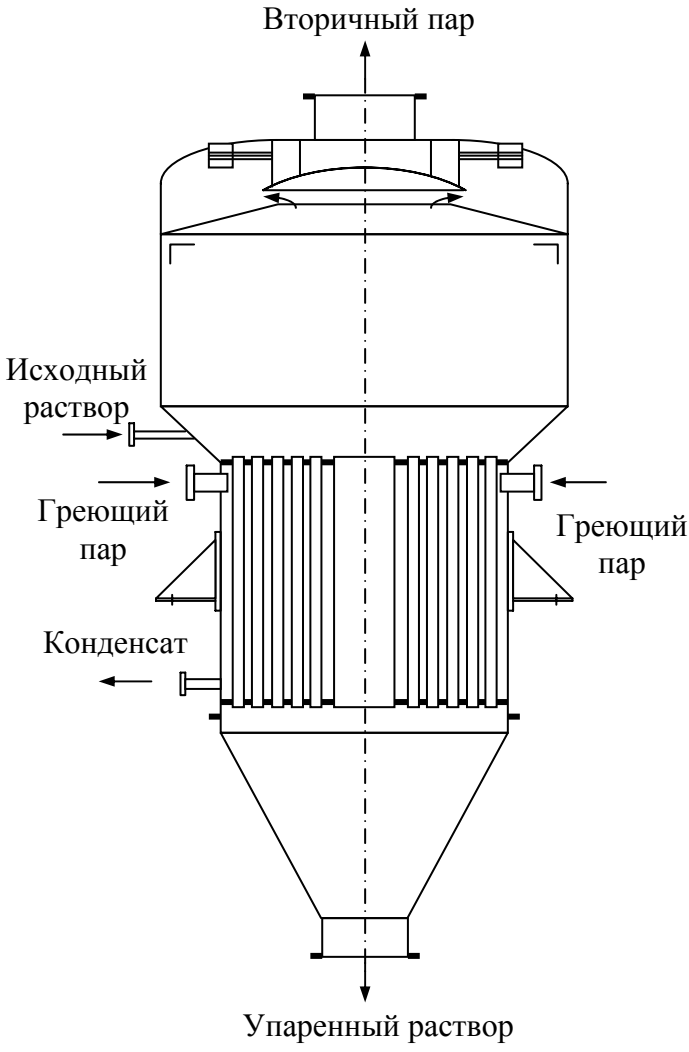

Вторичный пар
Исходный раствор
Греющий пар
Греющий пар
Конденсат
Упаренный раствор

Рисунок 4

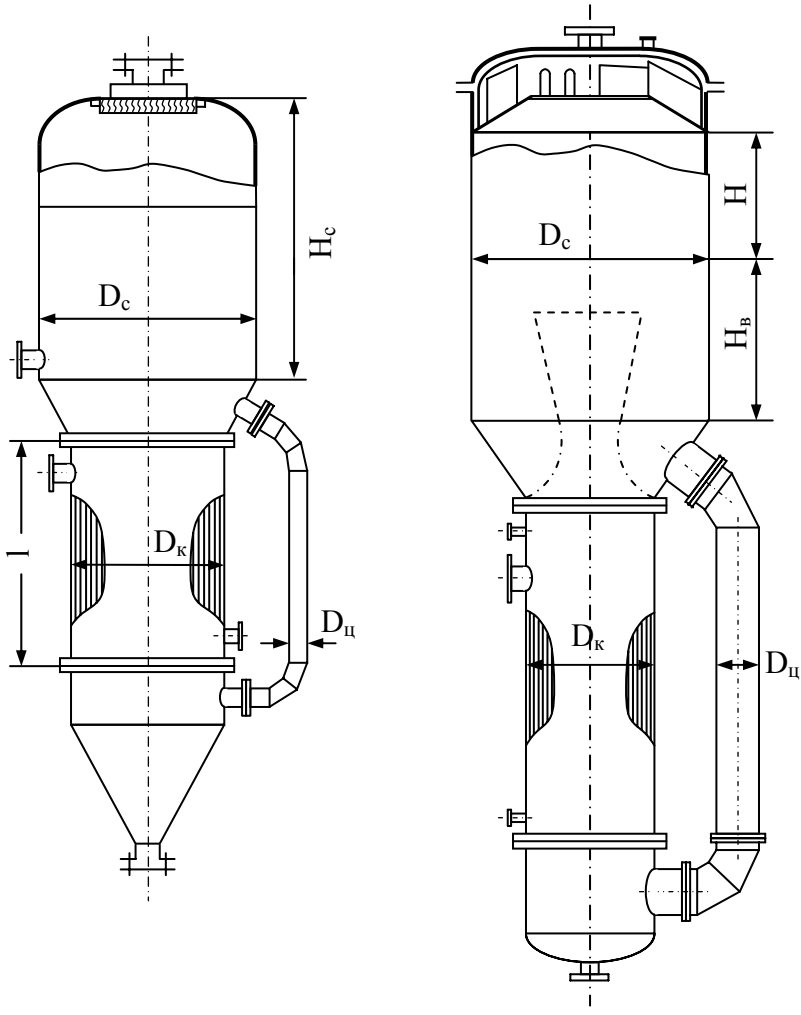


Рисунок 5

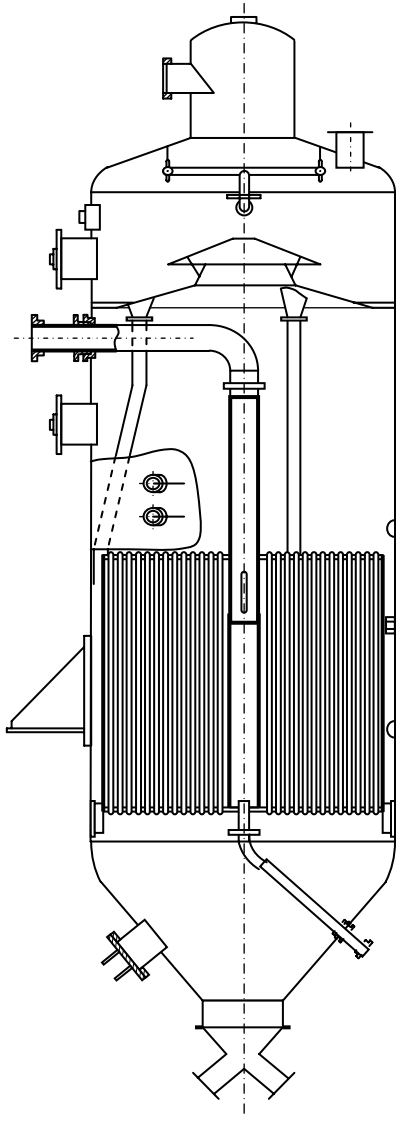


Рисунок 6. Выпарной аппарат
с подвесной греющей камерой

2. Аппараты с принудительной циркуляцией (рис. 7) применяются для выпаривания растворов повышенной вязкости, когда $0,008 \le \mu \le 0,1$ Па·с, а также для устранения инкрустаций на поверхности теплообмена при выпаривании кристаллизирующихся растворов за счет увеличения скорости циркуляции до 2..3 м/с.

В этих аппаратах скорость раствора должна быть не менее 1,2 м/с и не более 3 м/с. Нижний предел устанавливается началом солевых отложений, верхний – превышением расходов на электроэнергию для перекачки над экономией в затратах на поверхность теплообмена за счет повышенной скорости раствора.

Большинство выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией составляют аппараты с выносной греющей камерой (рис. 8). Часто у выпарных аппаратов этого типа греющая камера горизонтальная. Это обычно двухходовой кожухотрубный теплообменный аппарат (рис. 9).

Преимущества аппаратов с принудительной циркуляцией:

1. Высокий коэффициент теплопередачи.
2. Повышенная скорость циркуляции.
3. Относительно медленное отложение кристаллов, накипи и загрязнение греющей поверхности (со стороны раствора).

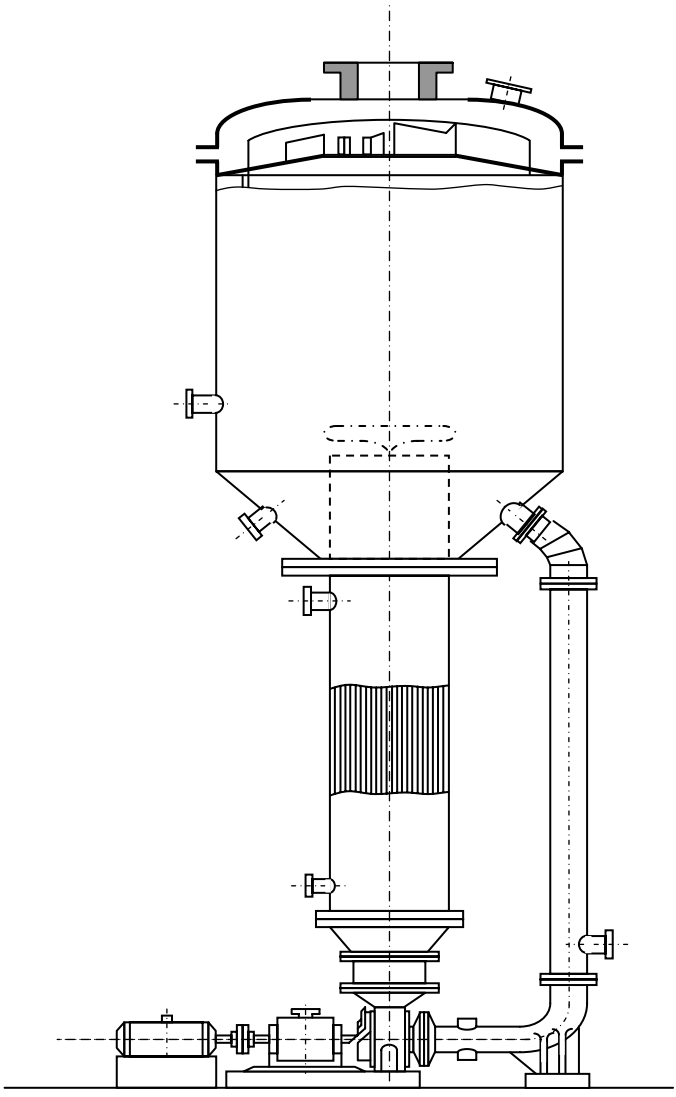


Рис. 7

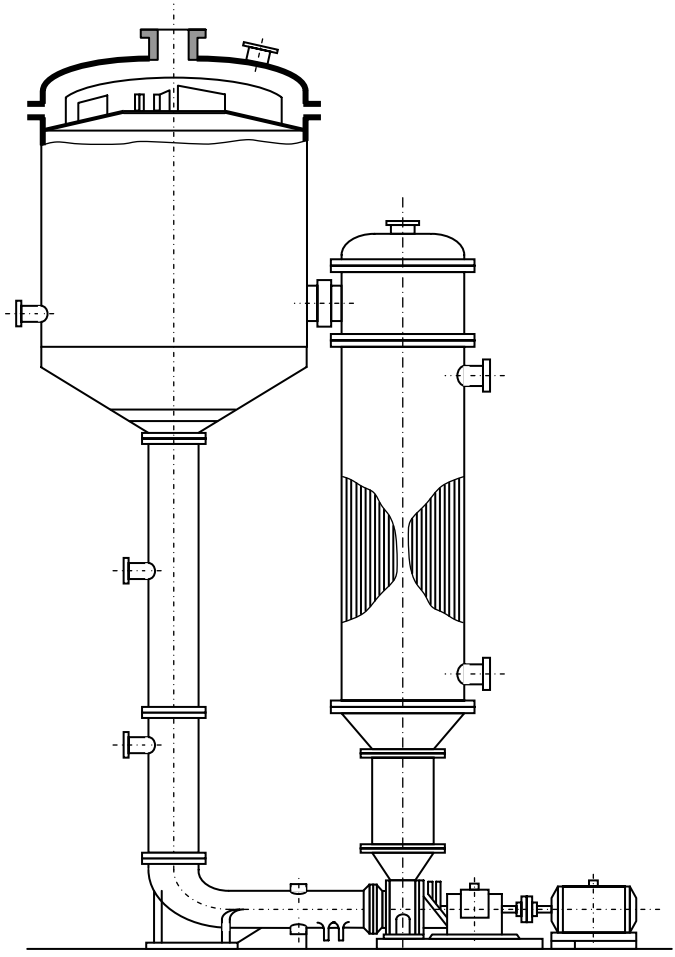


Рисунок 8

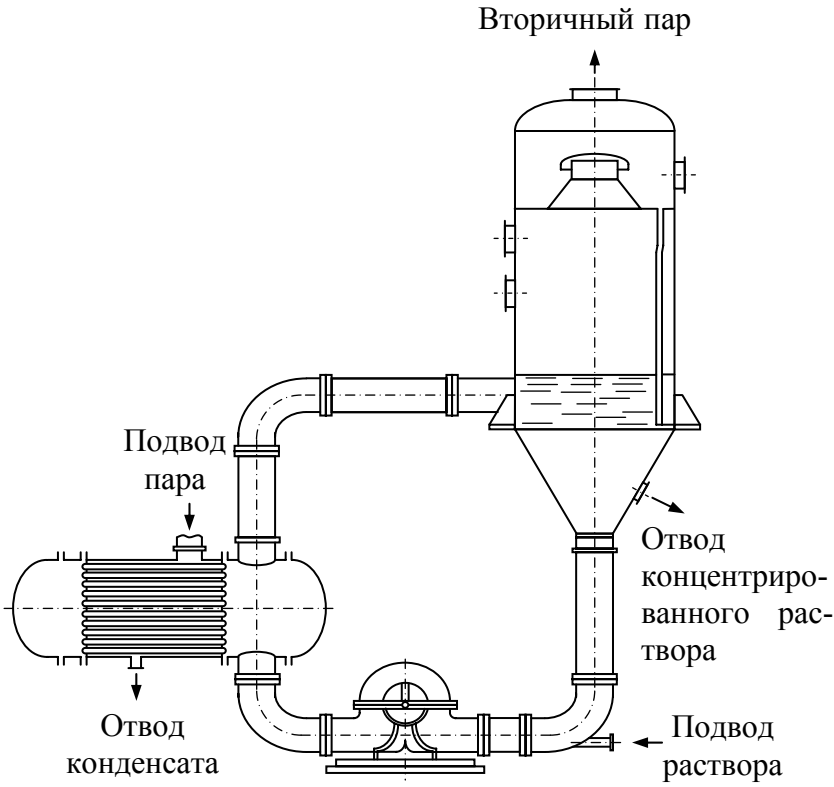


Рис. 9

Недостатки аппаратов с принудительной циркуляцией:

1. Высокая стоимость.
2. Дополнительный расход электроэнергии на циркуляционный насос.
3. Относительно высокое время пребывание продукта в аппарате.

Области применения аппаратов с принудительной циркуляцией:

1. Получение кристаллических продуктов.
2. Выпаривание агрессивных растворов.
3. Выпаривание вязких растворов.

3. Прямоточные аппараты с восходящей (типа Кестнера) (рис. 10а) и падающей (рис. 10б) пленками удобно применять для выпаривания термолабильных растворов. Время пребывания раствора в аппарате составляет несколько секунд. Диаметр трубок обычно составляет 25-50 мм, длина трубок лежит в пределах от 6 до 10,5 м. Процесс выпаривания заканчивается в аппарате за один проход раствора и пара по кипятильной трубке: за это время раствор достигает заданной концентрации. Аппараты с восходящей пленкой используют для выпаривания растворов, дающих мягкую накипь, а также для доведения растворов до состояния пересыщения. Аппараты с падающей пленкой не применяются для выпаривания растворов, содержащих твердые вещества – кристаллы.

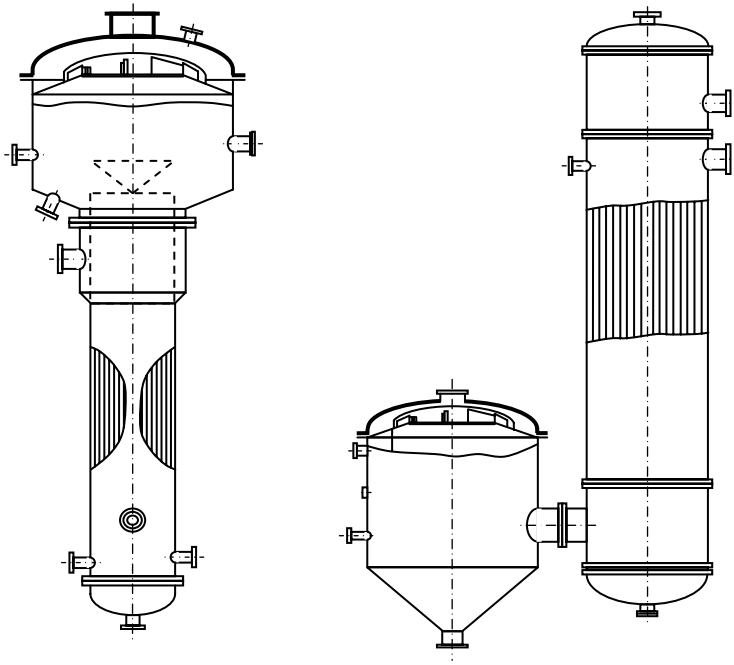
Преимущества прямоточных аппаратов:

1. Низкая стоимость.
2. Большая поверхность теплообмена в одном корпусе.
3. Малое время пребывания продукта в аппарате.
4. Небольшая производственная площадь.
5. Хороший коэффициент теплопередачи при умеренной разности температур (при восходящей пленке).
6. Хороший коэффициент теплопередачи при любых разностях температур (при падающей пленке).

Недостатки прямоточных аппаратов:

1. Необходимость высокого помещения.
2. Непригодность для кристаллизирующихся или образующих твердую накипь растворов.

3. Низкий коэффициент теплопередачи (при восходящей пленке и низкой разности температур).



а) Аппарат с восходящей пленкой раствора

б) Аппарат с падающей пленкой раствора

Рис. 10

Области применения прямоточных аппаратов:

1. Выпаривание чистых жидкостей.
2. Выпаривание пенящихся жидкостей.
3. Выпаривание агрессивных растворов.
4. Высокие разности температур при восходящей пленке и низкие при падающей.
5. Работа при низких температурах кипения при падающей пленке.

При выборе типа выпарного аппарата, кроме режима теплопередачи, также имеют важное значение физические свойства выпариваемого раствора и конечного продукта. Следует учитывать возможность кристаллизации раствора, необходимость удаления накипи, изменение качества продукта, коррозию и вспенивание.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ

Задачей теплового расчета МВУ является определение площади поверхности теплообмена выпарных аппаратов и расхода греющего пара на установку.

4.1 Определение расхода пара на предварительный подогрев начального раствора

В начале расчета могут возникнуть затруднения при определении расхода пара, отбираемого из промежуточных ступеней на подогрев раствора. Предварительное определение расхода вторичного пара разберем на примере тепловой схемы, приведенной на рис. 11. Будем считать, что установка имеет три подогревателя: 1, 3, 4 (согласно схеме).

А) Подогреватель 1 на конденсате.

Из теплового баланса подогревателя имеем

$$G_{конд}\left(C'_{конд}t'_{конд} - C''_{конд}t''_{конд}\right)\eta_п = G_н C_о\left(t'_о - t_о\right), \text{ кДж/ч}, \quad (6)$$

где известны следующие величины:

$G_н$ - начальный расход слабого раствора, поступающего на предварительный подогрев, кг/ч;

$C_о$ - средняя теплоемкость начального раствора, кДж/(кг·К);

$t_о$ - начальная температура слабого раствора, поступающего в подогреватель 1, ºС;

$\eta_п$ - коэффициент сохранения тепла; можно принять $\eta_п = 0{,}95$.

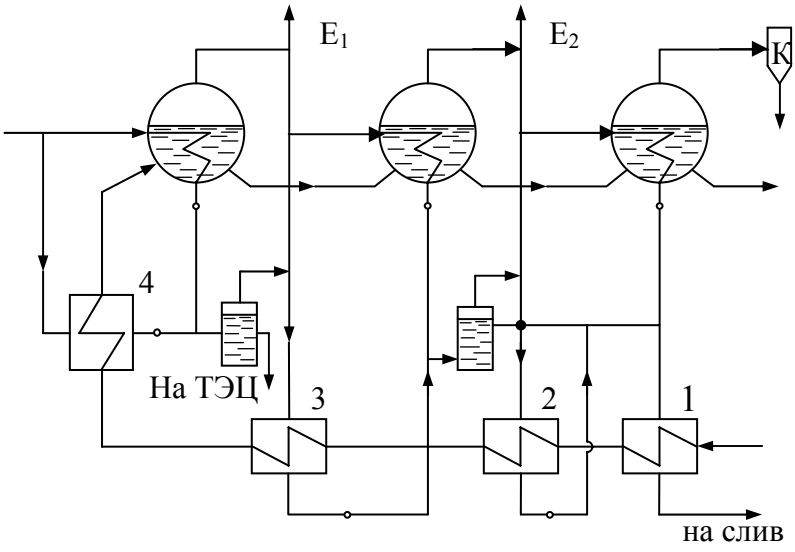


Рис. 11 Тепловая схема выпарной установки с расширителями

Расход конденсата $\mathbf{G_{конд}}$ ориентировочно может быть принят из предположения, что нагрузка всех ступеней по выпаренной воде одинакова. В этом случае согласно схеме

$$\mathbf{G_{конд} = 0,667 \cdot W} \quad \text{,кг/ч} \tag{7}$$

или в общем случае (при любом числе ступеней)

$$\mathbf{G_{конд} = \frac{n-1}{n} \cdot W} \text{,кг/ч} \tag{8}$$

так как конденсат из первой ступени возвращается на ТЭЦ.

Температуру конденсата $\mathbf{t}'_{\text{конд}}$ следует определить по давлению греющего пара последней ступени, которое ориентировочно можно принять согласно 4.2.2. этой главы. По найденной температуре $\mathbf{t}'_{\text{конд}}$ из [4, I2] определяется теплоемкостью конденсата $\mathbf{c}'_{\text{конд}}$, кДж/(кг·К).

Задавшись температурой конденсата $\mathbf{t}''_{\text{конд}}$ и выбрав соответственно ей теплоемкость $\mathbf{c}''_{\text{конд}}$, кДж/(кг·К), из уравнения теплового баланса (6) определим температуру раствора после подогревателя $\mathbf{t}'_{\text{о}}$, **°С.**

б) Подогреватель 3 на вторичном паре первого корпуса.

Из теплового баланса подогревателя имеем

$$\mathbf{G}_{\text{отб}}(\mathbf{i}''_1 - \mathbf{C}'_{\text{конд}}\mathbf{t}_{\text{конд,1}})\boldsymbol{\eta}_{\text{п}} = \mathbf{G}_{\text{н}}\mathbf{C}_{\text{о}}(\mathbf{t}''_{\text{о}} - \mathbf{t}'_{\text{о}}), \quad \text{кДж/ч} \qquad (9)$$

Здесь искомой величиной будет расход вторичного пара $\mathbf{G}_{\text{отб}}$, отбираемого из 1 - й ступени установки, кг/ч. Энтальпия этого пара $\mathbf{i}''_1$, **кДж/кг,** и температура его конденсата $t_{\text{конд,1}}$, °С, могут быть найдены по давлению вторичного пара в 1-й ступени, принятому согласно 4.2.2.

Температура раствора за подогревателем $t''_{\text{о}}$ принимается примерно на 12..15 ºС ниже $t_{\text{конд,1}}$ (с некоторым запасом на неточность в определении давления).

Расчет подогревателя 4 на греющемся паре не оказывает влияния на тепловой расчет МВУ и может быть выполнен после него.

В ходе дальнейшего расчета принятые выше величины можно уточнить и внести в случае необходимости соответствующие коррективы в тепловой расчет.

После предварительных расчетов можно приступить к выполнению наиболее сложной части работы - к тепловому расчету МВУ.

4.2 Последовательность теплового расчета МВУ

4.2.I. Распределение выпариваемой воды по ступеням МВУ

Количество воды, которое необходимо удалить из раствора на МВУ - производительность МВУ по вторичным парам - определяется из соотношения

$$\mathbf{W = G_н(1 - \frac{b_н}{b_к})}, \text{ кг/ч.} \qquad (10)$$

Согласно [5] предварительное распределение количества выпариваемой воды по ступеням осуществляется с помощью коэффициентов испарения α и самоиспарения β, определяемых по данным, всегда имеющимся в начале расчета.

Для любой ступени МВУ

$$\alpha = \sqrt[n]{\frac{r_{гр}}{r_n}}, \qquad (11)$$

где $\mathbf{r_{гр}}$ - теплота парообразования греющего пара, кДж/кг, определяемая по давлению $\mathbf{P_1}$ из [3];

r_n - теплота парообразования вторичного пара последней ступени, кДж/кг; определяется по давлению P_k из [3];

n – число ступеней в МВУ.

Коэффициент самоиспарения β для любой ступени МВУ

$$\beta = \frac{\Delta t_{эф} C_{ср}}{r_{ср}(n-1)}, \qquad (12)$$

где $\Delta t_{эф} = \frac{n-1}{n}(t_1 - t_k)$, °С; здесь t_1 - температура насыщения греющего пара, °С, и t_k - температура вторичного пара в последней ступени установки, °С. Определяется по давлению P_k из [3];

$c_{ср} = 0,5(c_0 + c_k)$, кДж/(кг· К) – средняя теплоемкость раствора в установке; здесь C_0 и C_k - соответственно начальная и конечная теплоемкости выпариваемого раствора, определяемые по его концентрации и температуре на входе и выходе из МВУ;

$r_{ср} = 0,5(r_{гр} + r_n)$ - средняя теплота парообразования в установке, кДж/кг.

Вычислив коэффициенты α и β, необходимо составить систему уравнений материального баланса МВУ, в которой искомой величиной является количество воды w_1, кг/ч, выпариваемое в 1 ступени:

$$\left.\begin{aligned} w_2 &= (w_1 - E_1)\alpha + (G_н - w_1)\beta \\ w_3 &= (w_2 - E_2)\alpha + (G_н - w_1 - w_2)\beta \\ w_n &= (w_{n-1} - E_{n-1})\alpha + (G_н - w_1 - w_2 - \ldots - w_{n-1})\beta \end{aligned}\right\}, \qquad (13)$$

где $E_1, E_2, \ldots, E_{n-1}$ - количество вторичного пара, отбираемого из МВУ на производственные нужды, кг/ч. Если в какой-то i-й ступени пароотбора нет, то соответственно $E_i = 0$.

Все уравнения системы (13) в правой части преобразуются в функции количества воды w_1, т.е. $w_2 = f(w_1)$, $w_3 = \varphi(w_1)$ и т.д. Затем по уравнению

$$w_1 + w_2 + w_3 + ... + w_n = W, \qquad (14)$$

получают количество воды, выпариваемое в 1 ступени, и далее по уравнениям (13) – количество воды, выпариваемое во всех остальных ступенях.

При расчете МВУ под давлением распределение количества выпариваемой воды нужно производить так, чтобы $w_n = E_n$.

4.2.2. Концентрация раствора и давление пара по ступеням МВУ

Количество раствора, переходящее из одной ступени МВУ в другую, можно определить по соотношениям

$$\left.\begin{array}{ll} \textbf{из I по II – ю} & G_1 = G_н - w_1, \quad \text{кг/ч} \\ \textbf{из II по III – ю} & G_2 = G_1 - w_2, \quad \text{кг/ч} \\ \textbf{из III по IV – ю} & G_3 = G_2 - w_3, \quad \text{кг/ч} \\ \textbf{из n – 1 по n – ю} & G_{n-1} = G_{n-2} - w_{n-1}, \quad \text{кг/ч} \end{array}\right\} \qquad (15)$$

Концентрация выпариваемого раствора на выходе из ступени определяется по уравнениям:

$$b_1 = \frac{G_н b_н}{G_н - w_1}, \% \text{ мас.};$$

$$b_2 = \frac{G_н b_н}{G_н - w_1 - w_2}, \% \text{ мас.};$$

$$b_3 = \frac{G_н b_н}{G_н - w_1 - w_2 - w_3}, \% \text{ мас.}$$

и для любой ступени формула принимает следующий вид:

$$b_n = \frac{G_н b_н}{G_н - w_1 - w_2 - w_3 - ... - w_n}, \% \text{ мас.} \qquad (16)$$

Общий перепад давления в МВУ определяется как

$$\Delta P = P_1 - P_k, \text{ бар}, \qquad (17)$$

При предварительном расчете предполагается, что перепады давления пара по ступени будут одинаковыми, т.е.

$$\Delta p_i = \frac{\Delta P}{n}, \text{ бар}. \qquad (18)$$

Тогда давление вторичного пара в паровом пространстве аппаратов составит:

I-я ступень: $P_I = P_1 - \Delta p_i$, бар;

II-я ступень: $P_{II} = P_I - \Delta p_i$, бар;

III-я ступень: $P_{III} = P_{II} - \Delta p_i$, бар и так далее.

4.2.3 Определение полезного перепада температур на МВУ

а) Физико-химическая температурная депрессия для каждой ступени выпаривания определяется по уравнению:

$$\Delta_1' = \omega \cdot \Delta_1, °C, \quad (19)$$

где Δ_1 - значение температурной депрессии при атмосферном давлении, °С. Табличные значения Δ_1 в зависимости от концентрации заданного раствора можно получить из справочников [1,4,6,7,II,I3,I4,27,30]. При определении Δ_1 в выпарных аппаратах принимают концентрацию раствора на выходе из аппарата. Только для прямоточных аппаратов расчет ведут по средней концентрации раствора в аппарате:

$$b_{ср} = 0,5(b_{i,вх} + b_{i,вых}); \ \% \text{ мас}$$

ω - поправка на давление. На промпредприятиях выпаривание часто ведут под различным давлением, отличным от атмосферного как в большую, так и в меньшую стороны. В таких случаях поправку на давление вычисляют по формуле И.А. Тищенко

$$\omega = 0,01622\frac{T^2}{r}, \quad (20)$$

T - температура кипения чистого растворителя (воды), К, при давлении вторичного пара в аппарате; определяется по давлению P_I, P_{II}, P_{III}, ...из [3];

r - теплота парообразования воды при давлении вторичного пара в аппарате, кДж/кг; определяется по давлению P_I, P_{II}, P_{III}, ... из [3].

б) Гидростатическая температурная депрессия учитывается в выпарных аппаратах с вертикальным контуром естественной циркуляции. Определение ее происходит следующим образом.

За счет слоя кипящей жидкости в кипятильной трубке получаем дополнительное гидростатическое давление

$$\Delta p = 0{,}5 H_K g \rho_P \text{, Па,} \qquad (21)$$

где H_K - величина "кажущегося" уровня раствора в аппарате, м.

H_k рекомендуется принимать в зависимости от свойств раствора от 0,3 до 0,8 высоты кипятильных трубок. Меньшие значения принимаются для первых ступеней, большие – для последних;

ρ_P - плотность раствора в аппарате, кг/м^3. Определяется по концентрации и ориентировочной температуре кипения раствора в данной ступени из [4];

g - ускорение свободного падения, g=9,81 м/с^2.

Гидростатический эффект Δp вызывает повышение температуры кипения раствора, что является причиной возникновения гидростатической температурной депрессии Δ_2, °С.

Определяется действительное давление на середине высоты слоя кипящего раствора в трубках как

$$P_Г = P_{ВТ} + \Delta p, \text{ Па}, \qquad (22)$$

где $P_{ВТ}$ - давление вторичного пара в сепараторе выпарного аппарата, Па; определяется по рекомендациям 4.2.2.

По вычисленному действительному давлению $P_Г$ из [3,4] находят температуру насыщения $t_Г$, °С. Соответствен-

но по давлению $\mathbf{P_{ВТ}}$ из [3,4] также определяем температуру насыщения при отсутствии гидростатического эффекта $\mathbf{t_{ВТ,}}$ °C. Теперь гидростатическую температурную депрессию можно вычислить по формуле

$$\Delta_2 = t_г - t_{ВТ,}\ °C. \qquad (23)$$

Гидростатическая температурная депрессия увеличивается с понижением давления и для аппаратов с естественной циркуляцией находится в пределах от 0,5 в первых ступенях до 3÷5 °С при работе под вакуумом.

В пленочных выпарных аппаратах гидростатическую температурную депрессию не учитывают ввиду очень низких значений кажущегося уровня.

В аппаратах с принудительной циркуляцией кипение раствора в вертикальных трубках практически отсутствует и поэтому Δ_2 для них нельзя рассчитать по формулам (21), (22) и (23). Однако, учитывая, что раствор в трубках перед вскипанием нагревается, следует отметить некоторое уменьшение температурного перепада, аналогичное гидростатической температурной депрессии. Величину ее в ориентировочных расчетах можно принять равной 1÷2 °С независимо от давления пара в аппарате.

в) Гидродинамическая температурная депрессия Δ_3 возникает вследствие гидродинамических сопротивлений в паропроводах, соединяющих соседние ступени МВУ. Эти сопротивления приводят к незначительному снижению давления насыщенного пара и связанному с этим снижению температуры насыщения, которое в каждом интервале между ступенями на практике составляет 0,5÷1,5 °С и в среднем может быть принято $\Delta_3 = 1$ °C.

Общий температурный перепад на МВУ:

$$\Delta t_{общ} = t_1 - t_к, °C, \quad (24)$$

где $t_к$ - температура конденсации вторичного пара последней ступени, °С.

Разность между температурой конденсации греющего пара и средней температурой кипения раствора в выпарном аппарате называют полезной разностью температур. Полезная разность температур на всю МВУ будет меньше общего (располагаемого) перепада на величину суммы всех температурных потерь, т.е.

$$\Delta t_{пол} = \Delta t_{общ} - (\sum_{1}^{n} \Delta_1' + \sum_{1}^{n} \Delta_2 + \sum_{1}^{n-1} \Delta_3), °C, \quad (25)$$

где $\sum_{1}^{n} \Delta_1'$ - сумма физико-химических температурных депрессий во всех ступенях установки, °С;

$\sum_{1}^{n} \Delta_2$ - сумма гидростатических температурных депрессий во всех ступенях установки, °С;

$\sum_{1}^{n-1} \Delta_3$ - сумма гидродинамических температурных депрессий во всех интервалах между ступенями установки, °С.

4.2.4 Предварительное распределение полезной разности температур по ступеням МВУ

По опытным данным предварительно задаются соотношением коэффициентов теплопередачи K_i в ступенях МВУ. Наиболее часто рекомендуются следующие соотношения для установок с аппаратами естественной циркуляции раствора:

1. Прямоточная МВУ.

II ступени $K_1:K_2=a_1:a_2=1:0,6$;
III ступени $K_1:K_2:K_3=a_1:a_2:a_3=1:0,7:0,4$;
IV ступени $K_1:K_2:K_3:K_4=a_1:a_2:a_3:a_4=1:0,8:0,55:0,3$.

2. Противоточная МВУ:

II ступени $K_1:K_2=a_1:a_2=1:0,67$;
III ступени $K_1:K_2:K_3=a_1:a_2:a_3=1:0,97:0,88$;
IV ступени $K_1:K_2:K_3:K_4=a_1:a_2:a_3:a_4=1:0,95:0,88:0,84$.

3. МВУ с параллельным питанием ступеней раствором:

II ступени $K_1:K_2=a_1:a_2=1:0,92$;
III ступени $K_1:K_2:K_3=a_1:a_2:a_3=1:0,95:0,91$;
IV ступени $K_1:K_2:K_3:K_4=a_1:a_2:a_3:a_4=1:0,95:0,89:0,85$.

Однако указанные рекомендации являются ориентировочными и не всегда оправдываются на практике.

Для МВУ с аппаратами принудительной циркуляции рекомендуются следующие ориентировочные соотношения коэффициентов теплопередачи:

II ступени $K_1:K_2=a_1:a_2=1:0,85$;
III ступени $K_1:K_2:K_3=a_1:a_2:a_3=1:0,9:0,8$;
IV ступени $K_1:K_2:K_3:K_4=a_1:a_2:a_3:a_4=1:0,95:0,85:0,8$.

Далее проводим предварительное распределение полезной разности температур, считая, что тепловые нагрузки ступеней МВУ пропорциональны количеству выпариваемой в них воды, т.е. $\mathbf{Q_i} \equiv \mathbf{w_i}$.

Распределение полезной разности температур может быть выполнено различным образом:

а) с целью получения одинаковых поверхностей теплообмена аппаратов в каждой ступени МВУ, т.е. чтобы $\mathbf{F_1 = F_2 = F_3 = \ldots = F_n}$. В этом случае $\mathbf{\Delta t_i}$ для каждой ступени определяется по формуле

$$\mathbf{\Delta t_i = \Delta t_{пол} \frac{\frac{w_i}{a_i}}{\sum_1^n \frac{w}{a}}, °C,} \qquad (26)$$

где

$$\mathbf{\sum_1^n (w/a) = (w_1/a_1) + (w_2/a_2) + (w_3/a_3) + \ldots + (w_n/a_n);}$$

б) с целью получения минимальной суммарной поверхности теплообмена выпарных аппаратов МВУ, т.е. чтобы

$$\mathbf{F_1 + F_2 + F_3 + \ldots F_n \Rightarrow min.}$$

В этом случае

$$\mathbf{\Delta t_i = \Delta t_{пол} \frac{\left(\frac{w_i}{a_i}\right)^{0,5}}{\sum_1^n \left(\frac{w}{a}\right)^{0,5}}, °C,} \qquad (27)$$

где

$$\mathbf{\sum_1^n (w/a)^{0,5} = (w_1/a_1)^{0,5} + (w_2/a_2)^{0,5} + (w_3/a_3)^{0,5} + \ldots + (w_n/a_n)^{0,5}.}$$

В обоих случаях необходимо сделать проверку полученных результатов по формуле

$$\Delta t_{пол} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \ldots + \Delta t_n, \text{°C}.$$

По полученным выше данным составляют табл.1 температурного режима первого варианта работы МВУ и уточняют величины принятых ранее (4.2.2) давлений вторичного пара.

1.Температура кипения раствора в I ступени

$$t_I = t_1 - \Delta t_1, \text{°C};$$

2.Температура вторичного пара I ступени

$$\tau_1 = t_I - \left(\Delta_1'\right)_1 - \left(\Delta_2\right)_1, \text{°C};$$

3. По найденной температуре τ_1 из [3] определяется давление вторичного пара в I ступени P_1 бар.

4.Температура греющего пара II ступени

$$t_2 = \tau_1 - \left(\Delta_3\right)_1, \text{°C}$$

5. По найденной температуре t_2 из [3] определяется давление греющего пара II ступени P_2, бар:

6. Температура кипения раствора во II ступени

$$t_{II} = t_2 - \Delta t_2, \text{°C}$$

7. Температура вторичного пара второй ступени

$$\tau_2 = t_{II} - \left(\Delta_1'\right)_2 - \left(\Delta_2\right)_2, \text{°C}$$

8. По найденной температуре τ_2 из [3] определяется давление вторичного пара во II ступени $\mathbf{P_{II}}$, бар, и так далее для всех ступеней МВУ.

В конце расчета определятся температура конденсации t_K вторичного пара в конденсаторе $t_K = \tau_n - (\Delta_3)_n$, °С, где t_K должно соответствовать заданному давлению в конденсаторе P_K. При значительном расхождении (свыше 5%) найденных давлений вторичного пара с ранее принятыми следует уточнить величину физико-химической температурной депрессии во всех ступенях установки.

На базе заданных величин и вычисленных температур составляется таблица по следующей форме (таблица 1 на стр. 44).

Ориентировочно температура конденсата определяется по соотношению

$$\mathbf{t_{конд,i} = t_i - 2, °C.} \qquad (28)$$

4.2.5 Определение коэффициентов теплопередачи в выпарных аппаратах МВУ

Для расчета выпарных аппаратов с цилиндрическими кипятильными трубками, толщина стенок которых не более 2,5..3 мм, можно пользоваться формулой

. Таблица 1

Наименование параметров	Обозначение и размерность	Номера ступеней			
		1	2	…	n
Температура греющего пара	t, °C				
Температура кипения раствора	$t_{B,}$ °C				
Температурные депрессии	Δ_1, °C Δ_2, °C Δ_3, °C				
Температура вторичного пара	τ, °C				
Температура конденсата греющего пара	$t_{конд}$, °C				
Энтальпия греющего пара	i', кДж/кг				
Энтальпия вторичного пара	i", кДж/кг				

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{1}}{\frac{\mathbf{1}}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\mathbf{1}}{\alpha_2} + \mathbf{R}_{заг} + \mathbf{R}_{окс}}, \ \mathbf{Вт}/\left(\mathbf{м}^2 \cdot \mathbf{К}\right), \qquad (29)$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к наружной стенке трубы, Вт/(м^2·К);

α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к выпариваемому раствору, Вт/(м^2·К);

$\delta_{ст}$ - толщина стенки кипятильной трубы, м.

$\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/(м·К);

$\mathbf{R}_{заг}$ - термическое сопротивление загрязнений с обеих сторон кипятильной трубы, (м^2·К)/Вт. Значение $\mathbf{R}_{заг}$ выбирают по экспериментальным данным [8,2,20], но если известны толщины отложений на внутренней и наружной поверхностях δ_1 и δ_2 и их коэффициенты теплопроводности λ_1 и λ_2, то $\mathbf{R}_{заг}$ вычисляют по формуле

$$\mathbf{R}_{заг} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2},\ \left(\mathbf{м^2 \cdot K}\right)/\mathbf{Вт}; \qquad (30)$$

$\mathbf{R}_{окс} = (1,0..1,2)\cdot 10^{-4},\ \left(\mathbf{м^2 \cdot K}\right)/\mathbf{Вт}$; - термическое сопротивление оксидной пленки (учитывается только для труб из углеродистой стали).

Часто расчетный коэффициент теплопередачи вычисляют по формуле

$$\mathbf{K}_{расч} = \mathbf{K}_т \cdot \psi,\ \mathbf{Вт}/\left(\mathbf{м^2 \cdot K}\right), \qquad (31)$$

где $\mathbf{K}_т$ - коэффициент теплопередачи, найденный по формуле (29) в случае, когда $\mathbf{R}_{заг} = \mathbf{0}$;

ψ - поправочный коэффициент на загрязнение, величина которого находится в пределах от 0,7 до 0,9 в зависимости от количества отложений и их теплопроводности.

4.2.5.I Выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора.

При кипении раствора, движущегося внутри трубы, имеют место две зоны теплообмена и гидродинамики:

а) Зона от начала обогрева до сечения, в котором стенка трубы достигает температуры насыщения, соответствующей давлению в этом сечении, т.е. зона, в которой происходит только повышение температуры раствора при отсутствии процесса кипения. Это так называемая конвективная зона.

б) Зона развитого кипения.

Методика расчета теплопередачи при пузырьковом кипении в трубе [9] рекомендует следующий его порядок:

I. Выбирают отношение площади сечения обратной циркуляционной трубы выпарного аппарата $\mathbf{f_ц, м^2}$, к площади поперечного сечения трубного пучка $\mathbf{f_o, м^2}$. Рекомендуется $\mathbf{f_ц / f_o = 0{,}1..0{,}4.}$

2. Определяют размер, пропорциональный отрывному диаметру парового пузыря

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_g)}}\ , \text{м}, \qquad (32)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения для раствора, Н/м. Определяется по концентрации и температуре выпариваемого раствора из [4] или по Приложению 2;

ρ_L - плотность раствора, кг/м^3; определяется по концентрации и температуре раствора из [4] или по Приложению 2;

ρ_g - плотность вторичного пара, кг/м^3; определяется по давлению вторичного пара из [3];

$\mathbf{g}$ - ускорение свободного падения, $\mathbf{g = 9{,}81\ м/с^2}$.

3. Определяют число Прандтля для раствора по формуле:

$$\mathbf{Pr_L = \frac{c_L \cdot \mu_L}{\lambda_L}}, \qquad (33)$$

где $\mathbf{c_L}$ - изобарная теплоемкость раствора, Дж/(кг·К);

$\mathbf{\mu_L}$ - динамический коэффициент вязкости раствора, Па·с;

$\mathbf{\lambda_L}$ - теплопроводность раствора, Вт/(м·К).

Указанные теплофизические свойства и число Прандтля определяют по концентрации и температуре раствора в данной ступени из [4] или по Приложению 2.

5. Кратностью циркуляции $\mathbf{n}$ называют отношение количества раствора, кг/ч, циркулирующего в контуре выпарного аппарата, к паропроизводительности аппарата $\mathbf{w, кг/ч}$. Определяется по формуле:

$$\mathbf{n = C\left(\frac{L}{d}\right)^{0,32}\left(\frac{f_и}{f_0}\right)^{0,29}\left(\frac{\mu_g}{\mu_L}\right)^{0,25}\left(\frac{\rho_L}{\rho_g}\right)^{0,27}\left(\frac{\delta}{d}\right)^{0,52} \cdot Pr_L^{0,41}\left(\frac{r_g}{c_L \Delta t}\right)^{1,67}}, \qquad (34)$$

где $\mathbf{C}$ – коэффициент, значение которого выбирают в зависимости от типа выпарного аппарата по табл. 2.

$\mathbf{L, d}$ - длина и внутренний диаметр кипятильной трубы, м. Выбирается для заданного типа аппарата по [10];

$\mathbf{\mu_g}$ - динамический коэффициент вязкости вторичного пара, Па·с; выбирается по параметрам пара из [3];

$\mathbf{r_g}$ - теплота парообразования вторичного пара, Дж/кг;

$\mathbf{\Delta t}$ - полезная разность температур в данном аппарате, °С или К.

Таблица 2 Характеристики циркуляционного контура выпарного аппарата

Обозначение аппарата ГОСТ 1987-73	C в формуле (34)	$H_{тр}$, м	$L_{тр}$, м	$D_{тр}$, м	$\zeta_м$
Тип I Исполнение I:	0,064	$0,6\ D_к$	$0,785\ D_к$	$\sqrt{\frac{4f_0}{\pi}}$	0,35
Тип II Исполнение II:	0,068	$1,5\ D_к$	$1,3D_к+0,6$	$\sqrt{\frac{4f_0}{\pi}}$	0,72
Тип II Исполнение I:	0,083	$0,6\ D_к$	$0,75D_к+0,6$	$\sqrt{\frac{4f_0}{\pi}}$	1,32

Обозначения в таблице 2:

$\mathbf{H_{тр}}$ - высота трубопровода парорастворной смеси относительно верхней трубной решетки;

$\mathbf{L_{тр}}$ - длина трубопровода парорастворной смеси;

$\mathbf{D_{тр}}$ - диаметр трубопровода парорастворной смеси;

$\zeta_м$ - суммарный коэффициент местных сопротивлений трубопровода парорастворной смеси;

$\mathbf{D_К}$ - диаметр корпуса греющей камеры;

Пределы применения формулы (34):

$$\mathbf{L/d = 60,5..150}\ ;\quad \delta/\mathbf{d} = (\mathbf{6,5..8,2})\cdot\mathbf{10^{-2}}\ ;$$

$$\mathbf{f_Ц/f_0 = 0,1..0,4}\ ;\quad \mathrm{Pr_L} = \mathbf{1,43..21}\ ;$$

$$\mu_L/\mu_g = \mathbf{17,9..357}\ ;\quad \mathbf{r_g/(c_L\cdot\Delta t) = 13,7..61}\ ;$$

$$\rho_g/\rho_L = (\mathbf{7,35..119})\cdot\mathbf{10^{-5}}\ ;\quad \mathbf{C = 0,064..0,083; n = 12..150.}$$

5. Определяют массовое паросодержание двухфазного потока на выходе из кипятильных труб

$$\mathbf{x = 1/n.} \tag{35}$$

6. Вычисляют количество раствора, поступающего в кипятильные трубы

$$\mathbf{G_0 = nw, кг/ч.} \tag{36}$$

7. Определяют площадь сечения трубного пучка аппарата

$$\mathbf{f_0 = 0,25\pi d^2 z, м^2,} \tag{37}$$

где **z** - число труб в греющей камере, шт.; ориентировочно выбирается по [10].

8. Находят массовую скорость двухфазового потока по формуле

$$\mathbf{S = 0,205\left[G_0/(3600\cdot f_0)\right],\ кг/(м^2\cdot c).} \tag{38}$$

9. Определяют критерий Рейнольдса потока жидкости в конвективной зоне кипятильной трубы:

$$\mathbf{Re_L} = \frac{\mathbf{G_0 d}}{\mathbf{3600 \cdot f_0 \cdot \mu_L}}. \qquad (39)$$

Если $\mathrm{Re_L} < 2200$, то переходят к другому варианту расчета, уменьшая число труб в греющей камере z до тех пор, пока число $\mathrm{Re_L}$ не станет больше или равным 2200. Если $\mathrm{Re} > 9000$, то принимают $\varphi = 1$ (в формуле (40)).

10. В диапазоне $\mathbf{2200 \le Re_L < 9000}$ коэффициент φ определяют как.

$$\varphi = \mathbf{0,00155302} \cdot \mathrm{Re_L^3} - \mathbf{3,4} \cdot \mathrm{Re_L^2} \cdot \mathbf{10^{-7}}$$

или из таблицы 3

Таблица 3 Зависимость коэффициента φ от $\mathbf{Re_L}$

$\mathbf{Re_L}$	2200	2300	2500	3000	3500
φ	0,22	0,35	0,45	0,59	0,70
$\mathbf{Re_L}$	5000	6000	7000	8000	9000
φ	0,86	0,91	0,96	0,98	0,99

11. Критерий Нуссельта вычисляется по формуле

$$\mathbf{Nu} = \mathbf{0,021} \cdot \mathrm{Re_L^{0,8}}\, \mathrm{Pr_L^{0,43}} \cdot \varphi. \qquad (40)$$

Далее определяется коэффициент теплоотдачи со стороны раствора в зоне конвективного теплообмена:

$$\alpha_C = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{d}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (41)$$

12. Находят температуру стенки трубы со стороны конденсирующегося пара:

$$t'_w = 0{,}5(t + t_B), ^\circ\text{C}, \quad (42)$$

где t - температура греющего пара, ºС;

t_B – температура кипения раствора, ºС.

13. Определяют температуру пленки конденсата:

$$t_{пл} = 0{,}5(t + t'_w), ^\circ\text{C}. \quad (43)$$

14. По табл. 4 в зависимости от $t_{пл}$ выбирают коэффициент А, т.е. $A = f(t_{пл})$.

Таблица 4 - Коэффициент А для воды в зависимости от $t_{пл}$

$t_{пл}$, $^0C^0C$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
А	1270	1470	1700	1900	2070	2190	2300	2370	2410	2430	2430

15. Температурный напор «насыщенный пар-стенка» при конденсации вычисляют по соотношению

$$\Delta t' = t - t'_w, ^\circ\text{C}. \quad (44)$$

16. Коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного водяного пара рекомендуется вычислять по формуле

$$\alpha_E = \mathbf{0,92A}\left(\frac{r_{gr}}{L \cdot \Delta t'}\right)^{0,25}, \ \text{Вт}/\left(\text{м}^2 \cdot \text{К}\right), \qquad (45)$$

где r_{gr} - теплота парообразования для греющего пара, кДж/кг; выбирается по параметрам пара из таблиц [3].

17. Усредненную температуру стенки трубы в конвективной зоне определяют из выражения:

$$\bar{t}_W = \frac{\alpha_C \cdot t_B + \alpha_e \cdot t}{\alpha_C + \alpha_e}, \ ^\circ\text{C}. \qquad (46)$$

18. Для определения размеров конвективной зоны предварительно вычисляют следующие коэффициенты:

а) $$B = \frac{r_g \rho_L \rho_g}{9,8\left(t_B + 273,16\right)\left(\rho_L - \rho_g\right)}, \ \text{кг}/\left(\text{м}^2 \cdot \text{К}\right). \qquad (47)$$

Здесь r_g в Дж/кг.

б) $$П = 3,14Zd, \ \text{м}; \qquad (48)$$

в) $$R = \alpha_c П, \ \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \qquad (49)$$

г) $$Q_C = G_O c_L / 3600, \ \text{Вт}/\text{К}; \qquad (50)$$

д) $$\Psi = 2Q_C / R, \ \text{м}; \qquad (51)$$

е) $$\psi = \left(\rho_g / \rho_L\right)^{0,5}\left(\mu_L / \mu_g\right)^{0,1} \qquad (52)$$

19. Вычисляют параметр двухфазного потока

$$X_{tt} = \left(\frac{1 - x}{x} \right)^{0,9} \cdot \psi \qquad (53)$$

и далее определяют структуру двухфазного потока в зависимости от величины $1/X_{tt}$ и S по рис. 12. Если при кипении имеет место туманообразный поток в трубах, который недопустим при работе выпарного аппарата, то нужно перейти к другому варианту расчета, увеличивая число труб в греющей камере или внутренний диаметр кипятильной трубы d.

20. Объемная доля жидкости R_L в двухфазном потоке и множитель, учитывающий потери давления в двухфазном потоке Φ_{tt}, определяют в зависимости от X_{tt} по графикам рис.13.

21. Определяют массовое паросодержание двухфазного потока, равное 1/3 от x: $x_1 = x/3$ и соответственно ему – параметр двухфазного потока

$$X'_{tt} = \left(\frac{1 - x_1}{x_1} \right)^{0,9} \cdot \psi. \qquad (54)$$

22. Объемную долю жидкости R'_L и множитель Φ'_{tt} определяют в зависимости от X'_{tt} по графикам рис.13.

23. Определяют массовое паросодержание двухфазного потока, равное 2/3 от x: $x_2 = 2x/3$, и соответственно ему – параметр двухфазного потока:

$$X''_{tt} = \left(\frac{1 - x_2}{x_2} \right)^{0,9} \cdot \psi. \qquad (55)$$

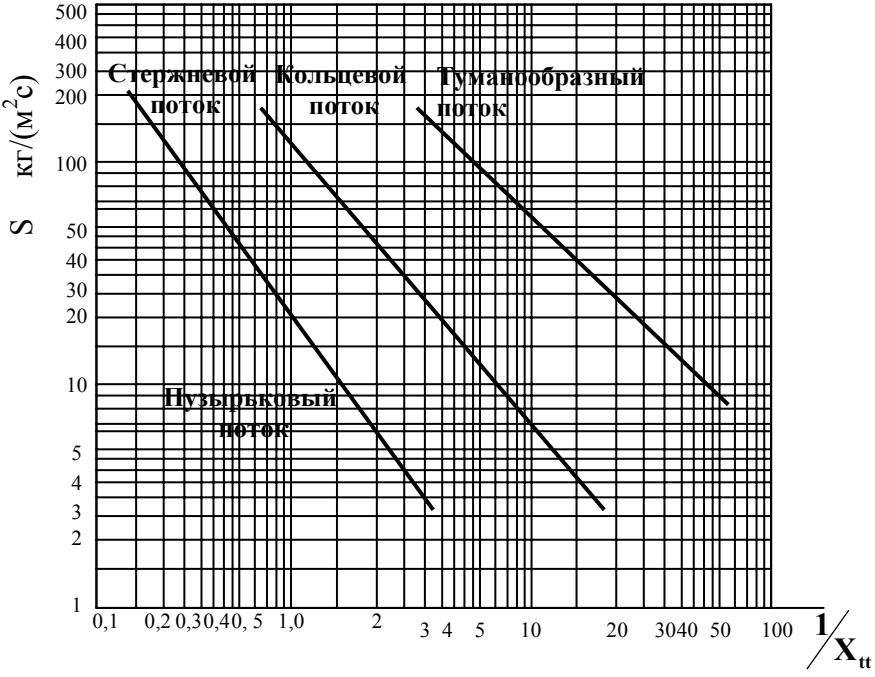


Рис. 12 Структура двухфазного потока в трубах

24. Объемную долю жидкости $\mathbf{R}_{\mathbf{L}}^{''}$ и множитель $\mathbf{\Phi}_{\mathbf{tt}}^{''}$ определяют в зависимости от $\mathbf{X}_{\mathbf{tt}}^{''}$ по графикам рис.13.

25. Вычисляют количество жидкой фазы на выходе из кипятильных труб:

$$\mathbf{G}_{\mathbf{L}} = \mathbf{G}_{\mathbf{0}} - \mathbf{w}\text{, кг/ч.} \qquad (56)$$

26. Определяют диаметр трубопровода парорастворной смеси, так называемой трубы вскипания. В современных выпарных аппаратах кипение раствора происходит непосредственно в трубе вскипания, установленной над греющей каме-

рой. Кипение в трубах предотвращается за счет гидростатического давления столба жидкости в трубе вскипания [10].

$$\mathbf{D_{tp}} = \left(\frac{\mathbf{4f_o^{'}}}{\pi} \right)^{0,5}, \text{ м}, \tag{57}$$

где $f_o^{'}$ - площадь поперечного сечения трубопровода парорастворной смеси, м^2. Принимается [9] $\mathbf{f_o^{'} = f_o}$.

27. Число Рейнольдса для потока в зоне течения парорастворной смеси определяют по приведенной скорости жидкой фазы:

$$\mathbf{Re_{tp}} = \frac{\mathbf{G_L D_{tp}}}{\mathbf{3600 f_o^{'} \mu_L}}. \tag{58}$$

28. Коэффициент трения λ_o для парорастворной смеси определяют в зависимости от $\mathbf{Re_{tp}}$ по графикам рис.14, т.е. $\lambda_o = \lambda_o\left(\mathbf{Re_{tp}}\right)$.

29. Число Рейнольдса для потока в зоне кипения определяют по приведенной скорости жидкой фазы:

$$\mathbf{Re_в} = \frac{\mathbf{G_o\left(1 - x_2\right)d}}{\mathbf{3600 f_o \cdot \mu_L}}. \tag{59}$$

30. Коэффициент трения $\lambda_{ов}$ для потока в зоне кипения определяют в зависимости от $\mathbf{Re_B}$ по графикам рис.14, т.е. $\lambda_{ов} = \lambda_{ов}\left(\mathbf{Re_B}\right)$.

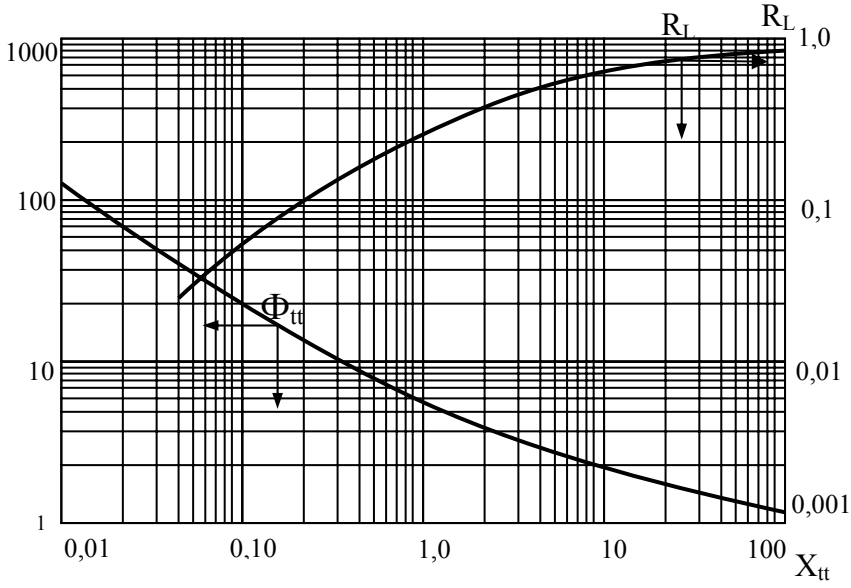


Рис.13 Соотношение Локкарта-Мартинелли
для потери давления на трение

31. Вычисляют коэффициенты для определения размеров конвективной зоны:

а) $$\Delta P_o = \frac{1}{2g}\left(\frac{G_o}{3600 \cdot f_o}\right)^2 \frac{1}{\rho_L}, \text{кг/м}^2; \qquad (60)$$

б) $$S_o = \left(\Phi''_{tt}\right)^2 \left(1 - x_2\right)^2. \qquad (61)$$

32. Плотность двухфазного потока раствора на выходе из кипятильных труб вычисляют по формуле:

$$\rho_{tp} = \rho_L R_L + \rho_g \left(1 - R_L\right), \text{кг/м}^3. \qquad (62)$$

33. Высоту трубопровода парорастворной смеси (трубы вскипания) $\mathbf{H_{tp}}$ относительно верхней трубной решетки выбирают по типу аппарата из табл.2, где $\mathbf{D_к}$ - диаметр кожуха греющей камеры аппарата, м, [10].

34. Определяют статические потери давления в трубопроводе парорастворной смеси:

$$\Delta P'_{tp} = \rho_{tp} \cdot H_{tp}, \text{ кг/м}^2. \qquad (63)$$

35. Сумму местных сопротивлений трубопровода парорастворной смеси вычисляют по формуле

$$\sum_{i=1}^{n} \zeta_{itp} = \zeta_м + 1. \qquad (64)$$

Здесь значения $\zeta_м$ выбирают из табл.2 по принятому типу аппарата.

36. Потери давления на преодоление трения и местных сопротивлений в трубопроводе парорастворной смеси вычисляют по соотношению

$$\Delta P''_{tp} = \frac{1}{2g\rho_L}\left(\frac{G_L \cdot \Phi_{tt}}{3600 \cdot f'_o}\right)^2 \left(\lambda_o \frac{L_{tp}}{D_{tp}} + \sum_{i=1}^{n} \zeta_{itp}\right), \text{ кг/м}^2 \qquad (65)$$

где $\mathbf{L_{tp}}$ - длина трубопровода парорастворной смеси (выбирают по типу аппарата из табл.2).

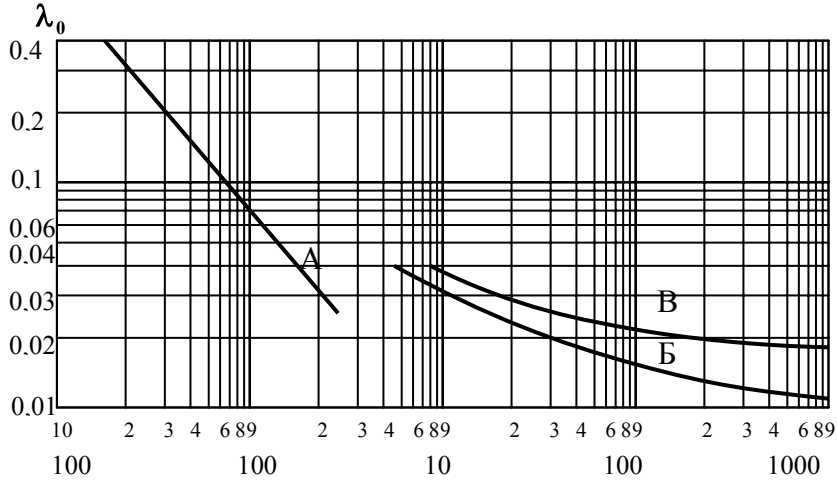


Рис.14 Диаграмма для определения коэффициента трения в прямых трубах: А – гладкие и шероховатые трубы; Б – гладкие трубы (медь, латунь, свинец); В – шероховатые трубы (сталь, чугун)

37. Суммарные потери давления в трубопроводе пароводяной смеси определяют по формуле

$$\Delta P_{тр} = \Delta P'_{тр} + \Delta P''_{тр}, \text{ кг/м}^2. \qquad (66)$$

38. Вычисляют коэффициент в формуле для определения размеров конвективной зоны:

$$Z_{в} = \frac{\lambda_{ов} \cdot L}{d} + 1. \qquad (67)$$

39. Вычисляют потери давления на ускорение парорастворной смеси:

$$\Delta P_o = 2\Delta P_o \left[\frac{(1-x)^2}{R_L} + \frac{\rho_L x^2}{\rho_g (1-R_L)} - 1 \right], \text{ кг/м}^2 . \quad (68)$$

40. Находят усредненную по высоте зоны кипения плотность двухфазного потока, определяемую по массовому паросодержанию 1/3 от x,

$$\bar{\rho}_{tp} = \rho_L R'_L + \rho_g (1 - R'_L), \text{ кг/м}^3 . \quad (69)$$

41. Вычисляют коэффициенты для формулы определения размеров конвективной зоны:

а) $$Y = \bar{\rho}_{tp} + \frac{\lambda_{ов}}{d} \Delta P_o S_o, \text{ кг/м}^3 ; \quad (70)$$

б) $$I = \Delta P_{tp} + \rho_{tp} L + \Delta P_o S_o Z_в, \text{ кг/м}^2 ; \quad (71)$$

в) $$\theta = \bar{t}_w - t_в, \text{ °C} ; \quad (72)$$

г) $$в = \Psi I / Y, \text{ м}^2 ; \quad (73)$$

д) $$a = \frac{2\theta в + \Psi Y - I}{Y}, \text{ м} . \quad (74)$$

42. Определяют длину конвективной зоны кипятильной трубы:

$$L_C = \left(0,25a^2 + в\right)^{0,5} - 0,5a, \text{ м} . \quad (75)$$

Формулу (75) используют при расчете аппаратов, выпаривающих водные растворы в диапазоне изменения параметров:

$$\mathbf{L/d = 60{,}5..150;} \qquad \mu_L / \mu_{H_2O} = \mathbf{1..1{,}4};$$

$$\mathbf{f_ц / f_o = 0{,}1..0{,}4;} \qquad \rho_L / \rho_{H_2O} = \mathbf{1..1{,}45;}$$

$$\zeta_м = \mathbf{0,32..1,32}; \qquad \mathbf{P_B = 0{,}12..3 \ бар(абс.);}$$

$$\mathbf{P_1 = 1{,}4..21 бар;} \qquad \Delta t = 12..40 \ ^\circ C.$$

43. Вычисляют длину зоны кипения:

$$\mathbf{L_в = L - L_C}, \ \mathbf{м}. \tag{76}$$

44. Рассчитывают скорость потока на выходе из кипятильных труб

$$\mathbf{v'_{tp} = \frac{0{,}000278\left[\left(w/\rho_g\right)+\left(G_L/\rho_L\right)\right]}{f_0}, м/с} \tag{77}$$

и скорость раствора в трубах

$$\mathbf{v_L = \frac{G_0}{3600 f_0 \rho_L}, м/с,} \tag{78}$$

и далее среднюю логарифмическую скорость потока в трубах по формуле:

$$\mathbf{v_{cp} = \frac{v'_{tp} - v_L}{\ln\left(v'_{tp}/v_L\right)}, м/с.} \tag{79}$$

45. Вычисляют коэффициент теплоотдачи со стороны раствора в зоне кипения:

$$\alpha_b = 5{,}08\frac{\lambda_L}{d}\frac{\left(\frac{10C_L\mu_L}{\lambda_L}\right)^{0,25}\left(\frac{v_{cp}\cdot d\cdot\rho_L}{\mu_L}\right)^{0,55}}{\left(\frac{\rho_L}{\rho_g}-1\right)^{0,8}\left(\frac{1}{\sigma C_L}\right)^{0,45}L_B^{0,25}}, \text{Вт}/\left(\text{м}^2\cdot\text{К}\right). \quad (80)$$

46. Вычисляют усредненное по длине трубы значение коэффициента теплоотдачи со стороны раствора:

$$\alpha_L = \frac{\alpha_C L_C + \alpha_B L_B}{L}, \text{Вт}/\left(\text{м}^2\cdot\text{К}\right). \quad (81)$$

47. По формулам (29) или (31) определяют коэффициент теплопередачи в выпарном аппарате с естественной циркуляцией при условии, что $\alpha_1 = \alpha_e$ и $\alpha_2 = \alpha_L$, $\text{Вт}/\left(\text{м}^2\cdot\text{К}\right)$.

4.2.5.2. Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора

Для выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией процесс парообразования в зоне подогрева раствора отсутствует, поэтому интенсивность теплообмена в основном определяется скоростью движения раствора в кипятильных трубках [16].

1. Температуру раствора на выходе из теплообменных труб греющей камер вычисляют по следующему соотношению:

$$t_2'' = t_2' + \Delta t_2, \text{°C}, \quad (82)$$

где $\mathbf{t_2^{'}}$ - температура раствора, поступающего на вход в теплообменные трубки греющей камеры, °С;

$\mathbf{\Delta t_2}$ - перегрев раствора в теплообменных трубках, °С.

Для аппаратов с принудительной циркуляцией раствора $\mathbf{\Delta t_2 = 1..3\ °C.}$ В первом приближении принимается $\mathbf{(\Delta t_2)_1 = 1{,}5\ °C.}$ Затем эта величина уточняется методом итераций после определения коэффициента теплопередачи К, Вт/(м^2·К).

2. Коэффициент теплоотдачи от греющего пара к наружной поверхности теплообменных труб α_1 вычисляют по формуле:

$$\alpha_1 = 1{,}15\frac{A \cdot B}{\left[L\left(t^{'} - \bar{t}_w\right)\right]^{0,25}},\ Вт/\left(м^2 \cdot К\right), \qquad (83)$$

где $\mathbf{A = r_{гр}^{0,25}}$. Здесь $\mathbf{r_{гр}}$ - теплота парообразования греющего пара данного аппарата, Дж/кг. Определяют по давлению греющего аппарата из [3].

$\mathbf{B = \left(\frac{g \cdot \rho_1 \lambda_1^3}{\nu_1}\right)^{0,25}}$. Здесь g - ускорение свободного падения, $g = 9{,}81\ м/с^2$, ρ_1 - плотность конденсата при средней температуре пленки $\bar{t}_{пл}$, кг/м^3; определяется по [3,4];

ν_1 - коэффициент кинематической вязкости конденсата при средней температуре пленки $\bar{t}_{пл}$, $\nu_1 = \mu_1 / \rho_1$, м^2/с;

μ_1 - коэффициент динамической вязкости конденсата при средней температуре пленки $\bar{t}_{пл}$, Па·с;

t' - температура насыщенного греющего пара, поступающего в греющую камеру аппарата, °С; определяется по давлению насыщения $P_н$, бар;

$\bar{t}_w$ - средняя температура стенки теплообменных труб со стороны конденсирующего пара, °С; определяется по формуле

$$\bar{t}_w = t' - \frac{K}{\alpha_1}\left(t' - \bar{t}_2\right), \quad °C \tag{84}$$

методом итераций. В первом приближении принимается $\left(K/\alpha_1\right)_i \cong 0.3$ и затем уточняется после определения коэффициентов α_1 и K;

$\bar{t}_2$ - средняя температура раствора в теплообменных трубах греющей камеры, °С, определяется по формуле

$$\bar{t}_2 = 0{,}5\left(t'_2 + t''_2\right), °C. \tag{85}$$

$\bar{t}_{пл}$ - средняя температура пленки конденсирующегося пара на трубах греющей камеры, °С,

$$\bar{t}_{пл} = 0{,}5\left(t' + \bar{t}_w\right), °C; \tag{86}$$

L - длина теплообменных труб греющей камеры, м. Определяется по типу аппарата из [10].

3. Коэффициент теплоотдачи от труб к выпариваемому раствору α_2 определяют по соотношению

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_2}, Вт/\left(м^2 \cdot K\right), \tag{87}$$

где λ_2 - коэффициент теплопроводности при средней температуре $\bar{t}_2$ раствора в теплообменных трубах, Вт/(м·К). Определяется по концентрации раствора и его средней температуре из [4];

$\mathbf{d_2}$ - внутренний диаметр теплообменной трубы, м. Выбирается в соответствии с рекомендациями из [10];

4. Критерий Нуссельта для выпариваемого раствора в случае ламинарного и переходного режимов его движения определяют по формуле

$$\mathbf{Nu_2 = K_0\, Pr_2^{0,33}\left(\mu_2 / \mu_{CT}\right)^{0,14}}, \qquad (88)$$

где $\mathbf{K_0}$ - безразмерный комплекс:

а) ламинарное движение выпариваемого раствора $\mathbf{Re_2 = 20 \div 2000}$; $\mathbf{Pr_2 = 0{,}6 \div 2500}$:

$$\mathbf{K_0 = 1{,}86\, Re_2^{0,33}\left(d_2 / L\right)^{0,33}}; \qquad (89)$$

б) переходный режим движения выпариваемого раствора $\mathbf{Re_2 = 2 \cdot 10^3 \div 10^4; Pr_2 = 0{,}6 \div 2500:}$

$$\mathbf{K_0 = 0{,}116\left(Re_2^{0,67} - 125\right)\left[1 - \left(d_2 / L\right)^{0,67}\right]}. \qquad (90)$$

5. Критерий Нуссельта при турбулентном режиме движения выпариваемого раствора $\mathbf{Re_2 = 10^4 \div 5 \cdot 10^6; Pr_2 = 0{,}6 \div 2500:}$

$$\mathbf{Nu_2 = 0{,}023\, Re_2^{0,8}\, Pr_2^{0,4}}. \qquad (91)$$

Здесь $\mathbf{Re_2}$ - критерий Рейнольдса для выпариваемого раствора

$$\mathbf{Re_2} = \frac{\mathbf{W_2 \cdot d_2}}{\boldsymbol{\nu_2}}, \qquad (92)$$

где $\mathbf{W_2}$ - средняя скорость движения раствора по теплообменным трубам, м/с. Оптимальный вариант выпарного аппарата определяют по оптимальному значению скорости движения раствора $(\mathbf{W_2})_{\text{опт}}$, которое рассчитывают по экстремальной величине приведенных годовых расчетных затрат $З_{год}$, руб/год, на осуществление конкретного процесса выпаривания (см.гл.5). Ориентировочный диапазон изменения скорости движения раствора $\mathbf{W_2 = 1 \div 4\ м/с;}$

$\boldsymbol{\nu_2}$ - коэффициент кинематической вязкости при средней температуре раствора $\bar{\mathbf{t}}_2$ в теплообменных трубах, $м^2/с$. Определяется по концентрации и средней температуре раствора из [4], $\boldsymbol{\nu_2 = \mu_2 / \rho_2, м^2/с;}$

$\boldsymbol{\mu_2}$ - коэффициент динамической вязкости при средней температуре раствора, Па·с;

$\boldsymbol{\rho_2}$ - плотность раствора, $кг/м^3$. Определяется по концентрации и средней температуре раствора $\bar{\mathbf{t}}_2$ в теплообменных трубах из [4];

$\mathbf{Pr_2}$ - критерий Прандтля при средней температуре раствора в теплообменных трубах греющей камеры:

$$\mathbf{Pr_2} = \frac{\mathbf{c_2\, \nu_2\, \rho_2}}{\boldsymbol{\lambda_2}}, \qquad (93)$$

где $\mathbf{c_2}$ - изобарная теплоемкость раствора при средней температуре $\bar{\mathbf{t}}_2$, $\mathbf{Дж/(кг \cdot К)}$. Определяется по концентрации и $\bar{\mathbf{t}}_2$

раствора из [4]. По указанным параметрам раствора непосредственно из [4] можно получить значение $\mathbf{Pr_2}$;

$\mu_{ст}$ - коэффициент динамической вязкости раствора при средней температуре стенки со стороны выпариваемого раствора $\bar{t}''_w$, $\mathbf{Па \cdot с}$. Выбирается из [4] по концентрации и $\bar{t}''_w$;

$\bar{t}''_W$ - средняя температура стенки теплообменных труб со стороны раствора, ˚С; определяется по формуле

$$\bar{t}''_W = \bar{t}_2 + \frac{K}{\alpha_2}\left(t' - \bar{t}_2\right), \ ^\circ C \qquad (94)$$

методом итераций. В первом приближении принимается $\left(K/\alpha_2\right)_1 \cong 0.5$ и затем уточняется после определения коэффициентов α_2 и K.

6. Термическое сопротивление материала теплообменных труб греющей камеры вычисляют по формуле

$$R_{ст} = \delta_{ст}/\lambda_{ст}, \ (м^2 \cdot К)/Вт \qquad (95)$$

где $\delta_{ст}$ - толщина стенки теплообменной трубы, м; выбирается по типу аппарата из [10];

$\lambda_{ст}$ -коэффициент теплопроводности теплообменных труб, Вт/(м·К); определяется по табл. 5.

7. Термическое сопротивление слоя отложений, находящегося на внутренней поверхности теплообменных труб греющей камеры определяется как

$$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \ (м^2 \cdot К)/Вт, \qquad (96)$$

Таблица 5. Коэффициенты теплопроводности и значение термического сопротивления материала теплообменных труб

Материал теплообменных труб	Теплопроводность материала $\lambda_{ст}$, Вт/(м·К)	Толщина стенки $\delta_{ст}$, м	Термическое сопротивление $R_{ст}$, $(м^2 \cdot К)/Вт$
Сталь углеродистая марки ВСт3сп, ВСт3пс,ВСт3пс	60	0,002	$3{,}34 \cdot 10^{-5}$
Сталь коррозионностойкая марки ХI8Н1ОТ Х17Н13М2Т 0Х23Н28М3Д3Т 000Х16Н15М3	16	0,002	$1{,}25 \cdot 10^{-4}$
Титановые сплавы	15	0,002	$1{,}33 \cdot 10^{-4}$

где δ_2 - толщина слоя отложений на внутренней поверхности теплообменных труб, м. Принимается $\delta_2 = \mathbf{const}$ по исходным данным или на основании опытной зависимости от скорости движения раствора при различной продолжительности работы аппарата $\tau_Р$ между очистками, т.е. $\delta_2 = \mathbf{f(W_2, \tau_Р)}$. Ориентировочно $\delta_2 = \mathbf{0{,}1..0{,}5,}$ мм;

λ_2 - коэффициент теплопроводности слоя отложений, Вт/(м·К). Определяется по табл. 6.

Таблица 6. Ориентировочные значения термических сопротивлений слоя отложений

Наименование отложений	Коэффициент теплопроводности слоя отложений λ_2, Вт/(м·К)	Термическое сопротивление слоя отложений R_2, (м^2·К)/Вт
Полимеризующееся вещество	1,12	0,00045
Гипс	0,63	0,00083
Известь	1,2	0,000415
Кокс	0,7	0,000715
Накипь	1,52	0,00033
Ржавчина	1,0	0,0005
Хлористый кальций	0,635	0,0008
Хлористый натрий	3,03	0,000165
Каустическая сода	2,5	0,0002

8. По формуле (29) определяют коэффициент теплопередачи в выпарном аппарате с принудительной циркуляцией и вычисляют отношения $(K/\alpha_1)_P$ и $(K/\alpha_2)_p$.

9. Производится проверка первого приближения отношения коэффициента теплопередачи K к коэффициенту теплоотдачи со стороны конденсирующего греющего пара α_1 по соотношению

$$\varepsilon_1 = \frac{\left|\left(K/\alpha_1\right)_P - \left(K/\alpha_1\right)_1\right|}{\left(K/\alpha_1\right)_1} \le 0{,}3. \qquad (97)$$

10. Производится проверка первого приближения отношения коэффициента теплопередачи K к коэффициенту теплоотдачи α_2 со стороны выпариваемого раствора по соотношению

$$\varepsilon_2 = \frac{\left|\left(K/\alpha_2\right)_P - \left(K/\alpha_2\right)_1\right|}{\left(K/\alpha_2\right)_1} \le 0{,}3. \qquad (98)$$

Если неравенства пунктов 9 и 10 не соблюдаются, то полученные расчетным путем величины $\left(K/\alpha_1\right)_P$ и $\left(K/\alpha_2\right)_P$ следует принять в качестве второго приближения и повторить расчет, начиная с формулы (84) до тех пор, пока неравенства (97) и (98) не будут соблюдены.

11. Если полезной разности температур Δt_{CP} в исходных данных нет, то ее определяют из равенства

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_Б - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_Б / \Delta t_M)}, {}^\circ C, \qquad (99)$$

где $\Delta t_Б$ - наибольший температурный напор между теплоносителями в греющей камере, ${}^\circ C$:

$$\Delta t_Б = t' - t_2', {}^\circ C; \qquad (100)$$

Δt_M - наименьший температурный напор между теплоносителями, ${}^\circ C$.

$$\Delta t_M = t' - t_2'', {}^\circ C. \qquad (101)$$

12. Производят проверку первого приближения величины перегрева выпариваемого раствора в трубах греющей камеры. Для этого определяют расчетную величину $\Delta t_2, ^\circ C$, по формуле

$$\Delta t_2 = \frac{4(t' - t_2') \cdot L}{\frac{d_2 \rho_2 C_2 W_2}{K} + 2L}, ^\circ C. \qquad (102)$$

При определении оптимального варианта выпарного аппарата перегрев раствора вычисляют при изменении скорости движения раствора по теплообменным трубам.

Проверку первого приближения $(\Delta t_2)_1$ производят по соотношению

$$\varepsilon_3 = \frac{|\Delta t_2 - (\Delta t_2)_1|}{(\Delta t_2)_1} \le 0{,}1. \qquad (103)$$

При соблюдении неравенств по формулам (103), (97) и (98) второе приближение следует принять окончательным. Если неравенства не соблюдаются, то рассчитанную величину перегрева Δt_2 следует принять в качестве второго приближения и повторить расчет, начиная с формулы (82) по (103) включительно. Затем выбирается третье приближение и т.д. вплоть до соблюдения неравенства по формуле (103).

После определения коэффициентов теплопередачи для всех ступеней выпаривания необходимо найти их соотношение

$$\frac{K_1}{K_1} : \frac{K_2}{K_1} : \frac{K_3}{K_1} : ... : \frac{K_n}{K_1} = a_1 : a_2 : a_3 : ... : a_n$$

и сравнить полученные результаты с ранее принятым соотношением для первого приближения (см. 4.2.4.). При расхождениях более ±10% следует принять в качестве второго приближения полученное расчетное соотношение коэффициентов теплопередачи и повторять расчет, начиная с формулы (26) или (27) до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность $\leq 10\%$.

4.2.6. Определение расхода пара на первую ступень МВУ

Для каждой ступени выпарной установки предварительно определяются действительные значения следующих величин:

а) коэффициента испарения α_i, показывающего, сколько кг воды выпаривается за счет тепла конденсации 1 кг греющего пара, по формуле

$$\alpha_i = \frac{i_i' - t_{конд,i} \cdot C_{конд,i}}{i_i'' - t_{в,i} C_{2i}}, \qquad (104)$$

где i_i', i_i'' - соответственно энтальпия греющего и вторичного пара i - й ступени, кДж/кг; принимается по табл. 1, п. 4.2.4,

$t_{конд,i}$ - температура конденсата греющего пара i-ой ступени, °С; принимается по табл. 1, п. 4.2.4.

$C_{конд,i}$ - изобарная теплоемкость конденсата греющего пара i-ой ступени, кДж/(кг·К); выбирается по $t_{конд,i}$ из [4,12];

$t_{в,i}$ - температура кипения раствора в i-ой ступени, °С; принимается по табл. 1, п. 4.2.4;

C_{2i} - изобарная теплоемкость кипящего раствора в i-й ступени, кДж/(кг·К) выбирается по концентрации и $t_{B,i}$ раствора из [4].

Ориентировочный диапазон изменения α_i от 0,95 до 0,99;

б) коэффициента самоиспарения раствора β_i, учитывающего дополнительного количество воды, которое может быть выпарено за счет самоиспарения вследствие падения его температуры при поступлении в ступень с пониженным давлением, по формуле

$$\beta_i = \frac{t_{B,i-1} - t_{B,i}}{i_i'' - t_{B,i} C_{2i}}, \qquad (105)$$

где $t_{B,i-1}, t_{B,i}$ - температура кипения раствора в предыдущей и рассматриваемой ступенях выпарной установки, ^{0}C; принимается по табл. 1, п. 4.2.4.

Коэффициент β_i, может быть отрицательным, положительным или равным нулю. Ориентировочный диапазон его изменения $\pm$(0,012..0,05);

в) коэффициента самоиспарения конденсата γ_i, если в схеме МВУ предусмотрено частичное использование тепла конденсата предыдущей ступени в последующей, осуществляемое при помощи расширительных устройств, в которых происходит самовскипание конденсата с образованием пара, по формуле

$$\gamma_i = \frac{(t_{конд} C_{конд})_{i-1} - (t_{конд} C_{конд})_i}{i_i'' - t_{B,i} c_{2i}}, \qquad (106)$$

где $(t_{конд} C_{конд})_{i-1}$ и $(t_{конд} C_{конд})_i$ - энтальпия конденсата греющего пара в предыдущей и рассматриваемой ступенях выпарной

установки, кДж/кг; $\mathbf{t_{конд}}$ принимается по табл. 1, п. 4.2.4, а $\mathbf{C_{конд}}$ из [4] по $\mathbf{t_{конд}}$.

Ориентировочный диапазон изменение коэффициента γ_i находится в пределах от 0 до 0,05.

Прямоточная МВУ. Если не учитывать потери тепла оборудованием МВУ в окружающую среду, то расход греющего пара $\mathbf{D_1}$ на обогрев аппаратов 1 ступени определяют по уравнению

$$\mathbf{D_1 = \frac{W - G_H c_H У + E_1 K_1 + E_2 K_2 + ... + E_{n-1} K_{n-1}}{X}}, \text{ кг/ч} \quad (106)$$

Если не учитывать потери тепла в окружающую среду, то точность расчета $\mathbf{D_1}$ снижается примерно на 1,3..1,5 %, но при этом объем расчета значительно сокращается. Определение $\mathbf{D_1}$ с учетом потерь тепла в окружающую среду приведено в [13, 14].

Коэффициенты $\mathbf{X, У, К_1, К_2, К_3, ...}$ определяются по методу И.А. Тищенко в функции коэффициентов α_i, β_i и γ_i.

1. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент $\mathbf{x_n}$ по формуле

$$\mathbf{x_n = \alpha_n x_{n-1} - \beta_n (x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_{n-1}) + \gamma_n (1 + x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_{n-2})}. \quad (108)$$

Например: $\mathbf{x_1 = \alpha_1;}$

$$x_2 = \alpha_2 x_1 - \beta_2 x_1 + \gamma_2;$$
$$x_3 = \alpha_3 x_2 - \beta_3 (x_1 + x_2) + \gamma_3 (1 + x_1);$$
$$x_4 = \alpha_4 x_3 - \beta_4 (x_1 + x_2 + x_3) + \gamma_4 (1 + x_1 + x_2);$$
$$x_5 = \alpha_5 x_4 - \beta_5 (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) + \gamma_5 (1 + x_1 + x_2 + x_3)$$

и т.д.

2. Определяют коэффициент X выпарной установки:

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + ... + x_n. \qquad (109)$$

3. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент y_n по формуле:

$$y_n = \alpha_n y_{n-1} - \beta_n (y_1 + y_2 + y_3 + ... + y_{n-1} - 1) + \\ + \gamma_n (y_1 + y_2 + y_3 + ... + y_{n-2}) \qquad (110)$$

Например: $y_1 = \beta_1;$

$$y_2 = \alpha_2 y_1 - \beta_2 (y_1 - 1);$$
$$y_3 = \alpha_3 y_2 - \beta_3 (y_1 + y_2 - 1) + \gamma_3 y_1;$$
$$y_4 = \alpha_4 y_3 - \beta_4 (y_1 + y_2 + y_3 - 1) + \gamma_4 (y_1 + y_2);$$
$$y_5 = \alpha_5 y_4 - \beta_5 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - 1) + \gamma_5 (y_1 + y_2 + y_3)$$

и т.д.

4. Определяют коэффициент У для выпарной установки

$$У = y_1 + y_2 + y_3 + ... + y_n. \qquad (111)$$

На этом этапе заканчивается вычисление коэффициентов, если отсутствуют отборы вторичного пара E_n на технологические нужды предприятия.

5. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент $\mathbf{K}_n^{'}$ (отбор вторичного пара $\mathbf{E}_1$) по формуле:

$$\mathbf{K}_n^{'} = \alpha_n \mathbf{K}_{n-1}^{'} - \beta_n (\mathbf{K}_2^{'} + \mathbf{K}_3^{'} + ... + \mathbf{K}_{n-1}^{'}) + \\ + \gamma_n (1 + \mathbf{K}_2^{'} + \mathbf{K}_3^{'} + ... + \mathbf{K}_{n-2}^{'}). \quad (112)$$

Например:

$$\mathbf{K}_1^{'} = 0$$

$$\mathbf{K}_2^{'} = \alpha_2;$$

$$\mathbf{K}_3^{'} = \alpha_3 \mathbf{K}_2^{'} - \beta_3 \mathbf{K}_2^{'} + \gamma_3;$$

$$\mathbf{K}_4^{'} = \alpha_4 \mathbf{K}_3^{'} - \beta_4 (\mathbf{K}_2^{'} + \mathbf{K}_3^{'}) + \gamma_4 (1 + \mathbf{K}_2^{'})$$

$$\mathbf{K}_5^{'} = \alpha_5 \mathbf{K}_4^{'} - \beta_5 (\mathbf{K}_2^{'} + \mathbf{K}_3^{'} + \mathbf{K}_4^{'}) + \gamma_5 (1 + \mathbf{K}_2^{'} + \mathbf{K}_3^{'})$$

и т.д.

6. Определяют коэффициент $\mathbf{K}_1$ для выпарной установки:

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_2^{'} + \mathbf{K}_3^{'} + \mathbf{K}_4^{'} + ... + \mathbf{K}_n^{'}. \quad (113)$$

7. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент $\mathbf{K}_n^{''}$ (отбор вторичного пара $\mathbf{E}_2$) по формуле

$$\mathbf{K}_n^{''} = \alpha_n \mathbf{K}_{n-1}^{''} - \beta_n (\mathbf{K}_3^{''} + \mathbf{K}_4^{''} + ... + \mathbf{K}_{n-1}^{''}) + \\ + \gamma_n (1 + \mathbf{K}_3^{''} + \mathbf{K}_4^{''} + ... + \mathbf{K}_{n-2}^{''}). \quad (114)$$

Например: $\mathbf{K}_1^{''} = \mathbf{K}_2^{''} = 0; \quad \mathbf{K}_3^{''} = \alpha_3;$

$$\mathbf{K}_4^{''} = \alpha_4 \mathbf{K}_3^{''} - \beta_4 \mathbf{K}_3^{''} + \gamma_4;$$

$$\mathbf{K}_5^{''} = \alpha_5 \mathbf{K}_4^{''} - \beta_5 (\mathbf{K}_3^{''} + \mathbf{K}_4^{''}) + \gamma_5 (1 + \mathbf{K}_3^{''})$$

и т.д.

8. Определяют коэффициент $\mathbf{K_2}$ для выпарной установки:

$$\mathbf{K_2 = K_3'' + K_4'' + K_5'' + ... + K_n''}. \qquad (115)$$

9. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент $\mathbf{K_n'''}$ (отбор вторичного пара $\mathbf{E_3}$) по формуле

$$\mathbf{K_n''' = \alpha_n K_{n-1}''' - \beta_n (K_4''' + K_5''' + ... + K_{n-1}''') + \gamma_n (1 + K_4''' + K_5''' + ... + K_{n-2}'''). } \qquad (116)$$

Например: $\mathbf{K_1''' = K_2''' = K_3''' = 0;\quad K_4''' = \alpha_4;}$

$$\mathbf{K_5''' = \alpha_5 K_4''' - \beta_5 K_4''' + \gamma_5;}$$

$$\mathbf{K_6''' = \alpha_6 K_5''' - \beta_6 (K_4''' + K_5''') + \gamma_5 (1 + K_4''')}$$

и т.д.

10. Определяют коэффициент $\mathbf{K_3}$ для выпарной установки

$$\mathbf{K_3 = K_4''' + K_5''' + ... + K_n'''} \qquad (117)$$

и так далее, с учетом, что $\mathbf{K_{n-1} = K_n^{(n-1)} = \alpha_n}$.

11. По формуле (107) вычисляют расход греющего пара D_1, кг/ч.

12. Определяют количество выпаренной воды $\mathbf{w_i}$ по отдельным ступеням установки:

$$\mathbf{w_1 = D_1 x_1 + G_н c_н y_1, кг/ч;}$$

$$\mathbf{w_2 = D_1 x_2 + G_н c_н y_2 - E_1 K_2',\quad кг/ч;}$$

$$\mathbf{w_3 = D_1 x_3 + G_н c_н y_3 - E_1 K_3' - E_2 K_3'',\quad кг/ч;}$$

$$\mathbf{w_4 = D_1 x_4 + G_н c_н y_4 - E_1 K_4' - E_2 K_4'' - E_3 K_4''',\quad кг/ч,\quad и\ т.д.}$$

Количество выпарной воды в любой n – ступени определяют по общему уравнению:

$$w_n = D_1 x_n + G_н c_н y_n - E_1 K_n^{'} - \\ - E_2 K_n^{''} - E_3 K_n^{'''} - ... - E_{n-1} K_n^{(n-1)}, кг/ч \quad (118)$$

13. Определяют общее количество воды, выпаренное во всех ступенях МВУ:

$$\sum W = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + ... + w_n \quad , кг/ч. \quad (119)$$

14. Проверяют совпадение найденного общего количества выпаренной воды во всех ступенях с заданным количеством воды, подлежащим выпариванию в проектируемой МВУ, рассчитанным по формуле (10).

Совпадение количеств выпариваемой воды «по пароотборам» и «по концентрациям» является показателем правильности расчета расхода греющего пара.

Противоточная МВУ. Если не учитывать потери тепла оборудованием МВУ в окружающую среду, то расход греющего пара D_1 на обогрев аппаратов 1-й ступени определяют по уравнению:

$$D_1 = \frac{W(1+Y) - G_н c_н (Y+\beta_n) + E_1 K_1 + E_2 K_2 + E_3 K_3 + ... + E_{n-1} K_{n-1}}{X}, кг/ч \quad (120)$$

1. Для каждой ступени выпаривания, кроме последней, вычисляют коэффициент x_m по формуле

$$x_m = \frac{\alpha_m}{1-\beta_m} x_{m-1} + \frac{\beta_m}{1-\beta_m}(x_1 + x_2 + \ldots + x_{m-1}) + \\ + \frac{\gamma_m}{1-\beta_m}(1 + x_1 + x_2 + \ldots + x_{m-2}) \quad (121)$$

Для последней ступени выпаривания (по ходу пара) определяют коэффициент x_n по формуле

$$x_n = \alpha_n x_{n-1} + \gamma_n (1 + x_1 + x_2 + x_3 + \ldots + x_{n-2}). \quad (122)$$

Например:

$$x_1 = \frac{\alpha_1}{1-\beta_1}; \; x_2 = \frac{\alpha_2}{1-\beta_2} x_1 + \frac{\beta_2}{1-\beta_2} + \frac{\gamma_2}{1-\beta_2};$$

$$x_3 = \frac{\alpha_3}{1-\beta_3} x_2 + \frac{\beta_3}{1-\beta_3}(x_1 + x_2) + \frac{\gamma_3}{1-\beta_3}(1 + x_1);$$

$$x_4 = \frac{\alpha_4}{1-\beta_4} x_3 + \frac{\beta_4}{1-\beta_4}(x_1 + x_2 + x_3) + \frac{\gamma_4}{1-\beta_4}(1 + x_1 + x_2);$$

$$x_5 = \alpha_5 x_4 + \gamma_5 (1 + x_1 + x_2 + x_3).$$

2. Определяют коэффициент X для выпарной установки:

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \ldots + x_n. \quad (123)$$

3. Для каждой ступени выпаривания, кроме последней, вычисляют коэффициент y_m по формуле

$$y_m = \frac{\alpha_m}{1-\beta_m} y_{m-1} + \frac{\beta_m}{1-\beta_m}(1 + y_1 + y_2 + \ldots + y_{m-1}) + \\ + \frac{\gamma_m}{1-\beta_m}(y_1 + y_2 + \ldots + y_{m-2}). \quad (124)$$

Для последней ступени выпаривания вычисляют коэффициент y_n по формуле

$$y_n = \alpha_n y_{n-1} + \gamma_n (y_1 + y_2 + y_3 + ... + y_{n-2}). \quad (125)$$

Например:

$$y_1 = \frac{\beta_1}{1-\beta_1}; \quad y_2 = \frac{\alpha_2}{1-\beta_2} y_1 + \frac{\beta_2}{1-\beta_2}(1 + y_1);$$

$$y_3 = \frac{\alpha_3}{1-\beta_3} y_2 + \frac{\beta_3}{1-\beta_3}(1 + y_1 + y_2) + \frac{\gamma_3}{1-\beta_3} y_1;$$

$$y_4 = \frac{\alpha_4}{1-\beta_4} y_3 + \frac{\beta_4}{1-\beta_4}(1 + y_1 + y_2 + y_3) + \frac{\gamma_4}{1-\beta_4}(y_1 + y_2);$$

$$y_5 = \alpha_5 y_4 + \gamma_5 (y_1 + y_2 + y_3).$$

4. Определяют коэффициент $У$ для выпарной установки:

$$У = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + ... + y_n. \quad (126)$$

На этом этапе заканчивается вычисление коэффициентов, если отсутствуют отборы вторичного пара E_n на технологические нужды предприятия.

5. Для каждой ступени выпаривания, кроме последней, вычисляют коэффициент K'_m (отбор вторичного пара E_1) по формуле

$$K'_m = \frac{\alpha_m}{1-\beta_m} K'_{m-1} + \frac{\beta_m}{1-\beta_m}(K'_2 + K'_3 + ... + K'_{m-1}) + \\ + \frac{\gamma_m}{1-\beta_m}(1 + K'_2 + K'_3 + ... + K'_{m-2}) \quad (127)$$

Для последней ступени выпаривания вычисляют коэффициент K'_n по формуле

$$K'_n = \alpha_n K'_{n-1} + \gamma_n (1 + K'_2 + K'_3 + ... + K'_{n-2}) . \quad (128)$$

Например:

$$K'_1 = 0; \quad K'_2 = \frac{\alpha_2}{1-\beta_2};$$

$$K'_3 = \frac{\alpha_3}{1-\beta_3} K'_2 + \frac{\beta_3}{1-\beta_3} K'_2 + \frac{\gamma_3}{1-\beta_3};$$

$$K'_4 = \frac{\alpha_4}{1-\beta_4} K'_3 + \frac{\beta_4}{1-\beta_4}(K'_2 + K'_3) + \frac{\gamma_4}{1-\beta_4}(1 + K'_2);$$

$$K'_5 = \alpha_5 K'_4 + \gamma_5 (1 + K'_2 + K'_3) .$$

6. Определяют коэффициент K_1 для выпарной установки:

$$K_1 = K'_2 + K'_3 + K'_4 + ... + K'_n . \quad (129)$$

7. Для каждой ступени выпаривания, кроме последней, вычисляют коэффициент K''_m (отбор вторичного пара E_2) по формуле:

$$K''_m = \frac{\alpha_m}{1-\beta_m} K''_{m-1} + \frac{\beta_m}{1-\beta_m}(K''_3 + K''_4 + ... + K''_{m-1}) + \\ + \frac{\gamma_m}{1-\beta_m}(1 + K''_3 + K''_4 + ... + K''_{m-2}) \quad (130)$$

Для последней ступени выпаривания вычисляют коэффициент K''_n по формуле:

$$K''_n = \alpha_n K''_{n-1} + \gamma_n (1 + K''_3 + K''_4 + ... + K''_{n-2}). \quad (131)$$

Например:

$$K''_1 = K''_2 = 0; \quad K''_3 = \frac{\alpha_3}{1-\beta_3};$$

$$K''_4 = \frac{\alpha_4}{1-\beta_4} K''_3 + \frac{\beta_4}{1-\beta_4} K''_3 + \frac{\gamma_4}{1-\beta_4};$$

$$K''_5 = \alpha_5 K''_4 + \gamma_5 (1 + K''_3).$$

8. Определяют коэффициент K_2 для выпарной установки:

$$K_2 = K''_3 + K''_4 + K''_5 + ... + K''_n. \quad (132)$$

9. Для каждой ступени выпаривания, кроме последней, вычисляют коэффициент K'''_m (отбор вторичного пара E_3) по формуле:

$$K'''_m = \frac{\alpha_m}{1-\beta_m} K'''_{m-1} + \frac{\beta_m}{1-\beta_m}(K'''_4 + K'''_5 + ... + K'''_{m-1}) + \\ + \frac{\gamma_m}{1-\beta_m}(1 + K'''_4 + K'''_5 + ... + K'''_{m-2} \quad (133)$$

Для последней ступени выпаривания вычисляют коэффициент K'''_n по формуле:

$$K'''_n = \alpha_n K'''_{n-1} + \gamma_n (1 + K'''_4 + K'''_5 + ... + K'''_{n-2}). \quad (134)$$

Например:

$$K'''_1 = K'''_2 = K'''_3 = 0; \quad K'''_4 = \frac{\alpha_4}{1-\beta_4}; \quad K'''_5 = \alpha_5 K'''_4 + \gamma_5.$$

10. Определяют коэффициент K_3 для выпарной установки:

$$K_3 = K'''_4 + K'''_5 + ... + K'''_n \quad (135)$$

и так далее, с учетом того, что коэффициент при отборе вторичного пара E_{n-1} будет равен $K_{n-1} = K_n^{(n-1)} = \alpha_n$.

Например, для пятиступенчатой МВУ, имеющей отбор E_4,:

$$K_1^{IV} = K_2^{IV} = K_3^{IV} = K_4^{IV} = 0; \quad K_5^{IV} = \alpha_5/(1-\beta_5) \approx \alpha_5, \text{ т.е. } K_4 = \alpha_5.$$

11. По формуле (120) вычисляют расход греющего пара D_1, **кг/ч.**

12. Определяют количество выпаренной воды по отдельным ступеням установкам, например:

$$\left.\begin{aligned}
\mathbf{w_1} &= \mathbf{D_1}\alpha_1 + \left[\mathbf{G_н C_н} - (\mathbf{w_2} + \mathbf{w_3} + \mathbf{w_4} + \mathbf{w_5})\right]\cdot\beta_1;\\
\mathbf{w_2} &= (\mathbf{w_1} + \mathbf{E_1})\alpha_2 + \mathbf{D_1}\gamma_2 + \left[\mathbf{G_н C_н} - (\mathbf{w_3} + \mathbf{w_4} + \mathbf{w_5})\right]\cdot\beta_2;\\
\mathbf{w_3} &= (\mathbf{w_2} - \mathbf{E_2})\alpha_3 + \left(\mathbf{D_1} + \mathbf{w_1} - \mathbf{E_1}\right)\gamma_3 + \left[\mathbf{G_н C_н} - \left(\mathbf{w_4} + \mathbf{w_5}\right)\right]\cdot\beta_3;\\
\mathbf{w_4} &= \left(\mathbf{w_3} - \mathbf{E_3}\right)\alpha_4 + \left(\mathbf{D_1} + \mathbf{w_1} + \mathbf{w_2} - \mathbf{E_1} - \mathbf{E_2}\right)\gamma_4 + \left(\mathbf{G_н C_н} - \mathbf{w_5}\right)\cdot\beta_4;\\
\mathbf{w_5} &= \left(\mathbf{w_4} - \mathbf{E_4}\right)\alpha_5 + \left(\mathbf{D_1} + \mathbf{w_1} + \mathbf{w_2} + \mathbf{w_3} - \mathbf{E_1} - \mathbf{E_2} - \mathbf{E_3}\right)\gamma_5 + \mathbf{G_н C_н}\beta_5
\end{aligned}\right\}(\mathbf{а})$$

Систему уравнений (а) после подстановки численных величин $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \mathbf{E_i}, \mathbf{G_н}, \mathbf{C_н}$ решают относительно $\mathbf{w_1}, \mathbf{w_2}, \mathbf{w_3}, \mathbf{w_4}, \mathbf{w_5}$.

Решить эту систему можно с использованием стандартной подпрограммы или с использованием специализированных математических пакетов (MathCAD, Mathematica и т.д.) на ЭВМ.

Для применения стандартной программы система (а) приводится к виду:

$$\left.\begin{aligned}
\mathbf{a_{00}w_1} + \mathbf{a_{01}w_2} + \mathbf{a_{02}w_3} + \mathbf{a_{03}w_4} + \mathbf{a_{04}w_5} &= \mathbf{a_{05}};\\
\mathbf{a_{10}w_1} + \mathbf{a_{11}w_2} + \mathbf{a_{12}w_3} + \mathbf{a_{13}w_4} + \mathbf{a_{14}w_5} &= \mathbf{a_{15}};\\
\mathbf{a_{20}w_1} + \mathbf{a_{21}w_2} + \mathbf{a_{22}w_3} + \mathbf{a_{23}w_4} + \mathbf{a_{24}w_5} &= \mathbf{a_{25}};\\
\mathbf{a_{30}w_1} + \mathbf{a_{31}w_2} + \mathbf{a_{32}w_3} + \mathbf{a_{33}w_4} + \mathbf{a_{34}w_5} &= \mathbf{a_{35}};\\
\mathbf{a_{40}w_1} + \mathbf{a_{41}w_2} + \mathbf{a_{42}w_3} + \mathbf{a_{43}w_4} + \mathbf{a_{44}w_5} &= \mathbf{a_{45}}.
\end{aligned}\right\}(\mathbf{в})$$

13. Определяют общее количество воды, выпаренное во всех ступенях МВУ:

$$\sum \mathbf{W} = \mathbf{w_1} + \mathbf{w_2} + \mathbf{w_3} + \mathbf{w_4} + \mathbf{...} + \mathbf{w_n}, \mathbf{кг/ч.} \qquad (136)$$

14. Проверяют совпадение найденного общего количества выпаренной воды во всех ступенях с заданным количеством воды, подлежащим выпариванию в проектируемой МВУ,

рассчитанном по формуле (10). Совпадение количеств выпариваемой воды “по пароотборам” и “по концентрациям” является показателем правильности расчета расхода греющего пара.

МВУ с параллельным питанием ступеней раствором. Если не учитывать потери тепла оборудованием МВУ в окружающую среду, то расход греющего пара $\mathbf{D_1}$ на обогрев аппаратов 1-й ступени определяют по уравнению

$$\mathbf{D_1 = \frac{W - C_н\left(G_1 У_1 + G_2 У_2 + G_3 У_3 + ... + G_n У_n\right)}{X} + \frac{E_1(Z_1 - 1) + E_2(Z_2 - 1) + E_3(Z_3 - 1) + ... + E_{n-1}(Z_{n-1} - 1)}{X}}\ \text{, кг/ч,} \quad (137)$$

где $\mathbf{G_1, G_2, G_3, ..., G_n}$ - количество раствора, кг/ч, поступающее в отдельную ступень выпарной установки.

Полное количество выпариваемого раствора составит:

$$\mathbf{G_Н = G_1 + G_2 + G_3 + ... + G_n}\ \text{, кг/ч} \quad . \quad (138)$$

Если все количество начального раствора поровну распределяется между ступенями $\left(\mathbf{G_1 = G_2 = G_3 = ... = G_n = \frac{G_Н}{n}}\right)$, то уравнение (137) примет следующий вид:

$$\mathbf{D_1 = \frac{W - C_н(G_n/n)(У_1 + У_2 + ... + У_n) + E_1(Z_1 - 1) + E_2(Z_2 - 1) + ... + E_{n-1}(Z_{n-1} - 1)}{X}}\ \text{,кг/ч} \quad (139)$$

1. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты $\mathbf{x_n}$ по формуле

$$x_n = \alpha_n x_{n-1} + \gamma_n (1 + x_1 + x_2 + x_3 + \ldots + x_{n-2}) . \qquad (140)$$

Например: $x_1 = \alpha_1$; $x_2 = \alpha_2 x_1 + \gamma_2$;

$x_3 = \alpha_3 x_2 + \gamma_3 (1 + x_1)$;

$x_4 = \alpha_4 x_3 + \gamma_4 (1 + x_1 + x_2)$;

$x_5 = \alpha_5 x_4 + \gamma_5 (1 + x_1 + x_2 + x_3)$; **и т.д.**

2. Определяют коэффициент X для выпарной установки

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \ldots + x_n . \qquad (141)$$

3. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициент y'_n по формуле

$$y'_n = \alpha_n y'_{n-1} + \gamma_n (y'_1 + y'_2 + \ldots + y'_{n-2}) . \qquad (142)$$

Например:

$y'_1 = \alpha_1$; $y'_2 = \alpha_2 y'_1$

$y'_3 = \alpha_3 y'_2 + \gamma_3 y'_1$; $y'_4 = \alpha_4 y'_3 + \gamma_4 (y'_1 + y'_2)$;

$y'_5 = \alpha_5 y'_4 + \gamma_5 (y'_1 + y'_2 + y'_3)$ **и т.д.**

4. Определяют коэффициент $У_1$ для выпарной установки:

$$У_1 = y'_1 + y'_2 + y'_3 + y'_4 + \ldots + y'_n . \qquad (143)$$

5. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты y''_n по формуле

$$y''_n = \alpha_n y''_{n-1} + \gamma_n (y''_2 + y''_3 + y''_4 + ... + y''_{n-2}). \qquad (144)$$

Например:
$$y''_1 = 0 \ ; \ y''_2 = \alpha_2 \ ;$$
$$y''_3 = \alpha_3 y''_2 \ ; \ y''_4 = \alpha_4 y''_3 + \gamma_4 y''_2 \ ;$$
$$y''_5 = \alpha_5 y''_4 + \gamma_5 (y''_2 + y''_3) \ \text{и т.д.}$$

6. Определяют коэффициент $У_2$ для выпарной установки:

$$У_2 = y''_2 + y''_3 + y''_4 + ... + y''_n . \qquad (145)$$

7. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты y'''_n по формуле

$$y'''_n = \alpha_n y'''_{n-1} + \gamma_n (y'''_3 + y'''_4 + y'''_5 + ... + y'''_{n-2}). \qquad (146)$$

Например
$$y'''_1 = y'''_2 = 0 \ ;$$
$$y'''_3 = \alpha_3 \ ;$$
$$y'''_4 = \alpha_4 y'''_3 \ ;$$
$$y'''_5 = \alpha_5 y'''_4 + \gamma_5 y'''_3$$
и т.д.

8. Определяют коэффициент $У_3$ для выпарной установки:

$$У_3 = y'''_3 + y'''_4 + y'''_5 + ... + y'''_n . \qquad (147)$$

9. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты $У^{IV}_n$ по формуле

$$y_n^{IV} = \alpha_n y_{n-1}^{IV} + \gamma_n (y_4^{IV} + y_5^{IV} + ... + y_{n-2}^{IV}). \quad (148)$$

Например:
$$y_1^{IV} = y_2^{IV} = y_3^{IV} = 0;$$
$$y_4^{IV} = \alpha_4;$$
$$y_5^{IV} = \alpha_4 y_4^{IV};$$
$$y_6^{IV} = \alpha_6 y_5^{IV} + \gamma_6 y_4^{IV}$$

и т.д.

10. Определяют коэффициент $У_4$ для выпарной установки:

$$У_4 = y_4^{IV} + y_5^{IV} + y_6^{IV} + ... + y_n^{IV}. \quad (149)$$

и так далее, с учетом того, $У_n = y_n^{(n)}$.

На этом этапе заканчивается вычисление коэффициентов, если отсутствуют отборы вторичного пара E_n на технологические нужды предприятия.

11. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты z_n' по формуле

$$z_n' = \alpha_n z_{n-1}' + \gamma_n (z_1' + z_2' + z_3' + ... + z_{n-2}'). \quad (150)$$

Например:
$$z_1' = 1; \quad z_2' = \alpha_2 z_1';$$
$$z_3' = \alpha_3 z_2' + \gamma_3 z_1';$$
$$z_4' = \alpha_4 z_3' + \gamma_4 (z_1' + z_2');$$
$$z_5' = \alpha_5 z_4' + \gamma_5 (z_1' + z_2' + z_3');$$ и т.д.

12. Определяют коэффициент Z_1 для выпарной установки:

$$\mathbf{Z_1 = z_1' + z_2' + z_3' + ... + z_n' .} \qquad (151)$$

13. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты $\mathbf{z_n''}$ по формуле

$$\mathbf{z_n'' = \alpha_n z_{n-1}'' + \gamma_n (z_2'' + z_3'' + z_4'' + ... + z_{n-2}'').} \qquad (152)$$

Например: $\mathbf{z_1'' = 0;\quad z_2'' = 1;}$

$\mathbf{z_3'' = \alpha_3 z_2'';\quad z_4'' = \alpha_4 z_3'' + \gamma_4 z_2'';}$

$\mathbf{z_5'' = \alpha_5 z_4'' + \gamma_5 (z_2'' + z_3'')}$ **и т.д.**

14. Определяют коэффициент $\mathbf{Z_2}$ для выпарной установки:

$$\mathbf{Z_2 = z_2'' + z_3'' + z_4'' ... + z_n'' .} \qquad (153)$$

15. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициент $\mathbf{z_n'''}$ по формуле

$$\mathbf{z_n''' = \alpha_n z_{n-1}''' + \gamma_n (z_3'' + z_4''' + z_5''' ... + z_{n-2}''').} \qquad (154)$$

Например: $\mathbf{z_1''' = z_2''' = 0;\quad z_3''' = 1;}$

$\mathbf{z_4''' = \alpha_4 z_3''';\quad z_5''' = \alpha_5 z_4''' + \gamma_5 z_3'''}$ **и т.д.**

16. Определяют коэффициент $\mathbf{Z_3}$ для выпарной установки:

$$\mathbf{Z_3 = z_3''' + z_4''' + z_5''' ... + z_n''' .} \qquad (155)$$

17. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты $\mathbf{z_n^{IV}}$ по формуле

$$\mathbf{z_n^{IV} = \alpha_n z_{n-1}^{IV} + \gamma_n (z_4^{IV} + z_5^{IV} + z_6^{IV} ... + z_{n-2}^{IV})} \quad . \qquad (156)$$

Например: $\mathbf{z_1^{IV} = z_2^{IV} = z_3^{IV} = 0;} \quad \mathbf{z_4^{IV} = 1;}$

$\mathbf{z_5^{IV} = \alpha_5 z_4^{IV};} \quad \mathbf{z_6^{IV} = \alpha_6 z_5^{IV} + \gamma_6 z_4^{IV}}$ **и т.д.**

18. Определяют коэффициент Z_4 для выпарной установки:

$$\mathbf{Z_3 = z_4^{IV} + z_5^{IV} + z_6^{IV} ... + z_n^{IV}} \qquad (157)$$

и так далее, с учетом того, что $\mathbf{Z_n = z_n^{(n)} = 1.}$

19. По формулам (137) или (139) вычисляют расход греющего пара $\mathbf{D_1}$, **кг/ч.**

20. Определяют количество выпаренной воды $\mathbf{w_i}$ по отдельным ступеням установки:

$$\mathbf{w_1 = D_1 x_1 + G_1 C_H y_1' \text{ ,кг/ч;}}$$

$$\mathbf{w_2 = D_1 x_2 + G_1 C_H y_2' + G_2 C_H y_2'' - E_1 z_2' \text{ ,кг/ч;}}$$

$$\mathbf{w_3 = D_1 x_3 + G_1 C_H y_3' + G_2 C_H y_3'' + G_3 C_H y_3''' - E_1 z_3' - E_2 z_3'' ,}$$

$$\mathbf{w_4 = D_1 x_4 + G_1 C_H y_4' + G_2 C_H y_4'' + G_3 C_H y_4''' + G_4 C_H y_4^{IV} -}$$

$$\mathbf{- E_1 z_4' - E_2 z_4'' - E_3 z_4''' ; \quad и т.д.}$$

кг/ч;

Количество выпаренной воды в любой $\mathbf{n}$-ой ступени определяют по общему уравнению:

$$w_n = D_1 x_n + G_1 C_H y_n' + G_2 C_H y_n'' + G_3 C_H y_n''' + ... + G_n C_H y_n^{(n)} - E_1 z_n' - E_2 z_n'' - E_3 z_n''' - ... - E_{n-1} z_n^{(n-1)} \quad (158)$$

21. Определяют общее количество воды, выпаренной во всех ступенях МВУ:

$$\sum W = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + ... + w_n, \text{ кг/ч.} \quad (159)$$

22. Проверяют совпадение найденного общего количества выпаренной воды во всех ступенях с заданным количеством воды, подлежащим выпариванию в проектируемой МВУ, рассчитанным по формуле (10).

Совпадение количеств выпариваемой воды «по пароотборам» и «по концентрациям» является показателем правильности расчета расхода греющего пара.

Если МВУ работает без перепуска и самоиспарения конденсата, то уравнения (107), (120), (137) и (139) полностью сохраняются, но при определении коэффициентов **X, Y, Z и K** следует принять $\gamma = 0$.

Для МВУ, работающей без отборов вторичного пара, следует принять в тех же уравнениях $E_1 = E_2 = E_3 = ... = E_{n-1} = 0$;

При выборе схемы МВУ для выпаривания данного раствора необходимо руководствоваться некоторыми положениями об их тепловой экономичности.

1. Целесообразнее всего принять в качестве критерия для оценки экономичности работы МВУ удельный расход греющего пара, т.е. количество пара, расходуемого на удаление из раствора 1 кг воды:

$$d = \frac{D_1}{W}, \quad \text{кг/ч.} \quad (160)$$

2. Потеря тепла с уходящим конденсатом минимальна при перепуске его через все ступени. Отвод конденсата отдельно из каждого корпуса ведет к перерасходу греющего пара.

3. Потеря тепла с концентрированным раствором наименьшая в прямоточных МВУ, средняя – в МВУ с параллельным питанием ступеней и максимальная – в противоточных МВУ.

4. Потери тепла в окружающую среду должны быть несколько меньше в противоточных МВУ, имеющих относительно меньшую $\sum \mathbf{F_i}$, благодаря большим коэффициентам теплопередачи.

5. Наибольший расход греющего пара $\mathbf{D_1}$ следует ожидать при одинаковом режиме эксплуатации у противоточных МВУ, требующих еще и дополнительного расхода электроэнергии на привод перекачивающих насосов.

4.2.7. Уточнение величины полезной разности температур по ступеням МВУ

Если общее количество воды, выпариваемое на МВУ, подсчитанное «по пароотборам» (формулы (119), (136) и (159)) не совпадает с заданным для выпаривания количеством воды, подсчитанным "по концентрациям" формула (10), то определяется величина этого расхождения по формуле

$$\mathbf{W - \sum W = \Delta W, \quad кг/ч.} \qquad (161)$$

Затем вводят поправки на нагрузки ступеней по вторичным парам.

1. Распределяется $\mathbf{\Delta W}$ по ступеням МВУ пропорционально количествам выпариваемой воды, подсчитанным по

формулам, приведенным в 4.2.6 для соответствующего типа МВУ, т.е.

$$\Delta w_i = \frac{w_i}{\sum W} \Delta W, \text{ кг / ч.} \qquad (162)$$

Отсюда $\mathbf{w_1^{\partial} = w_1 + \Delta w_1;}$ $\mathbf{w_2^{\partial} = w_2 + \Delta w_2}$ и так далее.

2. Уточняется расход греющего пара $\mathbf{D_1}$ на основании найденных величин $\mathbf{w_i^{\partial}}$ по формулам:

а) прямоточная МВУ:

$$\mathbf{D_1 = \frac{w_1^{\partial} - G_н C_н y_1}{x_1}, \ кг / ч} \ ; \qquad (163)$$

б) противоточная МВУ:

$$\mathbf{D_1 = \frac{w_1^{\partial} - \left[G_н C_н - \left(w_2^{\partial} + w_3^{\partial} + w_4^{\partial} + w_5^{\partial} \right) \right] \cdot \beta_1}{\alpha_1}, \ кг / ч}; \qquad (164)$$

в) МВУ с параллельным питанием:

$$\mathbf{D_1 = \frac{w_1^{\partial} - G_1 C_н y_1'}{x_1}, \quad кг / ч.} \qquad (165)$$

3. Повторяют расчеты по п. 4.2.6. для конкретной МВУ с целью уточнения значений $\mathbf{w_i}$.

4. Вновь проверяют совпадение количеств выпариваемой воды на МВУ “по пароотборам” и “по концентрациям”. Расчеты заканчиваются, когда совпадение достигает точности ±2,5%.

Определяют тепловые нагрузки по ступеням выпаривания по соотношениям:

$$
\begin{aligned}
&\mathbf{Q_1 = D_1 r_1}\ ,\ \mathbf{Вт}\ ;\\
&\mathbf{Q_2 = D_2 r_2 + D_1 \gamma_2 r_2}\ ,\ \mathbf{Вт};\\
&\mathbf{Q_3 = D_3 r_3 + D_2 \gamma_3 r_3}\ ,\ \mathbf{Вт};\\
&\mathbf{Q_4 = D_4 r_4 + [D_2 (1 - \gamma_2) + D_3] \cdot \gamma_4 r_4}\ ,\ \mathbf{Вт};
\end{aligned}
\qquad (166)
$$

и так далее, с корректировкой по особенностям конденсатной схемы МВУ. Приведенные уравнения соответствуют тепловой схеме МВУ на рис.11.

Здесь $\mathbf{r_1, r_2, r_3, ..., r_n}$ - теплота парообразования вторичного пара в ступенях выпаривания, **Дж / кг.**

Определяется по давлению вторичного пара из [3];

$\mathbf{D_1, D_2, D_3, ..., D_n}$ - расход греющего пара на каждую ступень выпаривания МВУ, кг/с.

Определяют:

$\mathbf{D_1}$ - по формулам (107), (120), (137) или (139), в зависимости от типа установки;

$$\mathbf{D_2 = w_1 - E_1;\quad D_3 = w_2 - E_2;\quad D_4 = w_3 - E_3}\quad \textbf{и т.д.}$$

Окончательно уточняются полезные разности температур по ступеням МВУ:

а) в случае выбора одинаковых поверхностей теплообмена аппаратов в каждой ступени МВУ, т.е. $\mathbf{F_1 = F_2 = F_3 = ... = F_n}$ **:**

$$\Delta t_1 = \Delta t_{пол} \frac{Q_1 / K_1}{\sum_1^n (Q_i / K_i)}, \ ^\circ C;$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{пол} \frac{Q_2 / K_2}{\sum_1^n (Q_i / K_i)}, \ ^\circ C;$$

и так далее для всех ступеней, где

$$\sum_1^n (Q_i / K_i) = Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2 + Q_3 / K_3 + ... + Q_n / K_n ;$$

б) в случае выбора минимальной суммарной поверхности теплообмена выпарных аппаратов МВУ, т.е. чтобы $F_1 + F_2 + F_3 + ... + F_n \rightarrow min$:

$$\Delta t_1 = \Delta t_{пол} \frac{(Q_1 / K_1)^{0,5}}{\sum_1^n (Q_i / K_i)^{0,5}}, \ ^\circ C$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{пол} \frac{(Q_2 / K_2)^{0,5}}{\sum_1^n (Q_i / K_i)^{0,5}}, \ ^\circ C$$

и так далее для всех ступеней, где

$$\sum_1^n (Q_i / K_i)^{0,5} = (Q_1 / K_1)^{0,5} + (Q_2 / K_2)^{0,5} + (Q_3 / K_3)^{0,5} + ... + (Q_n / K_n)^{0,5}$$

.

Проверка полученных результатов производится по соотношению

$$\Delta t_{пол} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + ... + \Delta t_n, \ ^\circ C.$$

При расхождениях полученных здесь значений Δt_i^p по каждой ступени с ранее принятыми (п. 4.2.4, формулы (26) и (27)) более ±2,5% необходимо, взяв за второе приближение расчетные значения $\Delta t_i^p, \ ^\circ C,$ произвести новый вариант расчета, предварительно задавшись новым соотношением коэффициентов теплопередачи K_i и подготовив данные для таблицы 1, т.е. составить таблицу температурного режима второго варианта работы МВУ и уточнить величины принятых ранее давлений пара.

Необходимо учитывать, что с изменением Δt_i, изменяются коэффициенты теплопередачи и другие величины.

4.2.8. Поверхность теплообмена выпарных аппаратов.

4.2.8.1. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора.

После проведения всех уточнений необходимо вычислить поверхность теплообмена выпарных аппаратов каждой ступени по уравнению теплопередачи:

$$F_i = \frac{Q_i}{K_i \Delta t_i}, \ м^2, \qquad (167)$$

где Q_i - тепловая нагрузка ступени выпаривания, Вт;

K_i - коэффициент теплопередачи в аппаратах ступени, Вт/(м^2·К);

Δt_i - полезная разность температур в аппарате данной ступени, °С.

Необходимо оценить возможность возникновения первого кризиса кипения в условиях эксплуатации выпарных аппаратов МВУ. Эта оценка проводится для всех ступеней по следующей методике:

1. Определяют коэффициент теплопередачи $K_в$ в аппарате при длине зоны кипения, равной длине кипятильной трубы:

$$K_в = \frac{1}{(1/\alpha_e) + (\delta_{ст}/\lambda_{ст}) + (1/\alpha_в)}, \quad Вт/(м^2 \cdot К), \qquad (168)$$

где α_e - коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного водяного пара, Вт/(м^2·К), формула (45);

$\alpha_в$ коэффициент теплоотдачи со стороны раствора в зоне кипения, Вт/(м^2·К), формула (80).

2. Вычисляют плотность теплового потока через стенку кипятильной трубы:

$$q = K_в(t' - t_в), \ Вт/м^2 , \qquad (169)$$

где t' - температура греющего пара в данном аппарате, °С;

$t_в$ - температура кипения раствора там же, °С.

3. Вычисляют критическую плотность теплового потока для кипящего раствора по формуле:

$$q_{max} = 282{,}33 r_g \rho_g^{0,5} \sigma^{0,25} (\rho_L - \rho_g)^{0,25}, \quad Вт/м^2, \qquad (170)$$

где r_g - теплота парообразования вторичного пара, кДж/кг;

ρ_g - плотность вторичного пара, кг/м^3;

ρ_L - плотность кипящего раствора, кг/м^3;

σ - коэффициент поверхностного натяжения для раствора, Н/м;

4. Проводят сравнение действительной плотности теплового потока с критическим значением:

если $\mathbf{q} \le \mathbf{q}_{max}$, то по каталогу [10] выбирается выпарной аппарат, у которого поверхность теплообмена соответствует рассчитанной по формуле (167);

если $\mathbf{q} > \mathbf{q}_{max}$, то расчет производится снова при уменьшении полезной разности температур $\Delta \mathbf{t}_i$ с целью увеличения поверхности теплообмена выпарных аппаратов. Чтобы уменьшить $\Delta \mathbf{t}_i$ в первую очередь уменьшают давление греющего пара P_1 или увеличивают давление P_K в конденсаторе или последней ступени МВУ.

Минимально допустимая полезная разность температур в аппарате с естественной циркуляцией при выпаривании водных растворов $\Delta t'_{min}$ определяется по формуле

$$\Delta \mathbf{t}_{min} = \Delta \mathbf{t}'_{min} (\mu_L / \mu_{H_2O})^{0,1} (\rho_L / \rho_{H_2O})^{0,35}, ^\circ\mathbf{C}, \quad (171)$$

где $\Delta \mathbf{t}'_{min}$ - минимально полезная допустимая разность температур при работе выпарного аппарата на воде; определяется по графикам рис.15. Для давлений, не указанных на рис.15, значение $\Delta \mathbf{t}'_{min}$ определяется линейной интерполяцией. Затем проверяют необходимое условие устойчивой работы аппарата:

$$\Delta \mathbf{t} \ge \Delta \mathbf{t}_{min} \quad (172)$$

Если $\Delta \mathbf{t} < \Delta \mathbf{t}_{min}$, то имеют место недопустимые пульсации потока и аппарат нормально эксплуатировать невозможно. В этом случае изменяют значение температур греющего пара и

кипящего раствора за счет изменений $\mathbf{P_1}$ и $\mathbf{P_к}$, а затем весь расчет повторяют до соблюдения неравенства (172) во всех ступенях МВУ.

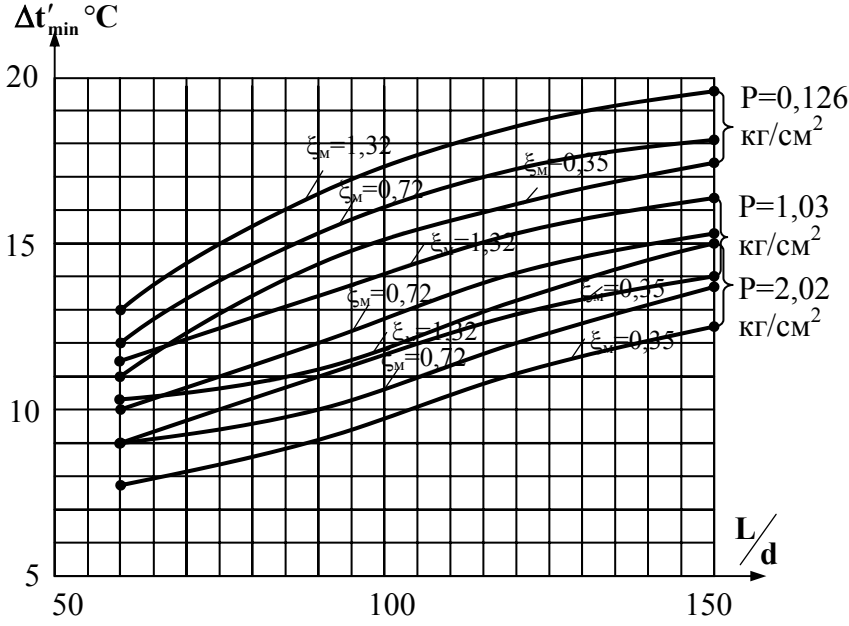


Рис.15 Зависимость минимального допустимого температурного напора $\Delta t'_{min}$ от $\frac{L}{d}$ и $\xi_м$

4.2.8.2.Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора.

Поверхность теплообмена выпарных аппаратов каждой ступени МВУ с принудительной циркуляцией раствора вычисляют по уравнению теплопередачи:

$$\mathbf{F_i = \frac{Q_i}{K_i \Delta t_{ср,i}}, м^2,}$$

где $\mathbf{Q_i}$ - тепловая нагрузка ступени выпаривания, Вт;

$\mathbf{\Delta t_{ср,\,i}}$ - полезная разность температур в аппаратах данной ступени, °С; вычисляется по формуле (99);

$\mathbf{K_i}$ - коэффициент теплопередачи в аппаратах ступени, Вт/(м^2·К); вычисляется по формуле (29) или (31).

Таблица 7

Наименование характеристики	Обозначение	Размерность	Величина
Поверхность теплообмена	$(F)_K$	м^2	
Коэффициент теплопередачи	$(K)_K$	Вт/(м^2·К)	
Производительность циркуляционного контура	$(G_2)_K$	кг/с	
Потеря напора в циркуляционном контуре	$(\Delta P)_K$	Па	
Мощность, потребляемая циркуляционным насосом	$(N)_K$	Вт	
Скорость движения раствора по теплообменным трубам	$(W_2)_K$	м/с	

По каталогу [10] выбирают ближайший по величине поверхности теплообмена выпарной аппарат и в табл.7 записывают его основные характеристики (после проведения гидравлического расчета аппарата).

5. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ РАСТВОРА

Оптимизация – это целенаправленная деятельность, заключающаяся в получении наилучших результатов в соответствующих условиях.

Для определения оптимальной скорости раствора в циркуляционном контуре выпарного аппарата по минимуму годовых приведенных затрат рекомендуется следующее уравнение:

$$\mathbf{W_{2i}^{ОПТ}} = \frac{\left(\mathbf{B_{2i}\alpha_{1i}}\right)^{1,25}}{\left(\mathbf{R_i^{ОПТ}\alpha_{1i} - 1}\right)^{1,25}},\ \mathbf{м/с}, \qquad (174)$$

где α_{1i} - коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара на наружной стенке кипятильной трубы, Вт/(м^2·К);

$\mathbf{R_i^{ОПТ}}$ - оптимальное термическое сопротивление теплопередачи для i – го выпарного аппарата, (м^2·К)/Вт; вычисляется по формуле

$$\mathbf{2ЭR_i^{0,5} + \frac{E^{'}}{z^2}\left(z - 2R_i dz\right) = 0}. \qquad (175)$$

Здесь

$$\mathbf{Э = \frac{10^3 \xi Ц_А}{Ц_{эл}\tau}}, \qquad (176)$$

где ξ -коэффициент, учитывающий амортизацию оборудования выпарной установки и коэффициент экономической эффективности, руб./(руб.год); ξ = **0,23..0,30** руб./(руб.год);

$\mathbf{Ц_А}$ - стоимость оборудования выпарной установки, отнесенная к 1 м^2 поверхности теплообмена выпарного аппарата, руб/м^2 ;

$\mathbf{Ц_{ЭЛ}}$ - стоимость электроэнергии для привода циркуляционного насоса выпарного аппарата, руб/кВт·ч;

τ - время работы выпарной установки, час/год;

$$E' = \frac{\mathbf{0,125 \cdot d \cdot \xi_{ПР} \rho_i B_{2i}^{3,75}}}{\mathbf{\eta_Н L_i}},$$

где **d** - внутренний диаметр кипятильной трубы, м;

$\xi_{ПР}$ - приведенный коэффициент сопротивления циркуляционного контура аппарата. В диапазоне $\mathbf{Re} = 10^4 .. 5 \cdot 10^5$ можно считать $\xi_{ПР} = \mathbf{19,9}$;

ρ_i - плотность выпариваемого раствора в i – м корпусе, кг/м^3;

$$\mathbf{B_{2i}} = \frac{\mathbf{d^{0,2}}}{\mathbf{A_{2i}}} + \mathbf{0,000072} \ ; \qquad (178)$$

$$\mathbf{A_{2i}} = \mathbf{0,0219} \cdot \frac{\lambda_i \, \mathbf{Pr_i^{0,43}}}{\nu_i^{0,8}}, \qquad (179)$$

где λ_i, Вт/(м·К), ν_i, м^2/с, $\mathbf{Pr_i}$ - соответственно коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и число Прандтля выпариваемого раствора в i – м корпусе;

$\eta_Н$ - к.п.д. насосной установки выпарного аппарата; изменяется в пределах 0,5..0,8;

$\mathbf{L_i}$ - высота кипятильной трубы в i – корпусе, м.

$$z = R_i^{3,25} - 3,75R_i^{2,25}\alpha_{1i}^{-1} + 5,165R_i^{1,25}\alpha_{1i}^{-2} -$$
$$-3,01R_i^{0,25}\alpha_{1i}^{-3} + 0,564R_i^{-0,75}\alpha_{1i}^{-4};$$
$$dz = 3,25R_i^{2,25} - 8,44R_i^{1,25}\alpha_{1i}^{-1} + 8,46R_i^{0,25}\alpha_{1i}^{-2} -$$
$$-0,75R_i^{-0,75}\alpha_{1i}^{-3} - 0,42R_i^{-1,75}\alpha_{1i}^{-4};$$

В данном случае значения геометрических, гидравлических и теплофизических параметров в комплексах E' и B_{2i} выбираются конкретно для каждого аппарата выпарной установки по средней концентрации и температуре кипения выпариваемого раствора.

Рекомендуется следующая последовательность операций при определении оптимальной скорости циркуляции во всех аппаратах выпарной установки:

1. В соответствующих диапазонах изменения концентрации и температуры раствора на выпарной установке вычисляют его теплофизические свойства: ρ, кг/м^3; λ, Вт/(м·К); ν, м^2/с и критерий Pr [4].

2. Предварительно принимают значения следующих величин:

d, м; $\xi_{ПР}, \eta_H, l, m, \xi$, руб/(руб.год); $Ц_A$, руб/м2; $Ц_{ЭЛ}$, руб/кВт·ч; τ, ч/год.

3. Вычисляют комплексы $Э$, A_{2i}, B_{2i}, E_i' для каждой ступени выпаривания.

4. По формулам (175) и (174) определяют оптимальные скорости циркуляции в заданном диапазоне изменения величины коэффициента теплоотдачи при конденсации пара и строят графики функции $W_{опт} = f(b_i)$, где за постоянные параметры выбраны α_{1i} и t_{pi} (например, для раствора Na_2SO_4, рис. 16).

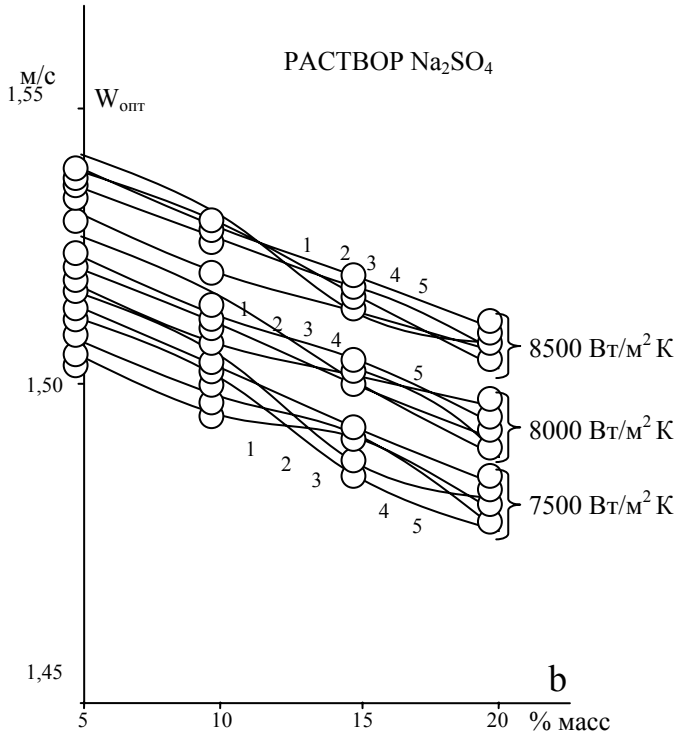


Рис.16 Температура раствора, °С:
1-100; 2-105; 3-110; 4-115; 5-120

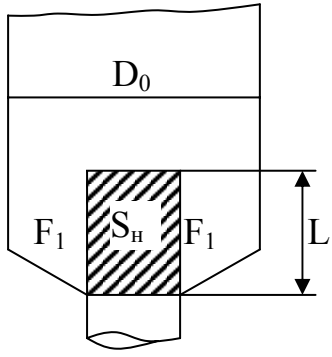


Рис. 17 Конструктивная схема нижней части
сепаратора выпарного аппарата

5. Определяют средние концентрации и температуры кипения раствора в аппаратах t_{pi}, °С; для каждого аппарата определяется коэффициент теплоотдачи α_{1i}, °С; и по найденным $\overline{b_i}, t_{pi}$ и α_{1i} по графикам рис. 16 находят W_{2i} для каждого аппарата МВУ.

Вычисления с целью построения графика $W_{опт} = f(b_i, t_{pi})$ для любого раствора можно произвести на персональном компьютере по программе ″Воск-4″.

6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Гидравлические характеристики парогенерирующей части циркуляционного контура выпарного аппарата с естественной циркуляцией определяются при расчете коэффициента теплоотдачи при кипении раствора α_2. Согласно разделу 4.2.5.1. рассчитываются: V'_{tp} - скорость потока на выходе из кипятильных труб, м/с; V_L - скорость раствора в трубах, м/с; $V_{ср}$ - средняя логарифмическая скорость потока в трубах, м/с.

Расчет основных гидравлических характеристик циркуляционного контура выпарного аппарата с принудительной циркуляцией осуществляется в следующей последовательности:

1. Определяют расход выпариваемого раствора в циркуляционном контуре

$$G_2 = \frac{Q}{C_2\left(t''_2 - t'_2\right)}, \text{ кг/с} \qquad (180)$$

где $\mathbf{Q}$ - величина теплового потока к выпариваемому раствору, Вт;

$\mathbf{C_2}$ - средняя теплоемкость выпариваемого раствора при средней температуре $\overline{\mathbf{t_2}}$, Дж/(кг·К);

$\mathbf{t_2'}$ - температура раствора, поступающего на выпаривание, °С;

$\mathbf{t_2''}$ - температура раствора на выходе из теплообменных труб греющей камеры, °С (см. раздел 4.2.5.2).

2. Вычисляют объемную производительность циркуляционного контура выпарного аппарата

$$\mathbf{V_2} = \frac{\mathbf{G_2}}{\rho_2}, \text{ м}^3/\text{с} \qquad (181)$$

где ρ_2 - плотность раствора при средней температуре $\bar{t}_2$, кг/м^3.

3. Вычисляют приведенный коэффициент гидравлического сопротивления циркуляционного контура:

$$\xi_{пр} = \xi_1' \left(\frac{\mathbf{W_1}}{\mathbf{W_K}} \right)^2 + \xi_2' \left(\frac{\mathbf{W_2}}{\mathbf{W_K}} \right)^2 + \ldots + \xi_m' \left(\frac{\mathbf{W_m}}{\mathbf{W_K}} \right)^2 \qquad (182)$$

где $\mathbf{W_1, ..., W_m}$ - скорость движения раствора в элементах циркуляционного контура, м/с;

$\mathbf{W_K}$ - скорость движения раствора в трубах греющей камеры выпарного аппарата, м/с. Величину $\mathbf{W_i}$ определяют по уравнению неразрывности:

$$\mathbf{G_2} = \mathbf{f_i W_i} \rho_2 = \mathbf{const}, \text{ кг/с.} \qquad (183)$$

Здесь $\mathbf{f_i}$ - площадь поперечного сечения элементов циркуляционного контура, м^2. Величина $\mathbf{f_i}$ типовых аппаратов определяется по эталонным чертежам к каталогу-справочнику [10].

Коэффициенты гидравлического сопротивления элементов циркуляционного контура:

ξ_1' - обтекание цилиндрического тела потоком раствора при его движении в сепараторе к выходному отверстию циркуляционной трубы (рис. 17):

$$\xi_1' = 1{,}15 C_X \frac{S_M / F_1}{\left(1 - S_M / F_0\right)^3} \left(1 - \frac{2L}{D_0}\right)^{0{,}33} \qquad (184)$$

где $\mathbf{C_X}$ - коэффициент лобового сопротивления тела; изменяется в пределах 0,63..0,82 [17];

$\mathbf{F_1}$ - площадь продольного сечения сепаратора за вычетом площади трубы вскипания, м^2;

$\mathbf{S_M}$ - площадь продольного сечения трубы вскипания, м^2;

$\mathbf{F_0}$ - суммарная площадь продольного сечения,

$$F_0 = F_1 + S_M, \text{ м}^2.$$

$\mathbf{L}$ - высота трубы вскипания в сепараторе, м;

$\mathbf{D_0}$ - внутренний диаметр сепаратора вторичного пара, м.

В данном случае $W_1 = G_2 / (\rho_2 \cdot F_1)$, м/с.

ξ_2' - вход раствора из сепаратора в циркуляционную трубу

а) с внезапным сужением потока:

$$\xi_2' = 0,5\left(1 - \frac{F_М}{F_Б}\right) \tag{185}$$

б) с плавным сужением потока: $\xi_2' = 0,186..0,212$.

Здесь $F_М$ - поперечное сечение циркуляционной трубы, м^2;

$F_Б$ - суммарная площадь продольного сечения сепаратора, м^2, $F_Б = F_0$;

W_2 - скорость раствора в меньшем сечении, м/с;

ξ_3' - движение раствора по горизонтальному (наклонному) прямому участку циркуляционной трубы.

Сопротивление трения определяют по формуле:

$$\xi_3' = \lambda \frac{l}{d}, \tag{186}$$

где λ - коэффициент гидравлического трения [8,11,17,18,30].

l - длина прямого участка, м,

d - внутренний диаметр циркуляционной трубы, м.

При турбулентном режиме течения λ определяют по формуле Блазиуса $\left(Re_Ж = 3 \cdot 10^3..10^5\right)$

$$\lambda = 0,3164 / \left(Re_Ж^{0,25}\right) \tag{187}$$

Для $Re_Ж = 10^5..10^8$ справедлива формула Никурадзе

$$\lambda = 0,0032 + \left(0,221 / \mathrm{Re}_{Ж}^{0,237}\right); \qquad (188)$$

или для обоих случаев $\left(\mathrm{Re}_{Ж} = 3 \cdot 10^3 .. 10^8\right)$ - формула Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{1,82 \cdot \lg\left(\mathrm{Re}_{Ж} - 1,64\right)^2}. \qquad (189)$$

В формулах (187)-(189) все физические свойства жидкости отнесены к ее средней температуре, °С.

При числах $\mathrm{Re}_{Ж} > \frac{100}{\overline{\Delta}}$ гидравлическое сопротивление трения определяется только шероховатостью стенки канала и от $\mathrm{Re}_{Ж}$ не зависит. В этой автомодельной области λ определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\left[1,74 + 2\lg\left(1/\overline{\Delta}\right)\right]^2}, \qquad (190)$$

где $\overline{\Delta} = \delta / r$ и δ - средняя высота выступов на поверхности трубы, м;

r - радиус трубы, м;

$\xi_4^{'}$ - движение раствора в верхнем колене циркуляционном трубы.

Суммарное сопротивление состоит из местного сопротивления и сопротивления трения при повороте потока:

$$\xi_4^{'} = K_{\Delta} \cdot K_{Re} \cdot \xi_{М} + \xi_{ТР}, \qquad (191)$$

где K_{Δ} - поправка на величину относительной шероховатости циркуляционной трубы; в диапазоне $2 \cdot 10^3 \le Re_{Ж} \le 4 \cdot 10^5$ при изменении $\bar{\Delta}$ от 0,05 до 0,0001 $K_{\Delta} = (1,65..4)..1,0$ для $R_0/d = 1,5$;

K_{Re} - поправка на величину числа Рейнольдса при движении раствора в циркуляционной трубе; в диапазоне $2 \cdot 10^3 \le Re_{Ж} \le 4 \cdot 10^5$ коэффициент K_{Re} определяют по табл. 8 при условии, что $K_{Re} = 1$ при $Re_{Ж} = 2 \cdot 10^3$;

Таблица 8

$Re_{Ж}$	Относительная шероховатость $\bar{\Delta}$					
	0,05	0,03	0,015	0,008	0,004	0,001
$4 \cdot 10^4$	0,92	0,85	0,76	0,67	0,60	0,50
$4 \cdot 10^5$	1,68	1,53	1,35	1,18	0,99	0,63

$\xi_{М}$ - коэффициент сопротивления для плавного поворота потока.

Определяется из [8,11,17] в зависимости от угла поворота φ, радиуса изгиба трубы R_0 и внутреннего диаметра трубы d;

$\xi_{ТР}$ - коэффициент сопротивления трения для изогнутой трубы.

Поправка на кривизну вводится по формуле

$$\xi_{ТР} = \xi_{ПР} \cdot f(R_0/d) \qquad (192)$$

где $\xi_{ПР}$ - коэффициент сопротивления трения для прямой трубы. Вычисляется по формуле (186);

$\mathbf{f(R_0/d)}$ - функция отношения радиуса изгиба трубы $\mathbf{R_0}$ к ее внутреннему диаметру. Значения функции показаны в табл. 9.

Таблица 9

$\frac{\xi_{ТР}}{\xi_{ПР}}$	2,69	2,26	1,92	1,73	1,58	1,49	1,41	1,36	1,3	1,27
$\mathbf{R_0/d}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

ξ_5' - движение раствора по прямому участку циркуляционной трубы после верхнего колена. Сопротивление трению при движении в прямом участке трубы подсчитывается по формуле (186);

ξ_6' - движение раствора в отводе нижнего колена циркуляционной трубы. Суммарное сопротивление состоит из местного сопротивления и сопротивления трения при повороте потока на угол $\varphi = 90^0$: $\xi_6' = \xi_4'$;

ξ_7' - движение раствора в конфузоре перед насосом с плавным сужением потока. Суммарное сопротивление состоит из сопротивления от ускорения потока раствора и сопротивления трения и определяется по формуле [17, 20].

$$\xi_7' = \xi_{ВЫХ}\left(1 - \frac{F_М}{F_Б}\right) + \xi_{ТР}, \qquad (193)$$

где $F_М$ - площадь выходного отверстия конфузора, м^2.

$F_Б$ - площадь входного отверстия конфузора, м^2.

При $\alpha \le 40^\circ$ коэффициент $\xi_{ВЫХ}$ определяют по табл. 10.

Таблица 10

$l/d_э$	Угол α, градусы				
	0	10	20	30	40
0,15	0,5	0,37	0,27	0,20	0,16
0,60	0,5	0,27	0,18	0,13	0,11

Здесь $d_э = \frac{4F_м}{П_м}$, м,

где $П_м$ - периметр выходного отверстия конфузора, м;

l - длина конфузора, м.

Значение $\xi_{вых}$ относится к скорости потока в меньшем сечении конфузора $F_м$;

Значение $\xi_{тр}$ определяют по табл. 11.

Таблица 11

$F_б/F_м$	Угол α, градусы			
	3	8	12	20
5	0,10	0,03	0,02	0,01
2	0,07	0,03	0,02	0,01

ξ'_8 - движение раствора по прямому вертикальному участку трубы после циркуляционного насоса. Сопротивление трения подсчитывают по формуле (186);

ξ'_9 - движение раствора в диффузоре греющей камеры с плавным расширением потока. Суммарное сопротивление состоит из сопротивления от замедления потока раствора и сопротивления трения и определяется по формуле:

$$\xi_9' = \mathbf{k} \cdot \xi_{\text{ВЫХ}} + \xi_{\text{ТР}}; \qquad (194)$$

где $\xi_{\text{ВЫХ}}$ - отнесенный к скорости потока в меньшем сечении $\mathbf{F_М}$,определяется при $\mathbf{Re_Ж} \geq \mathbf{3{,}5 \cdot 10^3}$ по табл. 12 в зависимости от отношения сечений диффузора $\mathbf{F_М / F_Б}$. $\xi_{\text{ТР}}$ определяется из таблицы 11.

Таблица 12

$\mathbf{F_М / F_Б}$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$\xi_{\text{ВЫХ}}$	0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,5	0,64	0,81	1

При угле раствора диффузора $\alpha \geq \mathbf{40}^\circ$ поправочный коэффициент сопротивления при $\xi_{\text{ВЫХ}}$ считать $\mathbf{k = 1}$; при $\alpha < \mathbf{40}^\circ$ коэффициент $\mathbf{k}$ определяется по табл. 13.

Таблица 13

$\alpha,^\circ$	5	10	15	20	25	30	35	40
$\mathbf{k}$	0,08	0,17	0,27	0,44	0,63	0,8	0,94	1

ξ_{10}' - внезапное сужение потока раствора при входе в теплообменные трубы греющей камеры. Суммарное сопротивление состоит из сопротивления от ускорения потока и сопротивления трения. Определяется по формуле (185);

ξ_{11}' - движение раствора по теплообменным трубам греющей камеры. Сопротивление трения подсчитывается по формуле (186).

ξ_{12}' - внезапное расширение потока раствора при выходе из теплообменных труб греющей камеры. Суммарное со-

противление состоит из сопротивления от замедления потока и сопротивления трения. Определяется по формуле:

$$\xi'_{12} = \xi_{\text{вых}} \left(1 - \frac{F_{\text{М}}}{F_{\text{Б}}} \right)^2 \qquad (195)$$

ξ'_{13} - движение раствора по трубе вскипания. Сопротивление трения и ускорения потока на прямом участке подсчитывается по формуле (186);

ξ'_{14} - движение раствора по трубе вскипания. Сопротивление трения и ускорения потока в верхнем колене подсчитывается по формуле (191);

ξ'_{15} - выход потока раствора на экран сепаратора. Сопротивление от удара потока раствора об отбойник. Определяется по табл. 14 в зависимости от отношения расстояния отбойника $\mathbf{h}$ до трубы вскипания к диаметру трубы вскипания $\mathbf{D_0}$;

Таблица 14

$\mathbf{h/D_0}$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ξ'_{15}	1.38	1.20	1.12	1.06	1.03	1.0

ξ'_{16} - поворот парожидкостного потока в пространстве сепаратора с полной потерей скоростной энергии. Рекомендуется [16] $\xi'_{16} = \mathbf{2,0}$.

Вычисляется общий коэффициент сопротивления циркуляционного контура выпарного аппарата:

$$\xi' = \mathbf{k}' \xi_{\text{ПР}}, \qquad (196)$$

где $\mathbf{k'}$ - коэффициент учета взаимного влияния элементов при движении раствора по циркуляционному контуру аппарата. Для аппаратов нормализованных конструкций величина $\mathbf{k'}$; определяется по табл. 15 в зависимости от $\mathbf{Re_{ж}}$.

Таблица 15

$\mathbf{Re_{ж}}$	$10^2..2\cdot10^3$	$3\cdot10^3..10^4$	$>10^4$
$\mathbf{k'}$	1,6	1,6..1,25	1,25

Определяется потеря давления при движении раствора по циркуляционному контуру выпарного аппарата (напор циркуляционного насоса):

$$\Delta p_2 = 0,5\xi' \rho_2 W_2^2 s, \text{ Па}, \quad (197)$$

где W_2 - скорость движения раствора по теплообменным трубкам греющей камеры, м/с.

Коэффициент полезного действия циркуляционных насосов $\eta_{Н}$ выбирается в соответствии с их универсальными характеристиками. Для типовых горизонтальных осевых насосов $\eta_{Н} = 0,5..0,8$.

Вычисляется мощность на приводе циркуляционного насоса выпарного аппарата:

$$N = \frac{V_2 \cdot \Delta p_2}{\eta_{Н}}, \text{ Вт}. \quad (198)$$

Для обеспечения принудительной циркуляции различных жидкостей в выпарных аппаратах применяются осевые химические насосы типа ОХГ в соответствии с ТУ 26-06-1086-77 «Агрегаты электронасосные осевые химические типа ОХГ Уральского завода гидромашин им. Свердлова» и каталогом

«Осевые химические насосы типа ОХГ» (ЦИНТИхимнефтемаш, М, 1977).

7. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ

7.1. Паровая греющая камера

Греющие камеры выпарных аппаратов представляют собой пучок цельнотянутых труб, развальцованных в двух трубных решетках. Материал труб и трубных решеток выбирают по условиям химической стойкости в среде выпариваемого раствора. В большинстве случаев применяют трубы из углеродистой стали ВСт3сп, ВСт3пс, ВСт3гпс, 20К. Для выпаривания коррозионно-активных растворов широкое применение находят легированные стали 06ХН28МДТ, 10Г2С1, 16ГС, 08Х18Н2Т, 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, никелевые, медные, титановые и алюминиевые сплавы.

Диаметр теплообменных труб греющей камеры выбирают в зависимости от свойств выпариваемых растворов в пределах 25..76 мм, [10]. Большие диаметры применяют при выпаривании вязких и кристаллизирующихся растворов. Длина теплообменных труб определяется типом выпарного аппарата [10].

Количество труб в пучке **n** определяют по вычисленной поверхности теплообмена аппарата $\mathbf{F_i}$, принятых длины труб **L** и диаметра **d** по формуле

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{F_i}}{\pi \mathbf{dL}}, \text{ шт.} \qquad (199)$$

В качестве расчетного диаметра **d** обычно принимают средний диаметр теплообменных труб.

Для аппаратов с внутренней циркуляционной трубой число теплообменных труб составит

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{F_i} - \mathbf{F_Ц}}{\pi \mathbf{dL}}, \text{ шт.}, \qquad (200)$$

где $\mathbf{F_Ц} = \pi \mathbf{d_Ц L}$, м^2, - боковая поверхность циркуляционной трубы;

$\mathbf{d_Ц}$ - диаметр циркуляционной трубы; принимается в пределах 150..1600 мм. Сечение циркуляционной трубы должно составлять 15..20 % от сечения греющей камеры.

Соотношение площадей сечения циркуляционных и теплообменных труб греющей камеры должно быть для аппаратов с естественной циркуляцией 0,3..0,6, а для аппаратов с вынесенной зоной кипения и принудительной циркуляцией 0,3..0,9 [19].

Если раствор проходит по теплообменным трубам греющей камеры, то размещение их в пучке осуществляется по вершинам равносторонних треугольников [8,30]. Шаг труб **S** рекомендуется выбирать в пределах:

$$\mathbf{S} = \left(\mathbf{1,3..1,6}\right)\mathbf{d_Н}, \text{ м}, \qquad (201)$$

где $\mathbf{d_Н}$ - наружный диаметр теплообменной трубы, м.

Внутренний диаметр корпуса паровой греющей камеры определяется по следующей формуле:

$$\mathbf{D_K} = \left(\mathbf{b} - \mathbf{1}\right)\mathbf{S} + \mathbf{21}, \text{ м}, \qquad (202)$$

где **b** число труб в диагонали наибольшего правильного шестиугольника, а $\mathbf{l} = \mathbf{1,5 d_Н}$, м.

Внутренний диаметр корпуса греющей камеры с учетом площади, занимаемой циркуляционной трубой диаметром $\mathbf{d_Ц}$

и размещением труб по вершинам равносторонних треугольников определяется из соотношения

$$D_K = \left[\frac{1{,}1nS^2}{\psi} + \left(d_Ц + 2S \right)^2 \right]^{0{,}5}, \text{ м}, \qquad (203)$$

где $\psi = 0{,}7..0{,}9$ - коэффициент использования площади трубной решетки.

Рекомендации Главхиммаша по выбору шага между трубами по известному наружному диаметру $d_Н$ приведены в табл. 16.

Таблица 16

$d_Н$, мм	25	38	57	76
S, мм	35	48	70	93

Отраслевым стандартом ОСТ-26-291-71 установлены диаметры корпусов греющих камер выпарных аппаратов (ГОСТ 9929-67), а также нормали на фланцевые соединения для них. В качестве корпусов греющих камер разрешается применять стандартные трубы соответствующих размеров. Присоединительные размеры фланцев принимаются по ГОСТ 1234-67.

Греющую камеру снабжают штуцерами для подвода пара, отвода конденсата и неконденсирующихся газов. Для подачи пара в центр трубного пучка греющей камеры целесообразно устройство каналов в межтрубном пространстве путем разрядки труб в местах подачи греющего пара. Для предотвращения прямого удара струи пара о теплообменные трубы и уменьшения эрозии этих труб против парового патрубка устанавливают различные отбойные устройства.

Штуцер для отвода конденсата из греющей камеры необходимо располагать как можно ближе к нижней трубной решетке. Для контроля за отводом конденсата некоторые камеры снабжены водоуказательными стеклами.

Неконденсирующиеся газы могут быть как тяжелее (воздух, CO_2), так и легче (NH_3) греющего пара, поэтому они могут скапливаться в различных местах греющей камеры. Рекомендуется устанавливать два-три газоотводящих штуцера по высоте греющей камеры.

7.2 Пространство вторичного пара.

Основное назначение пространства вторичного пара выпарного аппарата заключается в отделении вторичного пара от выпариваемого раствора. Объем этого пространства определяют исходя из условий обеспечения полного отделения вторичного пара от капелек выпариваемого раствора во избежание потерь раствора и загрязнения конденсата последующего корпуса.

Интенсивность уноса капелек раствора потоком вторичного пара характеризуется объемным напряжением парового пространства, т.е. количеством образующего пара в $м^3$/ч на 1 $м^3$ парового пространства. Наибольшее его значение, при котором пар может быть достаточно сухим, называется предельным напряжением парового пространства. Величина предельного объемного напряжения $\mathbf{R_v}$ сильно зависит от давления. Для воды эта зависимость показана на рис. 18.

Для растворов значение $\mathbf{R'_v}$ принимают приближенно равным 0,7..0,8 от $\mathbf{R_v}$ для воды. При давлении 1 бар $\mathbf{R'_v = 1600..1700}$ $м^3$/ ($м^3$ч). Для выпарных аппаратов с давлением вторичного пара, отличным от атмосферного, в пределах от

0,86 до 16 бар – можно пользоваться для вычисления $\mathbf{R}_v^*$ следующей формулой:

$$\mathbf{R}_v^* = \varphi \mathbf{R}_v^{'} \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \qquad (204)$$

где φ - поправочный коэффициент, который находят по графику рис. 19.

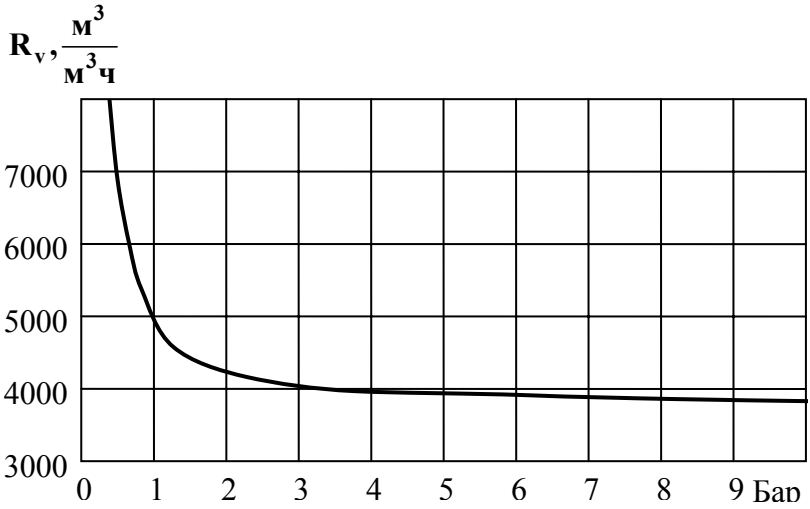


Рис.18 Зависимость предельного объемного напряжения от давления при кипении воды

Скорость вторичного пара в паровом пространстве должна находиться в пределах 2..4 м/с при атмосферном давлении и может быть равной 6..8 м/с при давлении 0,1 бар. Высота парового пространства $\mathbf{H}_V$ принимается равной не менее 1,5 м.

Для выпарного аппарата паропроизводительностью $\mathbf{W}$, объем пространства вторичного пара определяется по формуле:

$$\mathbf{V_B} = \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{R_V^* \cdot \rho}}, \text{ м}^3 \qquad (205)$$

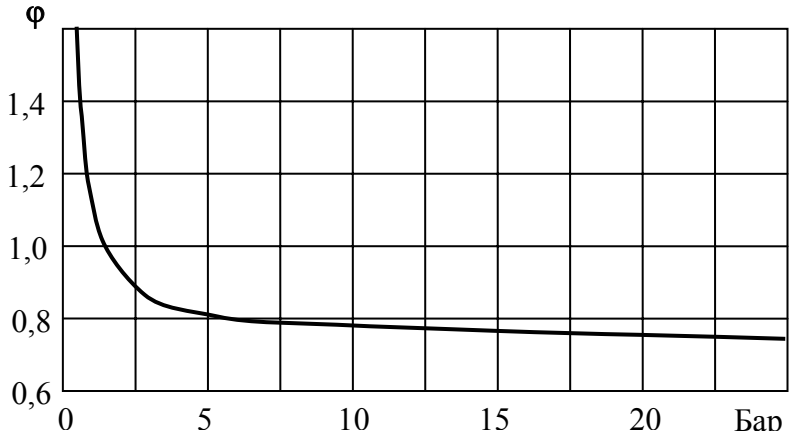


Рис.18 Зависимость коэффициента φ от давления в выпарном аппарате

Высота пространства вторичного пара

$$\mathbf{H_V} = \frac{\mathbf{4V_B}}{\mathbf{\pi D_B^2}} \geq \mathbf{1,5}, \text{ м} \qquad (206)$$

где $\mathbf{D_B}$ - диаметр корпуса парового пространства аппарата, м.

Для пенящихся растворов $\mathbf{H_V}$ принимается равной 2,5..3 м.

Если принята высота $\mathbf{H_V}$, то диаметр корпуса парового пространства можно определить по формуле:

$$\mathbf{D_B} = \left(\frac{\mathbf{1,273 V_B}}{\mathbf{H_V}} \right)^{\mathbf{0,5}}, \text{ м} \qquad (207)$$

Диаметр сепараторов $\mathbf{D_B}$ выбирают из ряда 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2800, 3000, 3200, 3600, 3800, 4000, 4500, 5000, 6000, 6400, 7000, 8000, мм.

Даже при расчетных условиях работы пространство вторичного пара не устраняет полностью уноса капель раствора. Вместо увеличения объема парового пространства предпочитают устанавливать специальные сепараторы, встроенные в корпус или вынесенные за его пределы. Принцип работы сепараторов основан на таких эффектах, как гравитация (инерционные аппараты), центробежная сила (циклонные) или контактное взаимодействие (пленочные или поверхностные).

7.3. Штуцеры и трубопроводы

Диаметр штуцеров и трубопроводов вычисляется на основании уравнения неразрывности:

$$\mathbf{d_{BH}} = \left(\frac{\mathbf{1,273 V_C}}{\mathbf{W}} \right)^{\mathbf{0,5}}, \text{ м}, \qquad (208)$$

где $\mathbf{V_C}$ - секундный объемный расход протекающей среды (пар, раствор, конденсат), $м^3/с$.

$$V_C = \frac{G_ж}{3600\rho_ж}, \text{ м}^3/\text{с}$$

Вычислив диаметр $d_{ВН}$, подбирают стандартную трубу ближайшего большего диаметра. Для расчета можно рекомендовать следующие скорости движения протекающих сред:

насыщенный пар под давлением	W=25..40 м/с,
насыщенный пар под разряжением	W=70..100 м/с,
раствор	W=1..2 м/с,
конденсат водяного пара	W=0,4..0,8 м/с.

Размеры штуцеров и трубопроводов должны быть уточнены по соответствующим ГОСТам: трубы 8732-66, 8733-66; фланцы 1255-67, 1268-67, 12828-67, 12834-67 и ОСТ 26-830-73, ОСТ 26-835-73.

7.4. Тепловая изоляция выпарных аппаратов

Выпарные аппараты и трубопроводы МВУ, наружная стенка которых имеет температуру выше 50°С после монтажа, наладки и приемки должны быть покрыты тепловой изоляцией.

При расчете изоляции следует придерживаться следующей последовательности операций:

1. Устанавливают допустимые удельные тепловые потери объекта при наличии изоляции q, Вт/м^2 (табл. П-12 из 8,21).

2. Выбирают материал изоляции и по выбранной температуре на поверхности изоляционного слоя $t_{ИЗ}$ определяют среднюю температуру последнего $t_{СР}$, по которой находят соответствующее значение $\lambda_{ИЗ}$, Вт/(м·К).

3. При расчете изоляции термическим сопротивлением теплоотдачи $1/\alpha_1$ или $1/\pi d_B \alpha_1$ от среды к стенке и самой стенки можно пренебречь. Тогда температуру изолируемой поверхности можно принять равной температуре среды в аппарате или трубопроводе $t_Ж$.

4. Определяют коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности изоляции к воздуху (табл. 18 из 8, 21).

5. Зная $t_Ж$, $t_{ВОЗД}$, $\lambda_{ИЗ}$, α_2 определяют необходимую толщину изоляции δ из [8, 21].

6. После этого производят проверочный расчет[8, 21] для определения значения температуры наружной поверхности изоляции $t_{ИЗ}$ и средней температуры изоляционного слоя $t_{СР}$.

7. Если $t_{ИЗ}$ и $t_{СР}$ от предварительного принятого значения отличаются существенно, то есть весь расчет повторяют снова, задавшись новым значением температуры поверхности изоляции $t_{ИЗ}$. Указанная процедура продолжается до тех пор, пока расхождение температур не будет в допустимых пределах $\left(\pm 1^{\circ}C\right)$. Так как выпарные аппараты – это герметически закрытые емкости, предназначенные для ведения тепловых процессов, то они должны отвечать требованиям “Правил устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением”, утвержденным Госгортехнадзором [22], с точки зрения устройства, изготовления, монтажа, ремонта и эксплуатации.

8.ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МВУ

Для МВУ необходимо спроектировать или подобрать по каталогам (в зависимости от объема задания) следующее вспомогательное оборудование:

1. Подогреватели раствора.

В качестве подогревателей обычно применяются: а) при подогреве раствора паром – кожухотрубные и секционные теплообменники; б) при подогреве раствора конденсатом или другими жидкостями – теплообменники секционные, спиральные и “труба в трубе”.

Тепловой и конструкционный расчеты подогревателей производятся согласно методике, изложенной в [8].

2. Насос для подачи раствора на МВУ.

При выборе насоса необходимо иметь следующие исходные данные:

- максимальную производительность по раствору.
- гидравлические сопротивления по линии подачи, при определении которых необходимо учесть:
  - гидравлическое сопротивление подогревателей и трубопроводов;
  - давление в аппарате, куда подается раствор;
  - геометрическую высоту подъема раствора.

Насос должен создавать напор, равный сумме всех гидравлических сопротивлений в линии подачи раствора. Кроме этого, при выборе насоса необходимо принимать во внимание химическую активность раствора. Выбор насоса производится по каталогу ВНИИгидромаш [23].

3. Конденсационная установка.

Для МВУ обычно применяют смешивающие (барометрические) конденсаторы. В конденсационную установку входят: а) конденсатор; б) вакуум-насос; в) барометрический ящик; г) система трубопроводов.

4. Оборудование для вывода концентрированного раствора из последней ступени МВУ при работе под вакуумом.

5. Для отвода конденсата из выпарных аппаратов необходимо разработать систему сбора и отвода конденсата (конденсатоотводчики, емкости, насосы и т.д.) [25].

6. Трубопроводы для пара, раствора, конденсата, отвода неконденсирующихся газов и промывки аппаратов с соответствующей запорно-регулирующей арматурой [26].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Формулы для расчета
нормальной физико-химической температурной депрессии
некоторых растворов

Раствор	Диапазон концентраций b, % мас.	Формула определения Δ_1^H, ^{0}C
1	2	3
Нитрат серебра $AgNO_3$	3…57	$\Delta_1^H = 0{,}0000086b^3 - 0{,}00020338b^2 + 0{,}0595043b - 0{,}03027432$
Хлорид бария $BaCl_2$	10…34	$\Delta_1^H = 0{,}00006397b^3 - 0{,}0012981b^2 + 0{,}0980039b - 0{,}28339967$
Хлорид кальция $CaCl_2$	2…20	$\Delta_1^H = 0{,}000252b^3 + 0{,}00142b^2 + 0{,}0967b - 0{,}011$
Нитрат кальция $Ca(NO_3)_2$	5…60	$\Delta_1^H = 0{,}0000329b^3 + 0{,}0002497b^2 + 0{,}104b + 0{,}0456$
Сульфат меди $CuSO_4$	2…20	$\Delta_1^H = 0{,}000635b^2 + 0{,}0181b + 0{,}101$
Сульфат железа $FeSO_4$	7…25	$\Delta_1^H = 0{,}00015842b^3 - 0{,}005807b^2 + 0{,}098634b - 0{,}25198916$
Карбонат калия K_2CO_3	6…51	$\Delta_1^H = -0{,}00002484b^3 + 0{,}00260915b^2 + 0{,}02342962b + 0{,}00067602$
Хромат калия K_2CrO_4	6…47	$\Delta_1^H = -0{,}00000163b^4 + 0{,}00017184b^3 - 0{,}00394323b^2 + 0{,}10234514b - 0{,}1356091$

Продолжение таблицы

1	2	3
Бихромат калия $K_2Cr_2O_7$	6…67	Δ_1^H =0,00000102b^4+0,00002677b^3--0,00024606b^2+0,11249895b--0,30286667
Нитрат калия KNO_3	1…20	Δ_1^H =0,000983b^2+0,801b-0,00766
Гидроксид калия KOH	25…80	Δ_1^H =0,0004024b^3+0,00060962b^2--0,3905351b+12,7381363
Сульфат калия K_2SO_4	4…20	Δ_1^H =0,00001928b^3-0,00032282b^2++0,0697384b-0,00779982
Бромид лития LiBr	10…60	Δ_1^H =0,0003291b^3-0,007478b^2++0,1207b+0,9271
Хлорид лития LiCl	10…50	Δ_1^H =0,64889·exp(-0,000002332b^3--0,00003b^2+0,09602b)
Хлорид магния $MgCl_2$	1…20	Δ_1^H =0,0133b^2+0,0562b+0,0831
Хлорид натрия NaCl	3…28	Δ_1^H =0,0001438b^3+0,0006834b^2++0,1732b-0,02424
Нитрат натрия $NaNO_3$	1…31	Δ_1^H =0,0000227b^3+0,000585b^2++0,1106b-0,0294
Гидроксид натрия NaOH	3…55	Δ_1^H =-0,0000271b^3+0,01664b^2++0,0731b+0,3448

Продолжение таблицы

1	2	3
Сульфат натрия Na_2SO_4	2…27	Δ_1^{H} =-0,00038b^3+0,00219b^2+ +0,0643b-0,00906
Хлорид аммония NH_4Cl	5…40	Δ_1^{H} =-0,0000055b^4+0,0004522b^3- -0,007296b^2+0,2197b-0,1371
Нитрат аммония NH_4NO_3	10…50	Δ_1^{H} =0,0000393b^3-0,001003b^2+ +0,1436b-0,2992
Сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$	5…50	Δ_1^{H} =0,0000285b^3+0,000006601b^2+ +0,0686b+0,04432
Сульфат цинка $ZnSO_4$	8…45	Δ_1^{H} =0,00006829b^3-0,00184066b^2+ +0,0522868b-0,15825403
Сахароза $C_{12}H_{22}O_{11}$	10…75	Δ_1^{H} =0,0000496b^3-0,003509b^2+ +0,1492b-1,7318

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Теплофизические свойства воды и некоторых водных растворов нелетучих веществ

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

t, ^{0}C	P·10^{-5}, Па	ρ, кг/м^3	C_p, кДж/(кг·К)	λ, Вт/(м·К)	ν·10^6, м^2/с	β·10^4, К$^{-1}$	σ·10^4, Н/м	Pr
0	1,013	999,9	4,212	0,551	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	4,191	0,574	1,306	0,70	741,6	9,52
20	1,013	998,2	4,183	0,599	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	4,174	0,618	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	4,174	0,635	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	4,174	0,648	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	4,179	0,659	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	4,187	0,668	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	4,195	0,674	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	4,208	0,680	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	4,220	0,683	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,430	951,0	4,233	0,685	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,980	943,1	4,250	0,686	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,700	934,8	4,266	0,686	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,610	926,1	4,287	0,685	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,760	917,0	4,313	0,684	0,203	10,30	486,6	1,17
160	6,180	907,4	4,346	0,683	0,191	10,70	466,0	1,10
170	7,920	897,3	4,380	0,679	0,181	11,30	443,4	1,05
180	10,03	886,9	4,417	0,674	0,173	11,90	422,8	1,00
190	12,55	876,0	4,459	0,670	0,165	12,60	400,2	0,96
200	15,55	863,0	4,505	0,663	0,158	13,30	376,7	0,93
210	19,08	852,8	4,555	0,655	0,153	14,10	354,1	0,91
220	23,20	840,3	4,614	0,645	0,148	14,80	331,6	0,89
230	27,98	827,3	4,681	0,637	0,145	15,90	310,0	0,88
240	33,48	813,6	4,756	0,628	0,141	16,80	285,5	0,87
250	39,78	799,0	4,844	0,618	0,137	18,10	261,9	0,86

Формулы для определения теплофизических свойств воды ($10 \le t \le 250\ ^0C$)

1. Плотность:

в диапазоне температур $10 \le t \le 160\ ^0C$

$\rho=0{,}0000019t^3-0{,}003227t^2-0{,}12159t+1001{,}331$, кг/м^3;

в диапазоне температур $160 \le t \le 250\ ^0C$

$\rho=-0{,}0024834t^2-0{,}19453t+1002{,}6$, кг/м^3.

2. Изобарная теплоемкость:

в диапазоне температур $0 \le t \le 20\ ^0C$

$C_P=-0{,}0000009t^3+0{,}0000783t^2-0{,}002684t+4{,}2118$, кДж/(кг·К);

в диапазоне температур $20 \le t \le 40\ ^0C$

$C_P=0{,}0000276t^2-0{,}002063t+4{,}2112$, кДж/(кг·К);

в диапазоне температур $40 < t \le 160\ ^0C$

$C_P=0{,}0000108t^2-0{,}0007652t+4{,}1864$, кДж/(кг·К);

в диапазоне температур $160 < t \le 250\ ^0C$

$C_P=0{,}000032t^2-0{,}007851t+4{,}7778$, кДж/(кг·К).

3. Теплопроводность:

в диапазоне температур $10 \le t \le 60\ ^0C$

$\lambda=0{,}55758\cdot\exp(0{,}003827t-0{,}000017t^2)$, Вт/(м·К);

в диапазоне температур $60 < t \le 120\ ^0C$

$\lambda=0{,}55492+0{,}002367t-0{,}0000106t^2$, Вт/(м·К);

в диапазоне температур $120 < t \le 250\ ^0C$

$\lambda=0{,}6043314+0{,}0012582t-0{,}0000048t^2$, Вт/(м·К).

4. Кинематическая вязкость:

в диапазоне температур $10 \le t \le 120\ ^0C$

$\nu=[(1688{,}375/t^3)-(400{,}36/t^2)+(35{,}506/t)-0{,}02934]/10^6$, м^2/с;

в диапазоне температур $120 < t \le 250\ ^0C$

$\nu=[1{,}3339\cdot\exp(-0{,}00000007t^3+0{,}00006283t^2-0{,}02039t)]/10^6$, м^2/с.

5. Коэффициент объемного расширения:

в диапазоне температур $10 \le t \le 120\ ^0C$

$\beta=(0{,}0000047t^3-0{,}0011894t^2+0{,}1523t-0{,}6763)/10^4$, 1/К;

в диапазоне температур $120 < t \le 250\ ^0C$

$\beta=[3{,}4888\cdot\exp(0{,}000000076t^3--0{,}00003637t^2+ +0{,}010908t)]/10^4$, 1/К.

6. Поверхностное натяжение:

в диапазоне температур $10 \le t \le 120\ ^0C$

$\sigma=[756{,}49\cdot\exp(-0{,}000000013t^3-0{,}000004974t^2-$
$-0{,}001886t)]/10^4$, Н/м;

в диапазоне температур $120 < t \le 250\ ^0C$

$\sigma=[939{,}576\cdot\exp(-0{,}000000075t^3-0{,}000022944t^2-0{,}006137t)]/10^4$, Н/м.

7. Критерий Прандтля (Pr):

в диапазоне температур $10 \le t \le 120\ ^0C$

$Pr=13{,}1487\cdot\exp(-0{,}000000466t^3+0{,}0001934t^2-0{,}03478t)$;

в диапазоне температур $120 < t \le 250\ ^0C$

$Pr=12{,}1183\cdot\exp(-0{,}0000001t^3+0{,}0000902t^2-0{,}026845t)$.

Теплофизические свойства водного раствора хлорида кальция $CaCl_2$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	кг/м^3	5	1040	1033	1024	1013	1000	985
		10	1084	1076	1066	1055	1043	1028,6
		15	1129	1121	1111	1100	1088	1074
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	5	1,058	0,707	0,514	0,398	0,325	0,293
		10	1,171	0,783	0,577	0,452	0,370	0,329
		15	1,337	0,915	0,680	0,534	0,440	0,410
C_P	**кДж / кг · К**	5	3,97	3,94	3,93	3,96	3,98	4,03
		10	3,78	3,75	3,76	3,78	3,80	3,83
		15	3,60	3,57	3,56	3,58	3,59	3,63
λ	**Вт / м · К**	5	0,593	0,621	0,645	0,664	0,675	0,681
		10	0,587	0,615	0,638	0,657	0,668	0,674
		15	0,581	0,609	0,633	0,651	0,662	0,667
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	74,05	71,00	67,39	63,60	60,20	56,70
		10	75,50	72,35	68,71	64,80	61,60	58,20
		15	77,35	73,92	70,16	66,20	62,50	59,40
Pr	-	5	7,37	4,63	3,21	2,41	1,92	1,63
		10	8,18	5,14	3,61	2,74	2,18	1,89
		15	9,35	6,01	4,26	3,23	2,59	2,25

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора хлорида кальция $CaCl_2$

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$, концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

1. Плотность:

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}00945b^3+0{,}208b^2-0{,}522b-23{,}942)-t(-$
$-0{,}0000271b^3-0{,}000634b^2+0{,}037b+0{,}0867)+(0{,}0074b^3-0{,}227b^2+$
$+11{,}198b+994{,}1)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

$\nu\cdot10^6=(0{,}000481b^3-0{,}01083b^2+0{,}106b+$
$+1{,}3723)\cdot\exp[10^{-6}\cdot t^2(0{,}0347b^3-0{,}6314b^2+2{,}2074b+$
$+88{,}76)-10^{-3}t(0{,}00476b^3-0{,}1014b^2+0{,}479b+24{,}76)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

$C_P=10^{-6}\cdot t^2(0{,}005234b^3+0{,}077b^2-3{,}77b+39{,}474)-$
$-10^{-4}t(0{,}0112b^3+0{,}037b^2--4{,}827b+47{,}883)+(-$
$0{,}000375b^3+0{,}01224b^2-0{,}161b+4{,}555)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

$\lambda=t^{-2}(-0{,}0209b^2+0{,}111b+62{,}182)+t^{-1}(-0{,}000816b^2+0{,}00534b-$
$-5{,}804)+(0{,}0000096b^2-0{,}00171b+0{,}734)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$\sigma\cdot10^3=10^{-7}\cdot t^3(0{,}0138b^3-0{,}193b^2+2{,}487b+36{,}672)-$
$-10^{-5}t^2(0{,}0213b^3-0{,}119b^2+0{,}163b+103{,}24)-t(-0{,}000049b^3+$
$+0{,}00126b^2-0{,}010b+0{,}132)+(0{,}00494b^2+0{,}227b+75{,}354)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

$$Pr=(-0{,}000624b^3+0{,}0273b^2-0{,}0417b+11{,}912)\cdot\exp[10^{-6}\cdot t^2\times$$
$$\times(-0{,}131b^2+2{,}377b+83{,}413)-10^{-3}t(0{,}00876b^3-$$
$$0{,}28b^2+2{,}638b+20{,}555)].$$

Теплофизические свойства водного раствора нитрата кальция $Ca(NO_3)_2$

Теплофизические свойства символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ	кг/м^3	5	1037	1029	1020	1009	999	988
		10	1076	1068	1059	1049	1036	1024
		20	1163	1155	1144	1132	1118	1102
		30	1261	1252	1241	1227	1212	1194
		40	1376	1366	1354	1339	1322	1303
		50	1510	1499	1486	1469	1451	1428
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	5	0,96	0,66	0,50	0,39	0,31	0,25
		10	1,02	0,70	0,53	0,41	0,32	0,27
		20	1,30	0,86	0,62	0,48	0,38	0,33
		30	1,90	1,20	0,82	0,62	0,48	0,41
		40	3,04	1,86	1,27	0,93	0,83	0,76
		50	5,93	3,46	2,25	1,61	1,22	0,98
C_P	**кДж / кг · К**	5	4,00	3,97	3,97	3,99	4,02	4,04
		10	3,84	3,80	3,80	3,82	3,84	3,86
		20	3,52	3,49	3,49	3,51	3,53	3,55
		30	3,20	3,18	3,18	3,20	3,21	3,22
		40	2,90	2,88	2,88	2,89	2,91	2,93
		50	2,61	2,58	2,58	2,60	2,61	2,625
λ	**Вт / м · К**	5	0,594	0,623	0,647	0,665	0,676	0,683
		10	0,590	0,618	0,642	0,659	0,669	0,677
		20	0,578	0,606	0,629	0,647	0,657	0,664
		30	0,565	0,592	0,615	0,633	0,642	0,648
		40	0,550	0,577	0,599	0,615	0,626	0,629
		50	0,533	0,558	0,579	0,595	0,606	0,609

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma\times 10^3$	Н/м	5	73,3	70,2	66,9	63,7	60,4	57,6
		10	74,5	71,3	68,0	64,7	61,5	58,2
		20	76,5	73,1	69,8	66,4	63,1	59,7
		30	78,2	74,7	71,3	67,8	64,4	61,0
		40	80,2	76,6	73,0	69,5	66,0	62,4
		50	82,2	78,4	74,7	71,1	67,4	63,7
Pr	-	5	6,71	4,34	3,13	2,36	1,83	1,53
		10	7,13	4,60	3,33	2,48	1,98	1,70
		20	9,22	5,70	3,92	2,94	2,28	1,92
		30	13,57	8,05	5,26	3,85	2,97	2,49
		40	22,03	12,65	8,25	5,85	4,48	3,78
		50	43,93	24,03	14,9	10,32	7,63	5,50

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора нитрата кальция $Ca(NO_3)_2$

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$, концентраций $5 \le b \le 50$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

$$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}003007b^3+0{,}1737b^2-3{,}5975b+5{,}54)-10^{-2}t\times$$
$$\times(-0{,}005171b^3+0{,}293b^2-5{,}044b+56{,}095)+(0{,}0004205b^3+$$
$$+0{,}0419b^2+7{,}0378b+1008{,}45),\ кг/м^3;$$

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}0003241b^3-0{,}007977b^2+1{,}802b-65{,}366)-$$
$$-10^{-2}t(-0{,}0002242b^3-0{,}02013b^2+2{,}8445b-32{,}284)+$$
$$+(0{,}0004205b^3+0{,}0419b^2+7{,}0378b+1008{,}45),\ кг/м^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 20$ % мас.

$\nu \cdot 10^6 = [1{,}434 \cdot \exp(0{,}0001392b^3 - 0{,}002974b^2 + 0{,}02291b)] \times$
$\times \exp\{[-11{,}2957 \times 10^{-7} t^3 \cdot \exp(0{,}001076b^3 - 0{,}02353b^2 -$
$-0{,}06711b)] + [23{,}6365 \cdot 10^{-5} t^2 \cdot \exp(0{,}0005893b^3 - 0{,}01155b^2 -$
$-0{,}04516b)] - 28{,}4696 \cdot 10^{-3} t \cdot \exp(0{,}000193b^3 - 0{,}003849b^2 -$
$-0{,}004453b)]\}$, $м^2/с$;

б) диапазон концентраций $20 \le b \le 50$ % мас.

$\nu \cdot 10^6 = [1{,}129 \cdot \exp(0{,}00000129b^3 + 0{,}000391b^2 + 0{,}02272b)] *$
$* \exp[10^{-7} t^3 (-0{,}0000166b^3 + 0{,}00455b^2 - 0{,}2198b + 1{,}3896) +$
$+ 10^{-5} t^2 (--0{,}001796b^3 + 0{,}1717b^2 - 5{,}0b + 56{,}207) - 10^{-3} t *$
$*(-0{,}001082b^3 + 0{,}1015b^2 - 2{,}6581b + 47{,}374)]$, $м^2/с$.

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

$C_P = 10^{-5} \cdot t^2 (0{,}00001213b^3 - 0{,}00838b^2 + 0{,}1325b + 1{,}132) -$
$-10^{-3} t(0{,}0002816b^3 - 0{,}01782b^2 + 0{,}287b + 0{,}7113) + (0{,}00000401b^3 -$
$0{,}0002588b^2 - 0{,}02783b + 4{,}167)$, кДж/(кг·К);

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$C_P = 10^{-5} \cdot t^2 (-0{,}0000112b^3 - 0{,}000501b^2 + 0{,}1087b - 1{,}6655) - 10^{-3} t(0{,}0000041b^3 - 0{,}001432b^2 + 0{,}1564b - 0{,}405) +$
$+ (0{,}00000401b^3 - 0{,}0004915b^2 - 0{,}009538b + 3{,}829)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

$\lambda = t^{-3}(0{,}0441b^3 - 1{,}1553b^2 + 24{,}1634b - 383{,}172) +$
$+ t^{-2}(-0{,}00355b^3 + 0{,}09092b^2 - 2{,}131b + 91{,}665) -$
$- t^{-1}(-0{,}0000985b^3 + 0{,}003095b^2 - 0{,}0771b + 6{,}4323) +$
$+ (-0{,}000000601b^3 + 0{,}0000148b^2 - 0{,}001643b + 0{,}736)$, Вт/(м·К);

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\lambda = t^{-3}(1{,}09145b^2 - 138{,}368b + 3661{,}283) + t^{-2}(-0{,}0002204b^3 -$
$-0{,}04774b^2 + 9{,}1344b - 211{,}394) - t^{-1}(0{,}0000033b^3 -$
$-0{,}00161b^2 + 0{,}2033b - 0{,}4917) + (0{,}0000017b^3 - 0{,}0002255b^2 +$
$+ 0{,}008285b + 0{,}5888)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

диапазон концентраций $5 \le b \le 50$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3 = (0{,}000428b^3 - 0{,}003532b^2 + 0{,}2804b + 75{,}30) - t(0{,}000000166b^3 - 0{,}0000098b^2 + 0{,}0005944b + 0{,}1584),\ \text{Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 20$ % мас.

$$Pr = (0{,}0013735b^3 - 0{,}03368b^2 + 0{,}4474b + 8{,}977) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2 * (-0{,}0006422b^3 + 0{,}0131b^2 + 0{,}1368b + 6{,}093) - 10^{-3} t(0{,}0002175b^3 - 0{,}00684b^2 + 0{,}2957b + 23{,}163)];$$

а) диапазон концентраций $20 \le b \le 50$ % мас.

$$Pr = (0{,}0025856b^3 - 0{,}1947b^2 + 5{,}7131b - 41{,}618) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2 * (-0{,}0003527b^3 + 0{,}02742b^2 - 0{,}5339b + 11{,}4587) - 10^{-3} t(-0{,}0000513b^3 - 0{,}00437b^2 + 0{,}6773b + 16{,}694)].$$

Теплофизические свойства водного раствора нитрата калия KNO_3

Теплофизические свойства(символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^0C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	$кг/м^3$	5	1028	1021	1012	1000	987	971
		10	1063	1054	1044	1032	1017	1000
		15	1098	1088	1077	1064	1049	1032
$\nu \cdot 10^6$	$м^2/с$	5	0,983	0,646	0,484	0,372	0,303	0,262
		10	0,913	0,636	0,479	0,371	0,306	0,269
		15	0,893	0,634	0,474	0,376	0,313	0,286
C_P	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$	5	4,02	3,93	3,96	4,01	4,03	4,06
		10	3,86	3,81	3,81	3,85	3,89	3,93
		15	3,70	3,68	3,67	3,72	3,74	3,75
λ	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	5	0,592	0,620	0,644	0,663	0,673	0,679
		10	0,584	0,610	0,635	0,654	0,664	0,670
		15	0,576	0,602	0,627	0,644	0,655	0,661
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	73,5	70,3	66,9	63,4	59,5	55,3
		10	74,7	71,2	67,9	64,5	60,9	56,6
		15	75,6	72,0	68,9	65,6	62,1	57,9
		20	77,1	73,5	70,0	66,6	63,2	58,9
Pr	-	5	6,65	4,18	3,03	2,25	1,79	1,51
		10	6,41	4,18	3,00	2,25	1,83	1,61
		15	6,30	4,20	2,99	2,31	1,87	1,70

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора нитрата калия KNO_3

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$, концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

1. Плотность:

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(0{,}0093b^3-0{,}190b^2+1{,}354b-31{,}533)-10^{-2}t(-0{,}011b^3+$
$+0{,}414b^2-3{,}004b+23{,}7)+(0{,}384b^3-11{,}49b^2112{,}37b+710{,}07)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

$\nu\cdot10^6=(0{,}00031b^3-0{,}0056b^2-0{,}018b+1{,}796)\cdot\exp[10^{-7}\cdot t^3(-0{,}0012b^3-$
$-0{,}00121b^2+0{,}79b-6{,}54)+10^{-5}t^2(0{,}000335b^3+0{,}096b^2-2{,}872b+$
$+25{,}46)-10^{-3}t(0{,}011b^3-0{,}243b^2+0{,}57b+29{,}197)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

$C_P=10^{-6}\cdot t^2(-0{,}0059b^3-0{,}107b^2+3{,}0965b+10{,}63)-10^{-4}t(-0{,}0123b^3+$
$+0{,}0187b^2+2{,}263b+14{,}482)+(0{,}001b^3-0{,}0309b^2+ +0{,}259b+3{,}387)$,
кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

$\lambda=t^{-3}(-8{,}619b^2+185{,}13b-539{,}73)+t^{-2}(0{,}612b^2-13{,}185b+95{,}82)-$
$-t^{-1}\ (0{,}0099b^2-0{,}22b+6{,}093)+(0{,}000042b^2-0{,}0028b+0{,}733)$,
Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$\sigma\cdot10^3=10^{-6}\cdot t^3(0{,}0000001b^3+0{,}05b^2-1{,}53b+4{,}50)+10^{-6}t^2(0{,}156b^3-$
$16{,}462b^2+400{,}91b-1535{,}23)-10^{-2}t(0{,}0036b^3-0{,}191b^2+ 3{,}397b+$
$+3{,}39)+(0{,}00196b^3-0{,}0773b^2+1{,}224b+72{,}267)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

$$Pr=(-0{,}00252b^3+0{,}086b^2-1{,}052b+14{,}89)\cdot\exp[10^{-8}\cdot t^3(-0{,}0111b^3+$$
$$+0{,}0377b^2+7{,}83b-71{,}708)+10^{-5}t^2(0{,}0038b^3-0{,}0548b^2-1{,}086b+$$
$$+21{,}49)-10^{-3}t(-0{,}00428b^3+0{,}1645b^2-2{,}54b+39{,}474)].$$

Теплофизические свойства водного раствора сульфата меди $CuSO_4$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, %	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	кг/м^3	5	1051	1043	1034	1022	1010	995
		10	1107	1099	1089	1077	1064	1048,5
		15	1168	1160	1149	1136	1121	1105,5
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	5	1,163	0,753	0,535	0,408	0,326	0,286
		10	1,345	0,872	0,621	0,474	0,379	0,332
		15	1,575	0,983	0,680	0,507	0,397	0,348
C_P	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	5	3,92	3,85	3,81	3,78	3,76	3,745
		10	3,68	3,63	3,58	3,56	3,55	3,532
		15	3,45	3,41	3,37	3,35	3,33	3,320
λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	5	0,593	0,620	0,645	0,664	0,675	0,682
		10	0,587	0,615	0,638	0,657	0,668	0,673
		15	0,581	0,609	0,633	0,651	0,662	0,667
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	73,26	70,53	67,96	65,10	63,20	59,82
		10	74,79	72,34	69,60	66,80	64,10	61,34
		15	76,08	73,40	70,57	68,10	65,20	62,45
Pr	-	5	8,08	4,86	3,27	2,39	1,83	1,60
		10	9,35	5,66	3,80	2,78	2,14	1,83
		15	10,94	6,38	4,16	2,98	2,24	1,96

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора сульфата меди $CuSO_4$

Диапазон температур $20 \le t \le 120$ ^{0}C, концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

1. Плотность:

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}000397b^3-0{,}0104b^2+0{,}0467b-20{,}905)-$
$-10^{-2}t(0{,}0131b^3-0{,}392b^2+3{,}844b+15{,}416)+(0{,}364b^3-$
$10{,}83b^2+109{,}96b+732{,}5)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

$\nu\cdot10^6=(0{,}000816b^3-0{,}0204b^2+0{,}222b+1{,}197)*$
$*\exp[10^{-6}\cdot t^2(-0{,}0194b^3+0{,}777b^2-8{,}44b+113{,}99)-$
$-10^{-3}t(0{,}0138b^3-0{,}364b^2+2{,}996b+18{,}803)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

$C_P=10^{-6}\cdot t^2(0{,}000691b^3-0{,}0687b^2+0{,}59b+14{,}48)-$
$-10^{-4}t(-0{,}00486b^3+0{,}101b^2-1{,}606b+45{,}08)+(-0{,}000384b^3+$
$+0{,}0116b^2-0{,}156b+4{,}526)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

$\lambda=t^{-3}(8{,}0173b^2-123{,}25b+132{,}504)+t^{-2}(-0{,}581b^2+7{,}898b+ +63{,}02)-t^{-1}(-0{,}00911b^2+0{,}069b+6{,}355)+(-0{,}0000056b^2-$
$-0{,}00208b+0{,}741)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$\sigma\cdot10^3=(0{,}019b^3-0{,}583b^2+5{,}758b+59{,}328)-t(-0{,}0000029b^3+$
$0{,}0000464b^2+0{,}000334b+0{,}13)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

$Pr=(0{,}0383b^2-0{,}162b+14{,}23)\cdot\exp[10^{-5}\cdot t^2(0{,}004b^3-$
$0{,}0789b^2+0{,}382b+ +10{,}219)-10^{-3}t(0{,}00283b^3-$

$-0,0097b^2-0,478b+33,4)]$.

Теплофизические свойства
водного раствора бромида лития LiBr

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ	кг/м^3	10	1075	1067	1058	1047	1033	1018
		20	1163	1155	1144	1132	1118	1101
		30	1263	1254	1243	1229	1213	1196
		40	1384	1374	1362	1347	1330	1310
		50	1532	1521	1508	1491	1472	1451
		60	1722	1710	1695	1676	1655	1630
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	10	1,088	0,750	0,535	0,412	0,343	0,303
		20	1,118	0,781	0,565	0,448	0,368	0,329
		30	1,201	0,878	0,649	0,508	0,426	0,379
		40	1,555	1,089	0,809	0,641	0,529	0,463
		50	2,356	1,624	1,213	0,967	0,774	0,640
		60	5,528	3,264	2,322	1,717	1,323	1,040
C_P	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	10	3,779	3,788	3,805	3,820	3,859	3,898
		20	3,265	3,272	3,281	3,296	3,351	3,411
		30	2,808	2,818	2,834	2,872	2,916	2,975
		40	2,444	2,451	2,462	2,491	2,543	2,619
		50	2,118	2,128	2,141	2,175	2,229	2,296
		60	1,844	1,859	1,888	1,923	1,969	2,036
λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	10	0,571	0,590	0,609	0,627	0,647	0,665
		20	0,542	0,561	0,579	0,598	0,616	0,635
		30	0,513	0,532	0,551	0,570	0,588	0,608
		40	0,484	0,502	0,521	0,540	0,558	0,577
		50	0,455	0,474	0,492	0,511	0,529	0,548
		60	0,420	0,444	0,463	0,481	0,500	0,519

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	10	74,6	71,3	68,0	64,7	61,4	58,1
		20	77,5	74,7	72,0	69,3	66,5	63,8
		30	81,8	79,1	76,4	73,7	71,1	68,4
		40	85,6	83,4	81,3	79,2	77,0	74,8
		50	90,2	88,4	86,6	84,8	83,1	81,3
		60	93,9	93,1	92,4	91,6	90,8	90,05
Pr	-	10	7,741	5,138	3,530	2,621	2,113	1,808
		20	7,833	5,261	3,656	2,795	2,239	1,946
		30	8,303	5,836	4,149	3,148	2,577	2,220
		40	10,867	7,299	5,166	3,983	3,206	2,755
		50	16,802	11,026	7,894	6,137	4,802	3,885
		60	41,794	23,362	16,05	11,505	8,623	6,629

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора бромида лития LiBr

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0$C, концентраций $10 \le b \le 60$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$$\rho=10^{-4}\cdot t^2(0{,}001163b^3-0{,}0877b^2+1{,}7272b-34{,}219)-10^{-2}t(0{,}000687b^3-0{,}05996b^2+1{,}693b+10{,}8613)+(0{,}0550b^2++7{,}250b+1002{,}301),\ \text{кг/м}^3;$$

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 60$ % мас.

$$\rho=10^{-4}\cdot t^2(0{,}0001444b^3-0{,}02842b^2+1{,}3646b-48{,}28)-10^{-2}t(0{,}0008314b^3--0{,}1186b^2+5{,}8529b-65{,}076)+(0{,}1715b^2--0{,}08514b+1118{,}303),\ \text{кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0{,}0000219b^3 - 0{,}001456b^2 + 0{,}03058b + 1{,}4946) * \exp[10^{-7}t^3(0{,}0002739b^3 - 0{,}003137b^2 - 0{,}1667b + 3{,}2263) + 10^{-5}t^2(-0{,}0003206b^3 - 0{,}01182b^2 + 0{,}6672b) - 10^{-3}t(0{,}0002759b^3 - 0{,}03809b^2 + 0{,}9011b + 17{,}1679)], \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 60$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0{,}0008093b^3 - 0{,}09335b^2 + 3{,}61b - 44{,}4366) * \exp[10^{-7}t^3(0{,}0002029b^3 - 0{,}0271b^2 + 0{,}7409b - 0{,}5178) + 10^{-5}t^2(0{,}0005354b^3 - 0{,}0682b^2 + 3{,}6839b - 62{,}8706) - 10^{-3}t(0{,}001495b^3 - 0{,}1879b^2 + 8{,}2261b - 100{,}70)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$$C_P = 10^{-8} \cdot t^3(-0{,}001497b^3 - 0{,}006791b^2 + 2{,}0379b - 13{,}343) + 10^{-7}t^2(0{,}02188b^3 + 0{,}04872b^2 - 24{,}0916b + 220{,}029) + 10^{-5}t(-0{,}005678b^3 + 0{,}05939b^2 + 1{,}6168b + 11{,}4453) + (0{,}0000956b^3 - 0{,}00545b^2 + 0{,}0456b + 3{,}7664), \text{ кДж/(кг·К)};$$

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 60$ % мас.

$$C_P = 10^{-8} \cdot t^3(0{,}004043b^3 - 0{,}5759b^2 + 26{,}5095b - 384{,}879) + 10^{-7}t^2(-0{,}07247b^3 + 10{,}1049b^2 - 456{,}447b + 6687{,}43) + 10^{-5}t(0{,}03467b^3 - 4{,}5983b^2 + 198{,}698b - 2798{,}325) + (0{,}000002503b^3 + 0{,}000532b^2 - 0{,}06482b + 4{,}3446), \text{ кДж/(кг·К)}.$$

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$$\lambda = 10^{-4}t(0{,}0002974b^3 - 0{,}01978b^2 + 0{,}4423b + 5{,}9562) + (-0{,}0000141b^3 + 0{,}0008631b^2 - 0{,}01917b + 0{,}6752), \text{ Вт/(м·К)};$$

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 60$ % мас.

$$\lambda = 10^{-4}t(0{,}0000664b^3 - 0{,}007465b^2 + 0{,}2625b + 6{,}5076) + (-0{,}000000913b^3 + 0{,}0001119b^2 - 0{,}007358b + 0{,}6388), \text{ Вт/(м·К)}.$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\sigma \cdot 10^3 = (-0{,}0003872b^3 + 0{,}03303b^2 - 0{,}4893b + 79{,}8832) -$
$-t(-0{,}000003356b^3 + 0{,}0003271b^2 - 0{,}01026b + 0{,}2381)$, Н/м;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 60$ % мас.

$\sigma \cdot 10^3 = (-0{,}0004016b^3 + 0{,}0529b^2 - 1{,}8896b + 104{,}4095) - t(-$
$0{,}000006485b^3 + 0{,}0008165b^2 - 0{,}0358b + 0{,}6483)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$Pr = (-0{,}0003542b^3 + 0{,}02036b^2 - 0{,}3593b + 14{,}3066) *$
$* \exp[10^{-8} \cdot t^3(0{,}002314b^3 - 0{,}03294b^2 - 1{,}1866b + 28{,}9635) +$
$+ 10^{-5}t^2(-0{,}0003948b^3 - 0{,}003637b^2 + 0{,}4788b +$
$+ 1{,}1095) - 10^{-3}t(0{,}0001074b^3 - 0{,}02718b^2 + 0{,}7152b + 19{,}9708)]$;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 60$ % мас.

$Pr = (0{,}00694b^3 - 0{,}8019b^2 + 30{,}9703b - 382{,}5) *$
$\exp[10^{-8} \cdot t^3(0{,}003338b^3 - 0{,}4837b^2 + 18{,}1682b - 173{,}6501) +$
$+ 10^{-5}t^2(0{,}0003395b^3 - 0{,}03473b^2 + 1{,}9518b -$
$- 34{,}925) - 10^{-3}t(0{,}0014501b^3 - 0{,}1779b^2 + 7{,}6555b - 88{,}830)]$.

Теплофизические свойства водного раствора хлорида лития LiCl

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ	кг/м^3	10	1055	1048	1038	1027	1014	999
		20	1115	1107	1097	1085	1072	1056
		30	1180	1172	1161	1149	1134	1117
		40	1254	1245	1234	1221	1205	1188
		50	1337	1328	1316	1302	1285	1266
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	10	1,118	0,744	0,520	0,409	0,334	0,271
		20	1,857	1,256	0,916	0,718	0,595	0,538
		30	3,838	2,440	1,697	1,236	0,920	0,783
		40	7,480	4,500	3,012	2,194	1,677	1,372
		50	18,920	10,36	6,976	4,730	3,346	2,512
C_P	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	10	3,707	3,716	3,732	3,758	3,792	3,834
		20	3,254	3,264	3,282	3,312	3,352	3,397
		30	2,956	2,969	2,995	3,038	3,092	3,161
		40	2,707	2,725	2,754	2,802	2,865	2,949
		50	2,456	2,489	2,536	2,594	2,670	2,759
λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	10	0,555	0,583	0,607	0,626	0,641	0,652
		20	0,527	0,554	0,578	0,597	0,611	0,619
		30	0,495	0,519	0,542	0,561	0,573	0,579
		40	0,447	0,473	0,497	0,515	0,528	0,535
		50	0,385	0,421	0,448	0,466	0,477	0,482
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	10	75,82	74,02	71,43	68,32	64,61	60,45
		20	81,53	80,05	78,21	75,81	72,56	68,36
		30	87,52	86,65	85,42	84,16	82,00	78,25
		40	95,95	94,74	93,45	92,05	90,50	88,59
		50	104,70	103,62	102,4	101,0	99,56	98,05

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pr	-	10	7,878	4,970	3,256	2,52	2,010	1,586
		20	12,785	8,192	5,702	4,328	3,470	3,129
		30	27,052	16,328	10,89	7,691	5,611	4,805
		40	56,804	32,205	20,62	14,56	10,95	8,987
		50	161,30	81,339	51,97	34,28	24,06	18,204

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора хлорида лития LiCl

Диапазон температур $20 \le t \le 120$ ^{0}C, концентраций $10 \le b \le 50$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}001755b^3+0{,}08522b^2-1{,}328b-16{,}701)-t(0{,}000012b^3-$
$-0{,}0009341b^2+0{,}0229b+0{,}0949)+(0{,}03917b^3-2{,}3278b^2+$
$+18{,}4541b+769{,}869)$, кг/м^3;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}0001719b^3-0{,}003936b^2+0{,}9563b-47{,}736)-$
$t(-0{,}000000501b^3-0{,}0001827b^2+0{,}01867b-0{,}1315)+$
$+(0{,}003182b^3-0{,}3403b^2+19{,}5195b+820{,}893)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\nu\cdot10^6=(0{,}0001456b^3+0{,}00295b^2-0{,}1042b+2{,}6277)\cdot\exp[10^{-7}t^3*$
$*(-0{,}0006392b^3+0{,}003755b^2+1{,}1648b-18{,}745)+10^{-5}t^2*$
$*(0{,}0008944b^3+0{,}00723b^2-2{,}4479b+45{,}781)-10^{-3}t(0{,}001131b^3-$
$-0{,}0154b^2-1{,}3349b+47{,}416)]$, м^2/с;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\nu \cdot 10^6 = (0{,}0006226b^3 + 0{,}00869b^2 - 2{,}1314b + 45{,}399) \cdot \exp[10^{-7}t^3 * * (0{,}0000611b^3 + 0{,}003714b^2 - 1{,}0722b + 29{,}642) + 10^{-5}t^2(-0{,}0001548b^3 - -0{,}0179b^2 + 3{,}2026b - 72{,}793) - 10^{-3}t(-0{,}0002733b^3 + 0{,}01122b^2 + +1{,}2472b - 16{,}0912)]$, $м^2/с$.

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$C_P = 10^{-5}t^2(-0{,}0000076b^3 + 0{,}002408b^2 - 0{,}05189b + 1{,}3358) - 10^{-4}t * * (0{,}0000353b^3 + 0{,}003356b^2 - 0{,}08721b + 2{,}6131) + (0{,}0000284b^3 - -0{,}0009236b^2 + 0{,}0375b + 4{,}146)$, кДж/(кг·К);

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$C_P = 10^{-5}t^2(-0{,}0000289b^3 - 0{,}0005773b^2 + 0{,}1885b - 2{,}6136) + 10^{-4}t * * (0{,}0004984b^3 + 0{,}01179b^2 - 2{,}899b + 53{,}931) + (-0{,}0000024b^3 + +0{,}0001313b^2 - 0{,}0246b + 3{,}642)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\lambda = t^{-3}(-0{,}02942b^3 - 0{,}2818b^2 + 125{,}56b - 3632{,}584) + t^{-2}(0{,}007823b^3 - -0{,}3104b^2 - 4{,}5296b + 343{,}825) - t^{-1}(0{,}000193b^3 - 0{,}008817b^2 - -0{,}08065b + 12{,}6131) + (0{,}0000079b^3 - 0{,}0005013b^2 + 0{,}005014b + +0{,}719)$, Вт/(м·К);

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\lambda = t^{-3}(6{,}768b^2 - 474{,}453b + 7228{,}57) + t^{-2}(-0{,}004551b^3 - 0{,}08168b^2 + +22{,}8387b - 394{,}003) - t^{-1}(-0{,}0001169b^3 - 0{,}001693b^2 + 0{,}5743b - -5{,}077) + (-0{,}00000181b^3 + 0{,}0000908b^2 - 0{,}00373b + 0{,}7138)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\sigma \cdot 10^3 = 10^{-6} \cdot t^3(-0{,}000304b^3 + 0{,}007241b^2 - 0{,}6144b + 7{,}1241) + 10^{-4}t^2 * * (0{,}0005769b^3 - 0{,}0001477b^2 + 0{,}7454b - 18{,}219) + 10^{-2}t(-0{,}0000487b^3 - -0{,}01862b^2 + 0{,}2617b - 4{,}2336) + (0{,}002423b^3 - 0{,}1403b^2 + 3{,}1081b + +57{,}46)$, Н/м;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\sigma \cdot 10^3 = 10^{-6} \cdot t^3(-0{,}0002461b^3 - 0{,}01146b^2 + 2{,}8032b - 80{,}132) + 10^{-4}t^2 * *(0{,}0003951b^3 + 0{,}01447b^2 - 4{,}2003b + 121{,}917) + 10^{-2}t(-0{,}0001363b^3 - -0{,}006304b^2 + 1{,}6863b - 55{,}691) + (0{,}0001424b^3 - 0{,}01263b^2 + 1{,}102b + +64{,}3085)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$Pr = (0{,}002103b^3 - 0{,}03451b^2 + 0{,}1647b + 14{,}949) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * *(-0{,}0005043b^3 - 0{,}00364b^2 + 1{,}3122b - 19{,}854) + 10^{-5}t^2(0{,}0006577b^3 + +0{,}01984b^2 - 2{,}6763b + 48{,}354) - 10^{-3}t(0{,}002361b^3 - 0{,}09111b^2 + +0{,}0769b + 43{,}2117)]$;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$Pr = (0{,}005524b^3 + 0{,}2743b^2 - 32{,}9022b + 636{,}65) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * *(-0{,}0000047b^3 + 0{,}003816b^2 - 0{,}8277b + 24{,}1433) + 10^{-5}t^2 * *(0{,}0000267b^3 - 0{,}02051b^2 + 2{,}7226b - 60{,}033) - 10^{-3}t(0{,}0001569b^3 - -0{,}02651b^2 + 2{,}3358b - 23{,}1736)]$.

Теплофизические свойства
водного раствора хлорида магния $MgCl_2$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^0C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	$кг/м^3$	5	1039	1033	1024	1013	1001	986,3
		10	1082	1075	1066	1056	1044	1031,6
		15	1125	1118	1110	1100	1089	1075,7
$\nu \cdot 10^6$	$м^2/с$	5	1,136	0,710	0,494	0,369	0,301	0,268
		10	1,386	0,870	0,608	0,453	0,357	0,305
		15	1,751	1,093	0,750	0,554	0,432	0,370
C_P	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$	5	3,94	3,90	3,88	3,92	3,93	3,94
		10	3,70	3,66	3,65	3,68	3,69	3,70
		15	3,48	3,45	3,42	3,44	3,45	3,46
λ	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	5	0,568	0,614	0,637	0,652	0,661	0,665
		10	0,573	0,601	0,623	0,642	0,652	0,657
		15	0,561	0,587	0,609	0,627	0,637	0,641
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	74,73	71,16	67,40	63,40	59,20	55,00
		10	75,92	72,42	68,70	64,60	60,40	56,20
		15	77,82	73,95	69,70	65,40	61,20	57,00
Pr	-	5	7,93	4,66	3,08	2,23	1,78	1,54
		10	9,69	5,69	3,80	2,74	2,11	1,85
		15	12,24	7,17	4,68	3,35	2,55	2,25

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора хлорида магния $MgCl_2$

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$, концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}00677b^3+0{,}0157b^2+2{,}423b-36{,}44)-10^{-2}t(-0{,}00656b^3-$$
$$-0{,}0542b^2+3{,}581b+2{,}511)+(-0{,}265b^3+7{,}90b^2-63{,}285b+1195{,}9),$$

кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu\cdot10^6=(0{,}0000653b^3+0{,}00438b^2-0{,}00616b+1{,}869)\cdot\exp[10^{-6}\cdot t^2*$$
$$*(0{,}00704b^3+0{,}207b^2-7{,}762b+140{,}15)-10^{-3}t(0{,}00445b^3-$$
$$-0{,}0788b^2+0{,}0522b+30{,}60)],$$

м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_P=10^{-6}\cdot t^2(0{,}00611b^3-0{,}1213b^2+0{,}390b+16{,}82)-10^{-4}t(0{,}00747b^3-$$
$$0{,}0824b^2-0{,}543b+25{,}11)+(0{,}00103b^3-0{,}0302b^2+0{,}224b+3{,}474),$$

кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda=t^{-3}(14{,}07b^2-336{,}28b+1861{,}6)+t^{-2}(-1{,}319b^2+31{,}723b-$$
$$121{,}39)-t^{-1}(-0{,}0387b^2+0{,}925b+0{,}0995)+(-0{,}000375b^2+0{,}00608b+$$
$$+0{,}676),$$

Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma\cdot10^3=10^{-6}\cdot t^3(0{,}000236b^3-0{,}0251b^2+0{,}535b-0{,}277)-10^{-5}t^2*$$
$$*(-0{,}031b^3+0{,}188b^2+7{,}29b+20{,}56)-t(0{,}000016b^3+0{,}000495b^2-$$
$$-0{,}0133b+0{,}20)+(-0{,}000626b^3+0{,}05b^2-0{,}452b+78{,}95),$$

Н/м.

6. Критерий Прандтля:

$$Pr=(0{,}0032b^3-0{,}0556b^2+0{,}906b+11{,}04)\cdot\exp[10^{-5}\cdot t^2(0{,}00081b^3-$$
$$-0{,}009b^2-0{,}857b+12{,}555)-10^{-3}t(0{,}0093b^30{,}252b^2+2{,}088b+27{,}796)].$$

Теплофизические свойства водного раствора хлорида натрия NaCl

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	кг/м^3	5	1034,0	1026,8	1017,2	1005,6	992,4	981,9
		10	1070,7	1062,4	1052,3	1040,5	1027,6	1019
		15	1108,5	1099,3	1088,7	1076,8	1063,9	1056
		20	1149,9	1137,7	1126,8	1114,6	1101,7	1093
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	5	1,034	0,693	0,501	0,398	0,321	0,263
		10	1,099	0,734	0,542	0,433	0,344	0,281
		15	1,212	0,802	0,588	0,463	0,375	0,298
		20	1,356	0,902	0,653	0,511	0,418	0,354
C_P	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	5	3,98	3,93	3,88	3,84	3,80	3,77
		10	3,85	3,81	3,76	3,71	3,65	3,58
		15	3,65	3,62	3,59	3,54	3,47	3,40
		20	3,36	3,33	3,31	3,28	3,23	3,18
λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	5	0,591	0,618	0,634	0,639	0,638	0,626
		10	0,591	0,618	0,633	0,638	0,636	0,623
		15	0,579	0,605	0,620	0,626	0,622	0,609
		20	0,552	0,578	0,596	0,602	0,599	0,588
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	74,78	71,38	68,18	65,00	61,70	58,40
		10	75,19	72,08	68,87	65,60	62,30	59,13
		15	76,70	73,72	71,00	67,92	64,70	61,96
		20	78,98	76,40	74,10	71,80	69,51	67,15
Pr	-	5	7,21	4,53	3,12	2,41	1,90	1,62
		10	7,66	4,80	3,39	2,62	2,04	1,79
		15	8,36	5,25	3,67	2,90	2,23	1,98
		20	9,47	5,92	4,08	3,22	2,48	2,12

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора хлорида натрия NaCl

Диапазон температур $20 \le t \le 120$ ^{0}C, концентраций $5 \le b \le 20$ % мас.

1. Плотность:

$\rho=(0{,}0000328b^3 0{,}008679b^2+0{,}16454b+994{,}365)+b[7{,}9685*$
$*\exp(0{,}0000144t^2-0{,}002342t)]$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 10$ % мас.

$\nu\cdot10^6=(-0{,}001072b^2+0{,}05338b+1{,}5276)\cdot\exp[10^{-7}t^2(-738731{,}2/b^3+$
$+154305/b^2-2446{,}95/b+2194{,}7)-10^{-9}t^3(-653448{,}6/b^3+177087{,}3/b^2-$
$-12150{,}4/b+1206{,}35)-10^{-5}t(197701{,}7/b^3-146091{,}7/b^2+26570{,}1/b+$
$+1986{,}3)]$, м^2/с;

б) диапазон концентраций $10 < b \le 20$ % мас.

$\nu\cdot10^6=(0{,}0325b+1{,}6297)\cdot\exp[10^{-7}t^2(-2{,}1282b^2-46{,}974b+3425{,}3)-$
$-10^{-9}t^3(-0{,}6993b^2-47{,}498b+1649{,}2)-10^{-5}t(-2{,}204b^2+18{,}635b+$
$+3417{,}2)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

$C_P=(-0{,}001343b^2-0{,}011b+4{,}1266)\cdot\exp[10^{-6}t^2(0{,}00594b^3-0{,}1682b^2+$
$+0{,}816b+0{,}5932)-10^{-4}t(0{,}007915b^3-0{,}2541b^2+1{,}802b+3{,}596)]$,
кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

$\lambda=(-0{,}0000066b^3-0{,}0000441b^2+0{,}00187b+0{,}5486)+10^{-3}t*$
$*(0{,}0001456b^3-0{,}0045b^2+0{,}04124b+1{,}90)-10^{-5}t^2(0{,}0000266b^3-$
$-0{,}001b^2+0{,}0143b+1{,}14)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$\sigma\cdot10^3=(-0{,}00023b^3+0{,}0194b^2-0{,}1476b+78{,}252)-0{,}16t\cdot\exp(-$
$0{,}0000728b^3+0{,}000568b^2+0{,}0025b)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

$$Pr=(0{,}000815b^3-0{,}0079b^2+0{,}0546b+12{,}81)\cdot\exp[10^{-9}\cdot t^3(-0{,}16b^3+$$
$$+2{,}60b^2+12{,}601b-513{,}0)+10^{-5}t^2(0{,}00254b^3-0{,}028b^2-0{,}514b+$$
$$+20{,}694)-10^{-3}t(0{,}00128b^3-0{,}0027b^2-0{,}541b+35{,}431)].$$

Теплофизические свойства водного раствора хлорида аммония NH_4Cl

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^0C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	$кг/м^3$	5	1014	1007	999	989	975	959
		10	1029	1022	1013	1002	991	978
		15	1043	1036	1027	1016	1006	994,5
		20	1057	1050	1041	1031	1021	1010
		25	1070	1063	1054	1045	1035	1025
$\nu \cdot 10^6$	$м^2/с$	5	0,98	0,67	0,49	0,38	0,31	0,26
		10	0,96	0,67	0,50	0,40	0,33	0,28
		15	0,94	0,67	0,51	0,41	0,34	0,29
		20	0,94	0,68	0,52	0,42	0,35	0,30
		25	0,96	0,70	0,53	0,42	0,34	0,28
C_P	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$	5	4,02	3,98	3,98	4,01	4,03	4,06
		10	3,87	3,84	3,83	3,86	3,87	3,89
		15	3,72	3,69	3,69	3,71	3,72	3,74
		20	3,60	3,57	3,56	3,57	3,57	3,58
		25	3,48	3,45	3,44	3,45	3,45	3,46
λ	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	5	0,582	0,609	0,633	0,651	0,661	0,668
		10	0,564	0,591	0,614	0,632	0,641	0,647
		15	0,547	0,572	0,594	0,612	0,621	0,626
		20	0,530	0,553	0,576	0,593	0,602	0,608
		25	0,514	0,538	0,560	0,575	0,584	0,590
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	73,2	69,8	66,5	63,2	60,0	56,7
		10	74,0	70,7	67,4	64,0	60,8	57,4
		15	75,3	71,8	68,3	64,9	61,5	58,0
		20	76,3	72,7	69,2	65,7	62,2	58,6
		25	77,1	73,5	69,9	66,3	62,7	59,1
Pr	-	5	6,85	4,41	3,08	2,30	1,84	1,55
		10	6,81	4,44	3,16	2,40	1,95	1,63
		15	6,71	4,47	3,25	2,53	1,99	1,70
		20	6,76	4,56	3,33	2,55	2,06	1,75
		25	6,96	4,76	3,44	2,62	2,09	1,78

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора хлорида аммония NH_4Cl

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$, концентраций $5 \le b \le 25$ % мас.

1. Плотность:

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(0{,}006546b^3-0{,}3724b^2+7{,}2143b-58{,}3894)-t(0{,}0000831b^3-$
$-0{,}004748b^2+0{,}0892b-0{,}2244)+(0{,}001732b^3-0{,}1108b^2+4{,}9917b+$
$+994{,}722)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

$\nu\cdot10^6=(0{,}0001617b^3-0{,}005803b^2+0{,}0494b+1{,}4307)\cdot\exp[10^{-7}t^3 *$
$*(0{,}001561b^3-0{,}002256b^2-0{,}4494b-0{,}0219)+10^{-5}t^2(-0{,}00561b^3+$
$+0{,}07406b^2+0{,}2387b+8{,}8175)-10^{-3}t(-0{,}002246b^3+0{,}01775b^2+$
$+0{,}09244b+24{,}5255)]$, м^2/с;

б) диапазон концентраций $15 \le b \le 25$ % мас.

$\nu\cdot10^6=(-0{,}0000192b^3+0{,}002132b^2-0{,}06151b+1{,}9201)\cdot\exp[10^{-7}t^3*$
$*(-0{,}0003537b^3-0{,}007393b^2+0{,}6222b-8{,}4766)+10^{-5}t^2(0{,}0002515b^3+$
$+0{,}01197b^2-0{,}8038b+18{,}6446)-10^{-3}t(-0{,}0001171b^3+0{,}0245b^2-$
$-0{,}9522b+31{,}4931)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

$C_P=10^{-5}t^2(0{,}0002973b^3-0{,}00632b^2-0{,}02324b+1{,}927)-10^{-3}t *$
$*(0{,}0003198b^3-0{,}009848b^2+0{,}03656b+1{,}927)+ (-0{,}001694b^3+$
$+0{,}05073b^2-0{,}4949b+5{,}4599)$, кДж/(кг·К);

б) диапазон концентраций $15 < b \le 25$ % мас.

$C_P=10^{-5}t^2(-0{,}0000531b^3+0{,}003787b^2-0{,}09342b+1{,}888)-10^{-3}t*$
$* (-0{,}0000979b^3--0{,}001359b^2+0{,}20b-1{,}0236)+(-0{,}0001714b^3+$
$+0{,}01001b^2-0{,}2142b+5{,}2727)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

$$\lambda=t^{-3}(-1{,}492b^2+72{,}723b-316{,}023)+t^{-2}(0{,}009317b^3-0{,}09477b^2-$$
$$-5{,}1517b+85{,}489)-t^{-1}(0{,}001292b^3-0{,}03303b^2+0{,}1182b+5{,}5766)+$$
$$+(0{,}0001111b^3-0{,}003303b^2+0{,}0249997b+0{,}653285),\ \text{Вт/(м·К)};$$

б) диапазон концентраций $15 < b \le 25$ % мас.

$$\lambda=t^{-3}(-0{,}08867b^3-1{,}335b^2+116{,}683b-711{,}471)+t^{-2}(0{,}005899b^3+$$
$$+0{,}05263b^2--5{,}8237b+73{,}939)-t^{-1}(0{,}0001294b^3-0{,}003871b^2+$$
$$+0{,}05783b+3{,}843)+(-0{,}0000024b^3+0{,}00017776b^2-0{,}007417b+$$
$$+0{,}7397),\ \text{Вт/(м·К)}.$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

диапазон концентраций $15 < b \le 25$ % мас

$$\sigma\cdot10^3=(0{,}0004531b^3+0{,}01929b^2-0{,}01477b+76{,}054)-t*$$
$$*(-0{,}000003701b^3+0{,}00017b^2-0{,}001457b+0{,}1679),\ \text{Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 15$ % мас.

$$Pr=(0{,}0012634b^3-0{,}0445905b^2+0{,}398464b+10{,}569343)*$$
$$\exp[10^{-7}\cdot t^3\ (0{,}0001321b^3+0{,}007235b^2-0{,}217655b-0{,}75912)+$$
$$+10^{-5}t^2(-0{,}002247b^3+0{,}0348341b^2-0{,}037506b+11{,}50365)-$$
$$-10^{-3}t(0{,}0098771b^3-0{,}3237045b^2+2{,}9958b++20{,}55474)];$$

б) диапазон концентраций $15 \le b \le 25$ % мас.

$$Pr=(0{,}0000292b^3-0{,}0017334b^2+0{,}0209405b+10{,}754821)\ *$$
$$*\exp[10^{-7}\cdot t^3(0{,}0003899b^3+0{,}0040659b^2-0{,}4060396b+1{,}913223)+$$
$$+10^{-5}t^2(-0{,}0008614b^3-0{,}0089041b^2+0{,}877949b+2{,}93664)-10^{-3}t*$$
$$*(-0{,}0017734b^3+0{,}074738b^2-1{,}166569b+32{,}6612)].$$

Теплофизические свойства водного раствора нитрата аммония NH_4NO_3

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	кг/м^3	10	1039	1032	1022	1012	998	984
		20	1092	1079	1068	1056	1044	1030
		30	1127	1115	1104	1094	1082	1069
		40	1175	1162	1151	1138	1126	1114
		50	1225	1212	1200	1187	1174	1160
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	10	0,92	0,64	0,49	0,38	0,31	0,27
		20	0,90	0,63	0,50	0,41	0,34	0,29
		30	0,89	0,66	0,52	0,42	0,36	0,32
		40	0,94	0,71	0,56	0,47	0,40	0,36
		50	1,09	0,81	0,64	0,54	0,46	0,41
C_P	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	10	3,91	3,85	3,82	3,81	3,81	3,82
		20	3,65	3,62	3,61	3,62	3,63	3,65
		30	3,37	3,35	3,34	3,36	3,38	3,40
		40	3,11	3,09	3,10	3,11	3,12	3,14
		50	2,86	2,84	2,85	2,86	2,88	2,91
λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	10	0,574	0,602	0,624	0,643	0,654	0,662
		20	0,549	0,576	0,598	0,614	0,624	0,630
		30	0,520	0,544	0,565	0,582	0,591	0,596
		40	0,491	0,513	0,533	0,548	0,557	0,562
		50	0,457	0,479	0,498	0,512	0,521	0,525
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	10	73,7	70,3	67,0	63,6	60,2	59,6
		20	75,5	72,1	68,6	65,1	61,7	58,2
		30	77,2	73,8	70,4	67,0	63,6	60,2
		40	79,2	75,7	72,1	68,6	65,1	61,8
		50	81,2	77,6	74,0	70,4	66,8	63,3
Pr	-	10	6,52	4,24	3,08	2,32	1,85	1,56
		20	6,47	4,26	3,21	2,55	2,07	1,75
		30	6,50	4,55	3,42	2,75	2,27	1,98
		40	7,01	4,97	3,76	3,03	2,52	2,22
		50	8,38	5,90	4,48	3,60	2,99	2,62

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора нитрата аммония NH_4NO_3

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}001519b^3-0{,}002613b^2+3{,}0167b-51{,}1533)-10^{-2}t*$
$(-0{,}0002301b^3-0{,}166b^2+8{,}3382b-43{,}1387)+(-0{,}01018b^3+0{,}492b^2-$
$-1{,}8317b+1024{,}0)$, кг/м^3;

б) диапазон концентраций $30 < b \le 50$ % мас.

$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}000296b^3-0{,}009108b^2+2{,}1791b-53{,}201)-10^{-2}t*$
$(-0{,}000210b^3-0{,}0380b^2+4{,}4481b-42{,}1928)+(0{,}0005457b^3-$
$-0{,}06849b^2+7{,}7952b+949{,}95)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\nu\cdot10^6=(0{,}000001101b^3-0{,}000938b^2+0{,}02947b+1{,}1752)\cdot\exp[10^{-7}t^3*$
$*\ (0{,}0007773b^3+0{,}0006061b^2-0{,}9724b+7{,}7956)+10^{-5}t^2(0{,}001172b^3-$
$-0{,}02759b^2+2{,}4849b-12{,}7226)-10^{-3}t(-0{,}000493b^3-0{,}02474b^2+$
$+1{,}4293b+10{,}6277)]$, м^2/с;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\nu\cdot10^6=(0{,}00001070b^3-0{,}0002704b^2-0{,}01297b+1{,}5882)\cdot\exp[10^{-7}t^3*$
$*(-0{,}0000249b^3+0{,}0005889b^2-0{,}1231b+3{,}9945)+10^{-5}t^2*$
$*(0{,}0001342b^3-0{,}006664b^2+0{,}2707b-0{,}3967)-10^{-3}t(0{,}0000811b^3+$
$+0{,}00236b^2-0{,}3889b+25{,}2782)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$C_P=10^{-7}t^3(-0{,}000008209b^3-0{,}003846b^2+0{,}1443b-2{,}5547)-10^{-5}t^2*$
$*(0{,}000242b^3-0{,}00306b^2-0{,}1889b+7{,}2117)-10^{-3}t(0{,}0002225b^3-$
$-0{,}001529b^2-0{,}3154b+8{,}7591)+(-0{,}0000001866b^3+0{,}0001112b^2-$
$-0{,}03288b+4{,}3212)$, кДж/(кг·К);

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$C_P=10^{-7}t^3(0{,}00001043b^3-0{,}00009653b^2-0{,}002917b-2{,}0165)+10^{-5}t^2*$
$*(0{,}00002952b^3-0{,}0006137b^2-0{,}1873b+10{,}6997)-10^3t*$
$*(0{,}0000136b^3+0{,}003185b^2-0{,}3908b+12{,}4187)+$
$+(-0{,}000008707b^3+0{,}001192b^2-0{,}07932b+4{,}97245)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\lambda=t^{-3}(-0{,}04014b^3-0{,}5054b^2+130{,}25b-2197{,}49)+t^{-2}(0{,}005706b^3-$
$-0{,}05545b^2-10{,}366b+245{,}723)-t^{-1}(0{,}0001453b^3-0{,}0003995b^2-$
$-0{,}3155b+10{,}511)+(-0{,}0000019b^3+0{,}0001625b^2-$
$-0{,}008056b+0{,}781)$, Вт/(м·К);

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\lambda=t^{-3}(0{,}00698b^3+0{,}1442b^2-46{,}4801b+1247{,}56)+t^{-2}(-0{,}0006304b^3-$
$-0{,}004759b^2+3{,}1439b-34{,}11)-t^{-1}(-0{,}000040b^3+0{,}003047b^2-$
$-0{,}07911b+5{,}3223)+(0{,}0000008b^3+0{,}0000741b^2-$
$-0{,}005721b+0{,}759)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$\sigma\cdot10^3=(0{,}0003985b^3-0{,}02551b^2+0{,}6797b+72{,}409)-t(0{,}0000053b^3-$
$-0{,}000359b^2+0{,}007556b+0{,}1232)$, Н/м;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$\sigma\cdot10^3=(-0{,}0002217b^3+0{,}02648b^2-0{,}8215b+87{,}405)-t(0{,}000000201*$
$*b^3-0{,}0000435b^2+0{,}002671b+0{,}1218)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас.

$Pr=(0{,}0000831b^3-0{,}01071b^2+0{,}2836b+8{,}9343)\cdot\exp[10^{-7}\cdot t^3*$
$*(0{,}0006157\ b^3+0{,}0003069b^2-0{,}8162b+5{,}066)+10^{-5}t^2\ (-0{,}001147b^3-$
$0{,}009732b^2+1{,}8414b-3{,}679)-10^{-3}t(-0{,}001386b^3+0{,}03793b^2+$
$+0{,}1036b+24{,}292)]$;

б) диапазон концентраций $30 \le b \le 50$ % мас.

$$Pr=(0{,}0000224b^3+0{,}005326b^2-0{,}3995b+16{,}639)\cdot\exp[10^{-7}\cdot t^3*$$
$$*(-0{,}0000527b^3+0{,}001083b^2+0{,}1934b-7{,}8733)+ 10^{-5}t^2 *$$
$$*(0{,}0000777b^3+ 0{,}002359b^2-0{,}617b+26{,}1157)-10^{-3}t*$$
$$* (0{,}0001084b^3- 0{,}003557b^2-0{,}2892b+33{,}058)].$$

Теплофизические свойства водного раствора сульфата аммония $(NH_4)_2SO_4$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^0C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	$кг/м^3$	5	1028	1021	1012	1001	988	974
		10	1057	1050	1041	1030	1018	1005
		20	1115	1108	1098	1088	1078	1066
		30	1172	1164	1155	1145	1135	1123
$\nu \cdot 10^6$	$м^2/с$	5	1,05	0,69	0,50	0,39	0,31	0,25
		10	1,11	0,74	0,54	0,42	0,34	0,29
		20	1,35	0,91	0,67	0,52	0,42	0,37
		30	1,88	1,28	0,95	0,75	0,61	0,53
C_P	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$	5	4,03	3,98	3,98	4,01	4,04	4,08
		10	3,81	3,78	3,77	3,79	3,81	3,85
		20	3,61	3,57	3,57	3,58	3,59	3,61
		30	3,36	3,33	3,32	3,33	3,34	3,36
λ	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	5	0,591	0,619	0,643	0,661	0,672	0,678
		10	0,572	0,600	0,622	0,640	0,650	0,655
		20	0,562	0,588	0,612	0,628	0,638	0,644
		30	0,540	0,565	0,587	0,604	0,614	0,621
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	74,0	70,7	67,4	64,0	60,8	57,5
		10	74,9	71,6	68,2	64,9	61,6	58,3
		20	76,9	73,4	69,8	66,3	62,8	59,12
		30	78,6	75,0	71,4	67,8	64,3	60,6
Pr	-	5	7,34	4,54	3,14	2,36	1,84	1,46
		10	7,82	4,90	3,40	2,56	2,02	1,65
		20	9,71	6,11	4,29	3,23	2,54	2,14
		30	13,72	8,77	6,21	4,75	3,76	3,07

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора сульфата аммония $(NH_4)_2SO_4$

Диапазон температур $20 \le t \le 120$ ^{0}C,
концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}0018454b^3+0{,}06162b^2+0{,}2023b-25{,}089)-10^{-2}t*$$
$$*(-0{,}002135b^3++0{,}07437b^2+0{,}01187b+20{,}7584)+(-0{,}0006548b^3+$$
$$+0{,}02228b^2+5{,}72b+1004{,}42),\ кг/м^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu\cdot10^6=(0{,}0000404b^3-0{,}0005545b^2+0{,}02618b+1{,}4656)\cdot\exp[10^{-5}\cdot t^2*$$
$$*(0{,}0003647b^3-0{,}02601b^2+0{,}5526b+4{,}064)-10^{-3}t(0{,}0002024b^3-$$
$$-0{,}01795b^2+0{,}3995b+21{,}1715)],\ м^2/с.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_P=10^{-5}\cdot t^2(0{,}000000601b^3+0{,}00211b^2-0{,}1218b+3{,}096)-10^{-3}t*$$
$$*(-0{,}0000279b^3+0{,}003324b^2-0{,}1271b+3{,}4612)+(-0{,}0000687b^3+$$
$$+0{,}003933b^2-0{,}09096b+4{,}434),\ кДж/(кг\cdot К).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda=t^{-3}(-0{,}29656b^3+12{,}476b^2-130{,}2801b+349{,}159)+t^{-2}(0{,}02142b^3-$$
$$-0{,}8457b^2+7{,}5135b+42{,}285)-t^{-1}(0{,}0003309b^3-0{,}010b^2+0{,}006203b+$$
$$+5{,}7686)+(-0{,}00000981b^3+0{,}0005869b^2-0{,}01225b+0{,}7683),$$
$$Вт/(м\cdot К).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma\cdot10^3=(-0{,}0002637b^3+0{,}01257b^2+0{,}0374b+76{,}808)-t*$$
$$*(-0{,}000004801b^3+0{,}000237b^2-0{,}002526b+0{,}1721),\ Н/м.$$

6. Критерий Прандтля:

$$Pr=(0{,}0001657b^3+0{,}003507b^2+0{,}09307b+11{,}2534)\cdot\exp[10^{-5}\cdot t^2*$$
$$*(-0{,}0000771b^3-0{,}002047b^2+0{,}1542b+6{,}6813)-10^{-3}t(-0{,}0002693b^3+$$
$$+0{,}007113b^2-0{,}007256b+26{,}152)].$$

Теплофизические свойства водного раствора нитрата натрия $NaNO_3$

Теплофизические свойства(символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	кг/м^3	5	1032,3	1024,6	1014,6	1002,7	998,8	972
		10	1067,4	1058,4	1047,3	1034,8	1020,8	1004
		20	1142,9	1131,4	1118,7	1104,8	1090,1	1074
		30	1225,6	1212,2	1198,0	1183,0	1167,4	1151
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	5	0,998	0,664	0,493	0,385	0,310	0,253
		10	1,004	0,680	0,516	0,404	0,330	0,278
		20	1,033	0,736	0,547	0,429	0,354	0,316
		30	1,085	0,784	0,595	0,480	0,402	0,362
C_P	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	5	4,03	3,94	3,95	3,99	4,06	4,13
		10	3,88	3,80	3,81	3,85	3,92	4,00
		20	3,58	3,52	3,52	3,56	3,63	3,70
		30	3,30	3,26	3,26	3,30	3,35	3,41
λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	5	0,595	0,624	0,648	0,666	0,677	0,685
		10	0,591	0,619	0,643	0,661	0,672	0,680
		20	0,580	0,608	0,631	0,649	0,660	0,667
		30	0,569	0,596	0,619	0,636	0,647	0,654
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	74,10	70,72	67,40	64,00	60,70	57,27
		10	74,83	71,60	68,30	64,90	61,45	58,10
		20	77,04	73,74	70,81	67,50	64,10	60,90
Pr	-	5	6,97	4,35	3,08	2,33	1,83	1,53
		10	7,04	4,47	3,24	2,46	1,97	1,67
		20	7,28	4,81	3,50	2,63	2,15	1,83
		30	7,72	5,25	3,83	2,98	2,45	2,13

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора нитрата натрия $NaNO_3$

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$,
концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

1. Плотность:
$\rho=10^{-4}\cdot t^2(-0{,}00338b^3+0{,}163b^2-1{,}456b-22{,}538)-10^{-2}t(-0{,}00374b^3+$
$+0{,}175b^2-0{,}627b+22{,}354)+(-0{,}000737b^3+0{,}0708b^2+6{,}317b+$
$+1004{,}72)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:
$\nu\cdot10^6=(0{,}0000282b^3-0{,}000737b^2-0{,}00952b+1{,}738)\cdot\exp[10^{-7}\cdot t^3*$
$*(-0{,}00175b^3+0{,}0698b^2-0{,}275b-6{,}140)+10^{-5}t^2(0{,}00374b^3-$
$-0{,}138b^2+0{,}526b+19{,}01)-10^{-3}t(0{,}00167b^3-0{,}0618b^2-0{,}053b+$
$+31{,}06)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:
$C_P=10^{-5}\cdot t^2(0{,}000031b^3-0{,}0168b^2+0{,}198b+4{,}032)-10^{-3}t(0{,}000352b^3-$
$-0{,}0184b^2+0{,}186b+4{,}745)+(0{,}0000105b^3-0{,}000488b^2-0{,}0245b+$
$+4{,}233)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:
$\lambda=t^{-3}(0{,}641b^2-14{,}706b-523{,}12)+t^{-2}(-0{,}0584b^2-1{,}281b+104{,}2)-$
$-t^{-1}\ (-0{,}00156b^2+0{,}0282b+6{,}674)+(-0{,}0000177b^2-0{,}000805b+$
$+0{,}739)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:
$\sigma\cdot10^3=(0{,}007b^3-0{,}243b^2+2{,}578b+69{,}77)-t(-0{,}000015b^3+$
$+0{,}000478b^2-0{,}00458b+0{,}181)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

$$Pr=(-0{,}000051b^3+0{,}00606b^2-0{,}169b+13{,}148)\cdot\exp[10^{-7}\cdot t^3*$$
$$*(0{,}000112b^3-0{,}0131b^2+0{,}487b-6{,}8)+10^{-4}t^2(0{,}000001b^3+$$
$$+0{,}00156b^2-0{,}09b+2{,}233)-10^{-2}t(-0{,}000015b^3+0{,}00188b^2-$$
$$-0{,}0814b+3{,}622)].$$

Теплофизические свойства водного раствора гидроксида натрия NaOH

Теплофизические свойства(символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ	$кг/м^3$	5	1054	1046	1036	1024	1012	998,8
		10	1109	1100	1090	1077	1064	1049,3
		20	1219	1208	1196	1183	1170	1154
		30	1328	1315	1303	1289	1276	1260
		40	1430	1416	1403	1389	1375	1360
		50	1525	1511	1497	1483	1468	1452
$\nu \cdot 10^6$	$м^2/с$	5	1,24	0,80	0,57	0,43	0,35	0,29
		10	1,65	1,05	0,74	0,55	0,44	0,38
		20	3,72	2,10	1,34	0,93	0,70	0,62
		30	13,48	4,53	2,54	1,58	1,08	0,91
		40	21,90	9,00	4,45	2,53	1,58	1,08
		50	40,00	15,1	7,03	3,77	2,25	1,50
C_P	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$	5	4,03	4,00	3,99	4,01	4,04	4,08
		10	3,88	3,85	3,85	3,86	3,89	3,91
		20	3,55	3,53	3,53	3,55	3,57	3,59
		30	3,27	3,26	3,26	3,27	3,28	3,29
		40	3,03	3,01	3,01	3,02	3,03	3,04
		50	2,85	2,83	2,83	2,84	2,85	2,86
λ	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	5	0,614	0,643	0,668	0,687	0,698	0,704
		10	0,627	0,657	0,682	0,702	0,713	0,719
		20	0,640	0,671	0,696	0,716	0,728	0,735
		30	0,645	0,676	0,702	0,722	0,733	0,741
		40	0,645	0,676	0,702	0,722	0,733	0,741
		50	0,645	0,676	0,702	0,722	0,733	0,741

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	75,42	72,55	69,68	66,81	63,94	61,10
		10	79,40	77,26	75,10	72,98	70,84	68,70
		20	86,12	84,54	82,96	81,38	79,80	78,22
		30	94,57	93,90	93,24	92,57	91,90	91,22
		40	106,62	106,2	105,8	105,4	104,9	104,5
		50	127,19	126,7	126,3	125,8	125,4	124,9
Pr	-	5	8,55	5,19	3,54	2,57	2,05	1,82
		10	11,30	6,77	4,54	3,27	2,56	2,30
		20	25,22	13,38	8,17	5,47	4,02	3,27
		30	91,08	28,67	15,30	9,24	6,17	4,70
		40	147,00	56,96	26,81	14,80	9,03	5,80
		50	268,40	95,57	42,35	22,05	12,86	7,60

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора гидроксида натрия NaOH

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0$C,
концентраций $5 \le b \le 50$ % мас.

1. Плотность:

$\rho=10^{-4} \cdot t^2(-0{,}0008b^3+0{,}0663b^2-1{,}205b-10{,}788)-10^{-2}t(-0{,}000855b^3+$
$+0{,}0644b^2-0{,}496b+35{,}398)+(-0{,}000647b^3+0{,}030b^2+10{,}70b+$
$+1007{,}68)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

$\nu \cdot 10^6=(0{,}00431b^3-0{,}1307b^2+1{,}365b-2{,}149)\cdot\exp[10^{-5}t^2(0{,}001055b^3-$
$-0{,}0337b^2+0{,}701b+4{,}384)-10^{-3}t(0{,}00165b^3-0{,}0323b^2+0{,}741b+$
$+21{,}52)]$, м^2/с;

б) диапазон концентраций $30 < b \le 50$ % мас.

$\nu \cdot 10^6=[28{,}1865\cdot\exp(0{,}00000616b^3+0{,}000442b^2-0{,}00924b)] *$
$*\exp\{[10^{-5}t^2\ (270{,}58\cdot\exp(0{,}000013b^3+0{,}000326b^2-\ 0{,}103b)]-$
$-[127{,}2\cdot10^{-3}t\cdot\exp(0{,}0000112b^3-0{,}000411b^2-0{,}0232b)]\}$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

$C_P=10^{-5}\cdot t^2(0{,}0000426b^3-0{,}00256b^2-0{,}011b+2{,}234)-10^{-3}t*$
$*(0{,}000137\ b^3-0{,}00694b^2+0{,}0282b+2{,}477)+\ (0{,}00000301b^3-$
$-0{,}0000078b^2-0{,}0345b+4{,}2454)$, кДж/(кг·К);

б) диапазон концентраций $30 < b \le 50$ % мас.

$C_P=10^{-5}\cdot t^2(0{,}000000601b^3+0{,}0000764b^2-0{,}00762b+0{,}8933)-10^{-3}t*$
$*(-0{,}0000027b^3-0{,}000265b^2+0{,}043b-0{,}20)+(0{,}00000301b^3-$
$-0{,}0000078b^2-0{,}03452b+4{,}2454)$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

$\lambda=t^{-3}(0{,}3661b^3-18{,}275b^2+241{,}75b-904{,}974)+t^{-2}(-0{,}03108b^3+$
$+1{,}5526b^2-20{,}4916b+138{,}642)-t^{-1}(-0{,}0007298b^3+0{,}03635b^2-$
$-0{,}47b+7{,}544)+(-0{,}0000026b^3+0{,}000067b^2+0{,}002082b+0{,}7384)$,
Вт/(м·К);

б) диапазон концентраций $30 < b \le 50$ % мас.

$\lambda=(-215{,}202/t^3)+(82{,}211/t^2)-(6{,}452/t)+0{,}789$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 25$ % мас.

$\sigma\cdot10^3=[74{,}659\cdot\exp(0{,}00000413b^3-0{,}0002b^2+0{,}0104b)]-t*$
$*\ (-0{,}000012b^3+0{,}00072b^2-0{,}016b+0{,}207)$, Н/м;

б) диапазон концентраций $25 < b \le 50$ % мас.

$\sigma\cdot10^3=[74{,}659\cdot\exp(0{,}00000413b^3-0{,}0002b^2+0{,}0104b)]-t*$
$*\ [330119{,}5\ \exp(-0{,}000192b^3+0{,}0257b^2-1{,}135b)]$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $5 \le b \le 30$ % мас.

$Pr=(0{,}03064b^3-0{,}9363b^2+9{,}769b-13{,}9673)\cdot\exp[10^{-5}\cdot t^2(0{,}001492b^3-$
$-0{,}0477b^2+0{,}5547b+9{,}6365)-10^{-3}t(0{,}00214b^3-0{,}04817b^2+0{,}594b+$
$+29{,}3828)]$;

а) диапазон концентраций $30 < b \leq 50$ % мас.

$$Pr=(0{,}009261b^3+0{,}1378b^2-30{,}995b+819{,}482)\cdot\exp[10^{-5}\cdot t^2 * *(0{,}0002742b^3+0{,}01195b^2-2{,}674b+85{,}686)-10^{-3}t(0{,}000461\ b^3+ +0{,}005145b^2-2{,}8677b+130{,}556)].$$

Теплофизические свойства водного раствора сульфата натрия Na_2SO_4

Теплофизические свойства(символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
ρ	кг/м^3	5	1044,2	1036,6	1027,4	1015,7	1002,3	985
		10	1091,5	1082,5	1072,8	1060,9	1047,5	1031
		15	1140,6	1130,8	1120,2	1108,8	1094,6	1078
		20	1191,5	1181,3	1169,6	1156,9	1142,0	1124
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	5	1,120	0,734	0,538	0,411	0,338	0,297
		10	1,264	0,832	0,606	0,465	0,386	0,338
		15	1,512	0,983	0,702	0,534	0,437	0,377
		20	1,907	1,177	0,834	0,621	0,497	0,420
C_P	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$	5	3,63	3,67	3,74	3,91	4,18	4,56
		10	3,53	3,55	3,62	3,76	4,07	4,49
		15	3,46	3,48	3,55	3,68	4,00	4,42
		20	3,41	3,44	3,50	3,64	3,96	4,40
λ	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	5	0,598	0,623	0,646	0,662	0,674	0,683
		10						
		15						
		20						
$\sigma \cdot 10^3$	Н/м	5	73,91	70,64	67,76	64,60	61,50	58,54
		10	75,32	72,05	69,00	66,00	62,90	59,87
		15	76,84	73,63	70,54	67,45	64,37	61,28
		20	78,60	75,40	72,20	69,00	65,80	62,62
Pr	-	5	7,81	4,80	3,35	2,54	2,07	1,85
		10	8,82	5,44	3,79	2,81	2,28	2,04
		15	10,62	6,38	4,38	3,17	2,50	2,23
		20	13,36	7,73	5,24	3,77	2,95	2,55

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора сульфата натрия Na_2SO_4

Диапазон температур $20 \le t \le 120\ ^0C$,
концентраций $5 \le b \le 20$ % мас.

1. Плотность:
$\rho=t^2(0,0000001b^3-0,00001b^2+0,00023b-0,00367)-t(0,0000467b^3-$
$-0,00226b^2+0,04253b+0,0333)+(0,00121b^3-0,0155b^2+9,753b+$
$+1000,53)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:
$\nu\cdot10^6=(0,0001212b^3+0,000353b^2+0,0192b+1,661)\cdot\exp[10^{-9}t^2*$
$*(6,875b^3-215,6b^2+2110,3b+79995,7)-10^{-5}t(0,0472b^3+0,0211b^2-$
$-9,023b+2561,7)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:
$C_P=10^{-7}\cdot t^2(0,1107b^3-6,24b^2+116,03b+678)-10^{-6}t(1,106b^3-69,57b^2+$
$+1383b+1239,8)+(0,0000066b^3-0,00026b^2-0,0071b+3,771)$,
кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:
$\lambda=(-1246,76/t^3)+(165,96/t^2)-(7,995/t)+0,739$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:
$\sigma\cdot10^3=(0,000195b^3-0,00206b^2+0,275b+75,553)-t(0,000003543b^3-$
$-0,00008914b^2+0,0007942b+0,1513)$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:
$Pr=(-0,0002332b^3+0,0423b^2-0,213b+13,50)\cdot\exp[10^{-9}\cdot t^2(-4,164b^3+$
$+182,174b^2-1987,13b+117164)-10^{-6}t(-1,68b^3+72,993b^2-$
$-725,7b+31903)]$.

Теплофизические свойства водного раствора сахарозы $C_{12}H_{22}O_{11}$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, ^{0}C					
			20	40	60	80	100	120
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ	кг/м^3	10	1037,1	1030,6	1020,9	1009,4	995,5	971,1
		20	1080,0	1072,1	1062,6	1050,7	1036,6	1020
		30	1125,8	1117,6	1107,3	1095,1	1081,1	1065
		40	1175,7	1166,8	1156,2	1143,3	1128,5	1111
		50	1228,6	1219,0	1207,9	1195,1	1181,0	1163
		60	1279,4	1269,1	1257,8	1244,9	1231,0	1214
		70	1346,2	1335,3	1323,6	1311,1	1295,9	1279
		75	1378,1	1367,4	1355,6	1342,8	1328,8	1312
$\nu \cdot 10^6$	м^2/с	10	1,446	0,815	0,588	0,446	0,348	0,280
		20	1,812	1,135	0,762	0,560	0,389	0,324
		30	2,850	1,690	1,085	0,776	0,573	0,441
		40	5,282	2,650	1,643	1,093	0,798	0,612
		50	12,640	5,490	3,086	1,915	1,279	1,005
		60	46,060	14,240	7,155	4,183	2,670	1,800
		70	360,27	84,63	28,260	12,503	6,940	4,223
		75	1700,9	278,0	75,98	27,560	13,55	7,622
C_P Дб=92,0	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	10	3,950	3,695	3,981	3,996	4,011	4,026
		20	3,711	3,741	3,771	3,801	3,831	3,862
		30	3,471	3,516	3,562	3,607	3,652	3,697
		40	3,232	3,292	3,352	3,413	3,473	3,533
		50	2,992	3,067	3,143	3,218	3,294	3,369
		60	2,752	2,843	2,933	3,024	3,114	3,205
		70	2,513	2,618	2,724	2,829	2,935	3,041
		75	2,393	2,506	2,619	2,732	2,845	2,958

1	2	3	4	5	6	7	8	9
λ	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	10	0,567	0,606	0,631	0,645	0,652	0,653
		20	0,535	0,575	0,601	0,614	0,619	0,621
		30	0,501	0,541	0,565	0,577	0,584	0,585
		40	0,463	0,501	0,524	0,535	0,5366	0,537
		50	0,423	0,457	0,475	0,482	0,4836	0,484
		60	0,369	0,406	0,421	0,423	0,419	0,412
		70	0,332	0,365	0,378	0,370	0,357	0,343
		75	0,312	0,344	0,356	0,346	0,328	0,308
$\sigma \cdot 10^3$ Дб=92,0	Н/м	10	66,144	64,104	62,064	60,024	57,984	55,944
		20	68,184	66,144	64,104	62,064	60,024	57,984
		30	70,224	68,184	66,144	64,104	62,064	60,024
		40	72,264	70,224	68,184	66,144	64,104	62,064
		50	74,304	72,264	70,224	68,184	66,144	64,104
		60	76,344	74,304	72,264	70,224	68,184	66,144
		70	78,384	76,344	74,304	72,264	70,264	68,184
		75	79,404	77,364	75,324	73,324	71,244	69,204
Pr	-	10	10,44	5,50	3,79	2,79	2,174	1,706
		20	13,55	7,84	5,09	3,60	2,45	2,05
		30	22,25	12,32	7,59	5,31	3,884	2,97
		40	43,35	19,89	12,15	7,98	5,86	4,47
		50	109,92	43,278	24,68	15,35	10,31	8,145
		60	439,5	122,82	62,70	37,30	24,40	17,15
		70	3671,1	810,5	270,23	121,80	74,0	43,30
		75	17978,2	2768	762,0	291,3	155,7	95,31

Формулы для определения теплофизических свойств водного раствора сахарозы $C_{12}H_{22}O_{11}$

Диапазон температур $20 \le t \le 120$ ^{0}C,
концентраций $10 \le b \le 60$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 40$ % мас. (% СВ)

$\rho=-10^{-3} \cdot t^2(0,0001375b^3-0,009736b^2+0,1882b+1,9139)-t*$
$*(-0,0000141b^3+0,0009926b^2-0,01667b+0,2483)+(-$
$0,0000992b^3+0,02348b^2+3,7063b+1002,42)$, кг/м^3;

б) диапазон концентраций $40 < b \le 60$ % мас. (% СВ)
$\rho=-10^{-3}\cdot t^2(-0{,}0000128b^3+0{,}00131b^2-0{,}0696b+4{,}1824)-t*$
$(-0{,}00000149b^3+0{,}0002632b^2-0{,}009445b+0{,}317)+(-0{,}01498b^3+$
$+2{,}2369b^2-104{,}573b+2744{,}383)$, кг/м^3;

в) диапазон концентраций $60 < b \le 75$ % мас. (% СВ)
$\rho=-10^{-3}\cdot t^2(-0{,}0000159b^3-0{,}00232b^2+0{,}5206b-17{,}494)-t*$
$*(0{,}00000244b^3+0{,}0000368b^2-0{,}03634b+1{,}8974)+(0{,}003159b^3-$
$-0{,}6541b^2+51{,}557b-133{,}638)$, кг/м^3.

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 40$ % мас. (% СВ)
$\nu\cdot10^6=(0{,}0004193b^3-0{,}01254b^2+0{,}0744b+3{,}1869)\cdot\exp[10^{-9}t^3 *$
$* (0{,}2508b^3-23{,}4265b^2+653{,}135b-5721{,}48)+10^{-5}t^2(-0{,}005403b^3+$
$+0{,}5187b^2-14{,}665b+136{,}556)-10^{-3}t(-0{,}003097b^3+0{,}3166b^2-$
$-9{,}116b+107{,}826)]$, м^2/с;

б) диапазон концентраций $40 < b \le 60$ % мас. (% СВ)
$\nu\cdot10^6=[0{,}09397\cdot\exp(0{,}00007913b^3-0{,}007535b^2+0{,}298b)] *$
$*\exp[10^{-9}t^3 (-0{,}1064b^3+5{,}8416b^2+130{,}466b-8780{,}76)+10^{-5}t^2(0{,}002981b^3-0{,}2268b^2+2{,}4722b+107{,}23)-10^{-3}t(0{,}001451b^3-$
$-0{,}06678b^2-1{,}9961b+145{,}41)]$, м^2/с;

в) диапазон концентраций $60 < b \le 75$ % мас. (% СВ)
$\nu\cdot10^6=[12{,}199\cdot10^{16}\cdot\exp(0{,}01136b^2-1{,}24584b)]\cdot\exp[10^{-9}t^3*$
$*(-0{,}0616b^3-3{,}4624b^2+1365{,}805b-59093{,}3)+10^{-5}t^2(0{,}001454b^3+$
$+0{,}07861b^2-30{,}596b+1321{,}945)-10^{-3}t(0{,}001366b^3+0{,}01778b^2-$
$-18{,}843b+870{,}03)]$, м^2/с.

3. Изобарная теплоемкость:

диапазон концентраций $10 \le b \le 75$ % мас. (% СВ)
$C_P=4{,}19-[2{,}51-0{,}00754t+0{,}00461(100-Дб)]\cdot b\cdot10^{-2}$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 30$ % мас. (% СВ)

$\lambda=t^{-3}(0{,}01209b^3-3{,}7914b^2+127{,}88b+1061{,}37)-t^{-2}(-0{,}0006040b^3-$
$-0{,}2214b^2+9{,}2672b+61{,}664)+t^{-1}(-0{,}00009051b^3-0{,}0002939b^2+$
$+0{,}1343b-1{,}5328)+(-0{,}000006771b^3+0{,}0004208b^2-0{,}0115b+$
$+0{,}7445)$, Вт/(м·К);

б) диапазон концентраций $30 < b \le 50$ % мас. (% СВ)

$\lambda=t^{-3}(-0{,}07151b^3-2{,}207b^2+551{,}67b-10821{,}1)-t^{-2}(-0{,}005469b^3-$
$-0{,}2432b^2+49{,}324b-989{,}09)+t^{-1}(-0{,}0001244b^3-0{,}004984b^2+$
$+1{,}1422b-26{,}634)+(0{,}000002619b^3-0{,}0002287b^2-0{,}0005355b+$
$+0{,}7466)$, Вт/(м·К);

в) диапазон концентраций $50 < b \le 75$ % мас. (% СВ)

$\lambda=t^{-3}(0{,}100535b^3-12{,}9143b^2+783{,}481b-17149{,}0)-t^{-2}(0{,}0078183b^3-$
$-0{,}9589b^2+60{,}6772b-1428{,}54)+t^{-1}(0{,}000080597b^3-0{,}002188b^2+$
$+0{,}25746b-15{,}0125)+(-0{,}00000279b^3+0{,}0001729b^2-0{,}01915b+$
$+1{,}1601)$, Вт/(м·К).

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

диапазон концентраций $10 \le b \le 75$ % мас. (% СВ)

$\sigma\cdot10^3=0{,}204b-0{,}102t+0{,}382\cdot Дб+31{,}0$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \le b \le 40$ % мас. (% СВ)

$Pr=(0{,}0046512b^3-0{,}171b^2+1{,}9392b+17{,}4776)\cdot\exp[10^{-7}t^3*$
$*(0{,}0022536\ b^3-0{,}2136b^2+5{,}97506b-53{,}9802)+10^{-5}t^2(-0{,}0049112*$
$*b^3+0{,}4793b^2-13{,}595b+132{,}2833)-10^{-3}t(-0{,}0028303b^3+0{,}29503b^2-$
$-8{,}5187b+108{,}8163)]$;

б) диапазон концентраций $40 < b \le 60$ % мас. (% СВ)

$Pr=[1340015{,}3\cdot\exp(-0{,}00003559b^3+0{,}01002b^2-0{,}57698b)*$
$*\exp[10^{-7}t^3\ (321{,}933\cdot\exp(0{,}00005756b^3-0{,}003609b^2-0{,}0288b))+$
$+10^{-5}t^2(0{,}002679b^3-0{,}1705b^2-0{,}6828b+169{,}7434)-10^{-3}t*$
$*(0{,}00060728b^3+\ 0{,}07003b^2-9{,}1832b+274{,}9923)]$;

в) диапазон концентраций $60 < b \leq 75$ % мас. (% СВ)

$$Pr=[25{,}18718\cdot10^{10}\cdot\exp(0{,}00004838b^3+0{,}0014888b^2-0{,}5699b)\ *$$
$$*\exp[10^{-7}t^3(-0{,}0006013b^3-0{,}03949b^2+14{,}0609b-604{,}258)+$$
$$+10^{-5}t^2(0{,}0015739b^3+0{,}056377b^2-29{,}034b+1292{,}782)-10^{-3}t*$$
$$*(0{,}0010335b^3+0{,}08717b^2-23{,}5574b+983{,}666)].$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие содержит все необходимые данные для самостоятельного изучения раздела «Выпаривание и выпарные аппараты». В полной мере приводятся теоретические сведения о процессе выпаривания, о его аппаратном оформлении. Приводятся чертежи и схемы как самих выпарных аппаратов так и многоступенчатых выпарных установок. В достаточной степени рассматривается вопрос о тепловом, механическом и гидравлическом расчетах выпарных аппаратов. Приводятся справочные данные по основным используемым в промышленности растворам.

Последовательное изложение учебного материала от теоретических основ к практическим расчетам должно существенно восполнить недостаток учебной и технической литературы по данному вопросу.

Учебное пособие используется при выполнении курсового проекта по дисциплине «Тепломассообменное оборудование предприятий» студентами специальности 140.104 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной формы обучения. Полностью приводятся справочные данные, что позволяет обойтись без использования специализированной литературы.

Учебное пособие рекомендуется также для инженерно-технических работников, занятых проектированием и исследованием выпарных установок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колач Т.Н., Радун Д.В. Выпарные станции. - М.: Машгиз, 1963.

2. Перри Дж. Справочник инженера-химика. – Л.: Химия, 1969, т.1.

3. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980.

4. Майоров В.В. Таблицы и формулы теплофизических свойств воздуха, воды и водяных растворов некоторых неорганических и органических веществ. – Воронеж: ВПИ, 1980.

5. Круглый С.М. Распределение выпариваемой воды по корпусам многокорпусной выпарной установки. – Химическая промышленность, 1959, № 4, с. 57-60.

6. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М. : Энергия 1972.

7. Теплотехническое оборудование и теплоснабжение промышленных предприятий. – Под ред. Б.Н. Голубкова. – М.: Энергия, 1979.

8. Майоров В.В. Конструктивный расчет рекуперативных теплообменных аппаратов непрерывного действия. – Воронеж: ВПИ, 1978.

9. РТМ 26-01-104-77. Аппараты выпарные с естественной циркуляцией и кипением раствора в трубах. Метод теплового и гидравлического расчета. – Харьков: НИИхиммаш, 1977.

10. Выпарные трубчатые стальные аппараты общего назначения. – М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1979.

11. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1979.

12. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1980.

13. Гельперин Н.И. Выпарные аппараты. – М.: Химиздат, 1947.

14. Машины и аппараты химических производств. /Под ред. И.И. Чернобыльского. – М.: Машиностроение, 1975.

15. Майоров В.В. Промышленные поверхностные выпарные аппараты.

16. РТМ-26-01-54-72. Аппараты выпарные трубчатые с принудительной циркуляцией раствора. Методы тепловых и гидромеханических расчетов. – М.: Минхимнефтемаш, 1972.

17. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.-Л.: ГЭИ, 1959.

18. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.- Л.: ГЭИ, 1960.

19. Кувшинский М.Н., Соболева А.П. Курсовое проектирование по предмету "Процессы и аппараты химической промышленности". – М.: Высшая школа, 1980,

20. Справочник химика. – М.-Л. Химия, 1968, т.У.

21. Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции. – М.Л.: ГЭИ, 1959.

22. Паровые котлы, сосуды и паротрубопроводы. Сборник официальных материалов. – Киев: Техника, 1972.

23. ВНИИТМ. Насосы. Каталог-справочник. – М.: Машгиз, 1959.

24. Альперт Л.З. Основы проектирования химических установок. – М.: Энергия, 1973.

25. Расчет и конструирования трубопроводов. Справочное пособие / Под ред. Б.В. Зверькова. – Л.: Машиностроение, 1979.

26. Бакластов А.М. и др. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассобменных установок: Учеб. пособие для вузов /Под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоиздат, 1981.

27. Чернобыльский И.И. Выпарные установки. – Киев: КГУ, 1960.

28. Григорьевич В.А. и др. Краткий справочник по теплообменным аппаратам. – М. –Л.: 1962.

29. Лебедев П.Д., Щукин А.А. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1970.

30. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1981.

31. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. – Л.: Химия, 1977.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
1. Последовательность проектирования многоступенчатой выпарной установки 4
2. Классификация и выбор МВУ 7
2.1. Выбор числа ступеней выпаривания 12
3. Выбор типа выпарных аппаратов 17
4. Методика проведения теплового расчета выпарной установки 29
4.1. Определение расхода пара на предварительный подогрев начального раствора 29
4.2. Последовательность теплового расчета МВУ 32
4.2.1. Распределение выпариваемой воды по ступеням МВУ 32
4.2.2. Концентрация раствора и давление пара по ступеням МВУ 34
4.2.3. Определение полезного перепада температур на МВУ 36
4.2.4. Предварительное распределение полезной разности температур по ступеням МВУ 39
4.2.5. Определение коэффициентов теплопередачи в выпарных аппаратах МВУ 43
4.2.5.1. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора 46
4.2.5.2. Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора 61
4.2.6. Определение расхода пара на первую ступень МВУ 71
4.2.7. Уточнение величины полезной разности температур по ступеням МВУ 91
4.2.8. Поверхность теплообмена выпарных аппаратов 95
4.2.8.1. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора 95

4.2.8.2. Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора 98
5. Оптимизация выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией раствора 101
6. Гидравлический расчет выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией раствора 105
7. Конструктивный расчет выпарных аппаратов 117
7.1. Паровая греющая камера 117
7.2. Пространство вторичного пара 120
7.3. Штуцеры и трубопроводы 123
7.4. Тепловая изоляция выпарных аппаратов 124
8. Вспомогательное оборудование МВУ 126
Приложение 1 128
Приложение 2 131
Заключение 183
Библиографический список 184