

В.В. Майоров
В.В. Портнов

**МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ
ВЫПАРНЫЕ УСТАНОВКИ**

Учебное пособие

Воронеж 2008

ГОУВПО

«Воронежский государственный технический
университет»

В.В. Портнов

**МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ВЫПАРНЫЕ
УСТАНОВКИ**

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2008

УДК 621.1.016

Портнов В.В. Многоступенчатые выпарные установки: учеб. пособие / В.В. Портнов. В.В. Майоров. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. 173 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы выбора оптимального числа ступеней МВУ, теплового расчета МВУ трех типов, теплового и гидравлического расчетов выпарных аппаратов, вопросы оптимизации процесса выпаривания с применением ЭВМ.

Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 140100 «Теплоэнергетика», специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика», дисциплины «Тепломассообменное оборудование предприятий».

Предназначено для студентов очной формы обучения.

Табл. 32. Ил. 19. Библиогр.: 24 назв.

Научный редактор канд. техн. наук, доц. В.Ю. Дубанин

Рецензенты: кафедра промышленной энергетики
Воронежской государственной
технологической академии (зав. кафедрой
д-р техн. наук, проф. В.В. Шитов);
д-р техн. наук, проф. Н.В. Мозговой

© Портнов В.В., Майоров В.В., 2008

© Оформление. ГОУВПО «Воронежский
государственный технический
университет», 2008

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» раздел «Выпарные установки». Пособие рекомендуется для выполнения курсового проекта по данной дисциплине и в процессе дипломного проектирования.

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ (МВУ)

1.1 Основные элементы 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.

На рисунке 1 приведена схема прямоточной четырехступенчатой выпарной установки с барометрическим конденсатором, каскадным сливом конденсата и дополнительным источником тепла. На рисунке обозначены: 1, 2, 3, 4 – соответственно первая, вторая, третья и четвертая ступени МВУ, 5-7 – устройства для сбора конденсата (конденсатные «горшки»), 8 – барометрический конденсатор. Потоки: А – греющий пар, Б – исходный («слабый») раствор, В – дополнительный источник пара невысоких параметров («мятый» пар), Г, Д, Е, Ж – вторичный пар 1, 2, 3, 4 ступени соответственно, З, И, К – отбор пара на технологические нужды («экстрапар»), Л, М, Н – концентрированный раствор на выходе из каждой ступени (исходный для последующей ступени), О – концентрированный («крепкий», «сгущенный») раствор на выходе из МВУ, П, Р, С, Т – конденсат греющего пара соответствующей ступени, У – охлаждающая вода, Ф – сбросная вода.

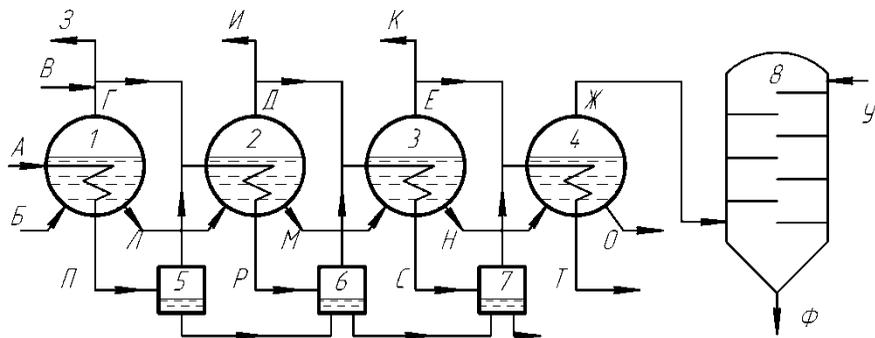


Рис. 1. Четырехступенчатая прямоточная выпарная установка с отбором экстрапара, двумя источниками тепла, каскадным переливом конденсата и барометрическим конденсатором

1.2 Исходные данные для расчета

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 концентрации раствора b_H и b_K .

4. Температуру раствора, поступающего в I ступень МВУ, ϑ_0 .

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

1. Давление и температура греющего пара, поступающего на МВУ, 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.

1.3 Последовательность расчетов при проектировании МВУ

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_1 , кг/с, 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.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ ВЫПАРИВАНИЯ

С учетом потерь тепла расход греющего пара D , кг/с, в установке со n ступенями приближенно определяется по формуле

$$D = \frac{W}{0,85 \cdot n}, \quad (1)$$

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

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 $n_{\text{ОПТ}}$ ориентировочно можно определять по формуле

$$n_{\text{ОПТ}} = 60 \cdot \left[\frac{k_n \cdot (t_1 - \vartheta_n)}{A \cdot \chi \cdot \left[(i''_{\text{ВП},n} - i'_{\text{П},n}) - \frac{G_{\text{H}} \cdot c_0}{W} (\vartheta_0 - \vartheta_n) \right]} \times \left[\frac{B}{0,85} + \frac{C \cdot i''_{\text{ВП},n}}{c_B \cdot (t''_B - t'_B)} \right] \right]^{0,5} \quad (2)$$

где K_n - коэффициент теплопередачи в последней ступени выпарной установки, Вт/(м²·К); на рисунке 2 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 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;

$i''_{ВП,n}$ - 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;

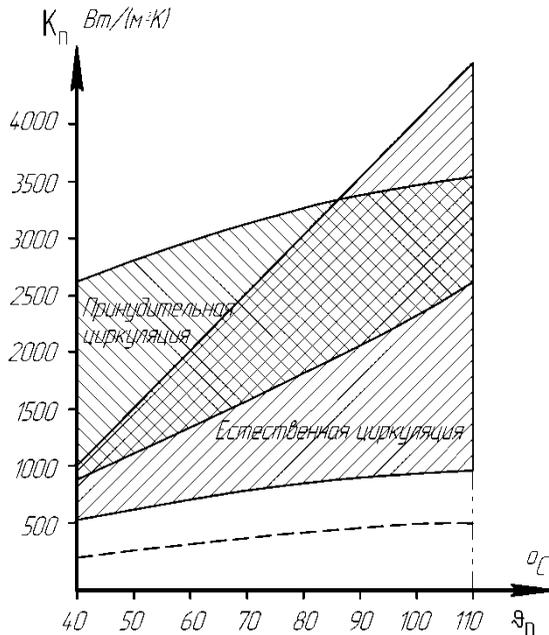


Рис. 2. Пределы изменения коэффициентов теплопередачи для вертикальных выпарных аппаратов с естественной и принудительной циркуляцией

б) из Приложения 1 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 $(\Delta_1)_n$, °С,:

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

где Γ_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 Γ_n по формуле (3);

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, °С, определяется по соотношению:

$$\vartheta_n = t_k + (\Delta_1)_n + (\Delta_2)_n \quad (4)$$

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 ; **в случае противоточной схемы МВУ** C_n выбирается по его **начальной** концентрации b_n и температуре ϑ_n ;

ж) определяется энтальпия кипящего раствора, Дж/ кг :

$$i'_{P,n} = c_n \cdot \vartheta_n, \quad (5)$$

ϑ_0 - температура раствора, подаваемого в первую ступень установки, °С;

в прямоточных МВУ с достаточной степенью точности можно принимать $\vartheta_0 = t_1 - (6..10)$;

в противоточной МВУ раствор в первую ступень подается из второй ступени установки с температурой ниже температуры кипения раствора в первой ступени, поэтому принимаем температуру кипения раствора в первой ступени на 8..12 °С ниже температуры насыщения греющего пара на входе в установку, тогда

$$t_{н1} = t_1' - (8..12) \text{ } ^\circ\text{C};$$

G_H - расход начального «слабого» раствора на установку, кг/с;

C_0 - теплоемкость начального раствора, Дж/(кг·К). Определяется из Приложения 2 по концентрации b_H и температуре ϑ_0 раствора, подаваемого в МВУ;

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

t_B' - начальная температура охлаждающей воды, °С; t_B'' - конечная температура охлаждающей воды, °С; обычное значение $t_B' = 15..25 \text{ } ^\circ\text{C}$;

разница между температурами конденсации вторичного пара и уходящей воды составляет в противоточных конденсаторах $\delta = t_k - t_B'' = 1..3 \text{ } ^\circ\text{C}$, а в прямоточных $\delta = 5..6 \text{ } ^\circ\text{C}$; после конденсатора в естественные водо-

емы рекомендуется сбрасывать воду с температурой не более 60 °С;

А – стоимость обслуживания, ремонта и автоматизации 1 м² поверхности теплообмена МВУ, руб/(м² · 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 $\Delta t_{\text{ПОЛ}}$, а с увеличением числа ступеней МВУ эта величина на каждую ступень уменьшается.

После определения оптимального количества ступеней выпаривания рекомендуется проверить полезную разность температур, приходящуюся на одну ступень МВУ, исходя из следующих рекомендаций. При выпаривания растворов с вязкостью до 0,002 Па·с в аппаратах с естественной циркуляцией $\Delta t_{\text{ПОЛ}}$ на ступень должен составлять 10..15 °С, при увеличении вязкости до 0,005 Па·с $\Delta t_{\text{ПОЛ}}$ увеличивается на 7..9 °С. В аппаратах с принудительной циркуляцией минимальная $\Delta t_{\text{ПОЛ}}$ может быть равной 6..8 °С на ступень. При необходимости – количество ступеней уменьшить.

3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МВУ

3.1. Распределение выпариваемой воды по ступеням МВУ

Количество воды, кг/с, которое необходимо удалить из раствора на МВУ (производительность МВУ по вторичным парам) определяется из соотношения

$$W = G_H \left(1 - \frac{b_H}{b_K}\right). \quad (6)$$

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

$$\alpha = \sqrt[n]{\frac{\Gamma_{ГР}}{\Gamma_{ВП,n}}}, \quad (7)$$

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

$\Gamma_{ВП,n}$ - 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

$$\beta = \frac{\Delta t_{\text{ЭФ}} \cdot c_{\text{СР}}}{r_{\text{СР}} (n-1)} \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{ЭФ}} = \frac{n-1}{n} (t_1 - t_K)$;

t_1 - температура насыщения греющего пара, °С;

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

$c_{\text{СР}} = 0,5 (c_0 + c_K)$ – средняя теплоемкость раствора в установке, кДж/(кг·К);

c_0 и c_K - соответственно начальная и конечная теплоемкости выпариваемого раствора, определяемые по его концентрации и температуре на входе и выходе из МВУ;

$r_{\text{СР}} = 0,5 (r_{\text{ГР}} + r_{\text{ВП},n})$ - 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 выпариваемой в первой ступени воды w_1 , кг/с,:

$$\left. \begin{aligned} w_2 &= (w_1 - E_1)\alpha + (G_H - w_1)\beta \\ w_3 &= (w_2 - E_2)\alpha + (G_H - w_1 - w_2)\beta \\ w_n &= (w_{n-1} - E_{n-1})\alpha + (G_H - w_1 - w_2 - \dots - w_{n-1})\beta \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где E_1, E_2, \dots, E_{n-1} - количество вторичного пара, отбираемого из МВУ на производственные нужды («экстрапар»), кг/с.

Если в какой-то i -й ступени пароотбора нет, то соответственно $E_i = 0$. Для получения однозначного решения системы используется уравнение

$$w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = W, \quad (10)$$

по которому потом производится проверка правильности полученного решения.

Все уравнения системы (9) в правой части преобразуются в функции количества воды W_1 , т.е. $w_2 = f(w_1)$, $w_3 = f(w_1)$ и т.д. Решая систему любым математическим способом, получают количество воды, выпариваемое в каждой ступени.

3.2. Концентрация раствора и давление пара по ступеням МВУ

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

$$\left. \begin{array}{l} \text{из I во II - ю} \quad G_1 = G_H - w_1, \\ \text{из II в III - ю} \quad G_2 = G_1 - w_2, \\ \text{из III в IV - ю} \quad G_3 = G_2 - w_3, \\ \text{из } n-1 \text{ в } n - \text{ю} \quad G_{n-1} = G_{n-2} - w_{n-1}. \end{array} \right\} \quad (11)$$

Концентрация выпариваемого раствора на выходе из ступени, % масс, определяется по уравнениям:

$$b_1 = \frac{G_H \cdot b_H}{G_H - w_1} ;$$

$$b_2 = \frac{G_H \cdot b_H}{G_H - w_1 - w_2} ;$$

$$b_3 = \frac{G_H \cdot b_H}{G_H - w_1 - w_2 - w_3} .$$

Для произвольной ступени МВУ из n ступеней формула принимает следующий вид:

$$b_n = \frac{G_H \cdot b_H}{G_H - w_1 - w_2 - w_3 - \dots - w_n} . \quad (12)$$

Общий перепад давления в МВУ, бар, определяется как

$$\Delta P = P_1 - P_K , \quad (13)$$

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

$$\Delta p_i = \frac{\Delta P}{n} . \quad (14)$$

Тогда давление вторичного пара, бар, в паровом пространстве аппаратов составит:

$$\text{I-я ступень: } P_1 = P_1 - \Delta p_i ;$$

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

III-я ступень: $P_{III} = P_{II} - \Delta p_i$ и т. д.

3.3. Определение полезного перепада температур на МВУ

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

$$\Delta'_1 = \omega \cdot \Delta_1 \quad (15)$$

где Δ_1 - значение температурной депрессии при атмосферном давлении; табличные значения Δ_1 в зависимости от концентрации заданного раствора можно получить из справочников [1,4,6,7,II,III,IV,27,30] или из Приложения 1;

для прямоточных аппаратов расчет теплофизических свойств раствора ведут по средней концентрации раствора в аппарате, % масс:

$$b_{CP} = 0,5 \cdot (b_{i,ВХ} + b_{i,ВЫХ}) ;$$

при определении Δ_1 в выпарных аппаратах в качестве определяющей принимают концентрацию раствора на выходе из аппарата;

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

$$\omega = 0,01622 \cdot \frac{T^2}{r} \quad (16)$$

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

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

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

1. Определяем дополнительное гидростатическое давление, Па в кипяtilьной трубке за счет слоя кипящей жидкости

$$\Delta p = 0,5 \cdot H_K \cdot g \cdot \rho_P \quad (17)$$

где H_K - величина “кажушегося” уровня раствора в аппарате, м; H_K рекомендуется принимать в зависимости от свойств раствора от 0,3 до 0,8 высоты кипяtilьных трубок; меньшие значения принимаются для первых ступеней, большие – для последних;

ρ_P - плотность раствора в аппарате, кг/м³. Определяется по концентрации и ориентировочной температуре кипения раствора в данной ступени из [4]; ориентировочную среднюю температуру кипения раствора в ступени получаем путем равного распределения общего перепада температур на МВУ на каждую ступень;

g - ускорение свободного падения, $g=9,81$ м/с².

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

2. Определяется действительное давление, Па, на середине высоты слоя кипящего раствора в трубках

$$P_{\Gamma} = P_{BT} + \Delta p \quad (18)$$

где P_{BT} - давление вторичного пара в сепараторе выпарного аппарата, Па; определяется из п. 3.2.

По вычисленному действительному давлению P_{Γ} из [3,4] находят температуру насыщения t_{Γ} , °С. Соответственно по давлению P_{BT} из [3,4] также определяем температуру насыщения при отсутствии гидростатического эффекта t_{BT} , °С. Теперь гидростатическую температурную депрессию, °С, можно вычислить по формуле

$$\Delta_2 = t_{\Gamma} - t_{BT}. \quad (19)$$

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 (17), (18)

и (19). 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 $\Delta_3 = 1$.

Общий температурный перепад на МВУ, °С:

$$\Delta t_{\text{ОБЩ}} = t_1 - t_{\text{К}} \quad (20)$$

где $t_{\text{К}}$ - температура конденсации вторичного пара последней ступени, °С.

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

$$\Delta t_{\text{ПОЛ}} = \Delta t_{\text{ОБЩ}} - \left(\sum_1^n \Delta'_1 + \sum_1^n \Delta_2 + \sum_1^{n-1} \Delta_3 \right) \quad (21)$$

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.

3.4. Предварительное распределение полезной разности температур по ступеням МВУ

По опытным данным предварительно задаются соотношением коэффициентов теплопередачи k_1 в ступенях МВУ. Рекомендуются следующие соотношения для установок с аппаратами естественной циркуляции раствора:

Прямоточная МВУ:

2 ступени $k_1 : k_2 = a_1 : a_2 = 1 : 0,6$

3 ступени $k_1 : k_2 : k_3 = a_1 : a_2 : a_3 = 1 : 0,7 : 0,4$

4 ступени $k_1 : k_2 : k_3 : k_4 = a_1 : a_2 : a_3 : a_4 = 1 : 0,8 : 0,55 : 0,3$

Противоточная МВУ:

2 ступени $k_1 : k_2 = a_1 : a_2 = 1 : 0,67$

3 ступени $k_1 : k_2 : k_3 = a_1 : a_2 : a_3 = 1 : 0,97 : 0,88$

$$4 \text{ ступени} \quad k_1 : k_2 : k_3 : k_4 = a_1 : a_2 : a_3 : a_4 = 1 : 0,95 : 0,88 : 0,84$$

МВУ с параллельным питанием ступеней раствором:

$$2 \text{ ступени} \quad k_1 : k_2 = a_1 : a_2 = 1 : 0,92$$

$$3 \text{ ступени} \quad k_1 : k_2 : k_3 = a_1 : a_2 : a_3 = 1 : 0,95 : 0,91$$

$$4 \text{ ступени} \quad k_1 : k_2 : k_3 : k_4 = a_1 : a_2 : a_3 : a_4 = 1 : 0,95 : 0,89 : 0,85$$

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

$$2 \text{ ступени} \quad k_1 : k_2 = a_1 : a_2 = 1 : 0,85$$

$$3 \text{ ступени} \quad k_1 : k_2 : k_3 = a_1 : a_2 : a_3 = 1 : 0,9 : 0,8$$

$$4 \text{ ступени} \quad k_1 : k_2 : k_3 : k_4 = a_1 : a_2 : a_3 : a_4 = 1 : 0,95 : 0,85 : 0,8$$

Указанные рекомендации являются ориентировочными и не всегда оправдываются на практике. В дальнейших расчетах значения коэффициентов теплопередачи и их соотношения уточняются. Для МВУ с 5 и более ступенями ряд соотношений коэффициентов теплопередачи допускается расширять экстраполяцией.

Далее проводится предварительное распределение полезной разности температур, полагая, что тепловые нагрузки ступеней МВУ пропорциональны количеству выпариваемой в них воды, т.е. $Q_i \equiv W_i$.

Распределение полезной разности температур может быть выполнено различным образом:

- с целью получения одинаковых поверхностей теплообмена аппаратов в каждой ступени МВУ, т.е. чтобы

$$F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_n.$$

В этом случае Δt_i для каждой ступени определяется по формуле, °С:

$$\Delta t_i = \Delta t_{\text{ПОЛ}} \frac{\frac{w_i}{a_i}}{\sum_1^n \frac{w}{a}}, \quad (22)$$

где
$$\sum_1^n \left(\frac{w}{a} \right) = \frac{w_1}{a_1} + \frac{w_2}{a_2} + \frac{w_3}{a_3} + \dots + \frac{w_n}{a_n} .$$

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

$$F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n \Rightarrow \min .$$

В этом случае

$$\Delta t_i = \Delta t_{\text{ПОЛ}} \frac{\left(\frac{w_i}{a_i} \right)^{0,5}}{\sum_1^n \left(\frac{w}{a} \right)^{0,5}}, \quad (23)$$

где

$$\sum_1^n \left(\frac{w}{a} \right)^{0,5} = \left(\frac{w_1}{a_1} \right)^{0,5} + \left(\frac{w_2}{a_2} \right)^{0,5} + \left(\frac{w_3}{a_3} \right)^{0,5} + \dots + \left(\frac{w_n}{a_n} \right)^{0,5}$$

В обоих случаях необходимо сделать проверку полученных результатов по формуле

$$\Delta t_{\text{ПОЛ}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n.$$

Выбор варианта распределения разности температур по ступеням для вышеперечисленных случаев – согласно заданию на проект или на выбор проектирующего.

По полученным выше данным составляют табл.1 температурного режима первого варианта работы МВУ и уточняют величины принятых ранее (3.2) давлений вторичного пара.

1. Температура кипения раствора в I ступени, °С:

$$\vartheta_1 = t_1 - \Delta t_1$$

2. Температура вторичного пара I ступени, °С:

$$\tau_1 = \vartheta_1 - (\Delta'_1)_1 - (\Delta_2)_1$$

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

4. Температура греющего пара II ступени, °С:

$$t_2 = \tau_1 - (\Delta_3)_1.$$

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

6. Температура кипения раствора во II ступени, °С:

$$\vartheta_2 = t_2 - \Delta t_2.$$

7. Температура вторичного пара второй ступени, °С:

$$\tau_2 = \vartheta_2 - (\Delta'_1)_2 - (\Delta_2)_2.$$

8. По найденной температуре τ_2 из [3] определяется давление вторичного пара во II ступени P_2 , бар, и так далее для всех ступеней МВУ.

В конце расчета определяются температура конденсации t_K вторичного пара в конденсаторе $t_K = \tau_n - (\Delta_3)_n$, где t_K должно соответствовать заданному давлению вторичного пара за последней ступенью МВУ.

Предварительно найденные и уточненные величины давлений и температур вторичного пара по всем ступеням МВУ не должны отличаться на величину свыше 5 %. При значительном расхождении расчет проводится методом последовательных приближений. При этом в качестве исходных принимаются уточненные величины температур и давлений. Получение точного расчета связано с постоянным определением значений физико-химической температурной депрессии во всех ступенях установки.

На базе заданных величин и вычисленных температур составляется таблица 1.

Ориентировочно температура конденсата греющего пара каждой ступени, °С, определяется по соотношению

$$t_{\text{конд},i} = t_i - 2. \quad (24)$$

Таблица 1

Распределение температуры по ступеням МВУ

Наименование параметров	Обозначение	Размерность	Номера ступеней		
			1	2	3
Температура греющего пара	t	$^{\circ}\text{C}$			
Температура кипения раствора	ϑ	$^{\circ}\text{C}$			
Температурные депрессии	Δ'_1	$^{\circ}\text{C}$			
	Δ_2				
	Δ_3				
Температура вторичного пара	τ	$^{\circ}\text{C}$			
Температура конденсата греющего пара	$t_{\text{конд}}$	$^{\circ}\text{C}$			
Энтальпия греющего пара	i'	кДж/кг			
Энтальпия вторичного пара	i''	кДж/кг			

3.5. Определение коэффициентов теплопередачи в выпарных аппаратах МВУ

Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, в выпарных аппаратах с цилиндрическими кипяtilьными трубками, тол-

щина стенок которых не более 2,5..3 мм, можно рассчитывать по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{ЗАГ} + R_{ОКС}}, \quad (25)$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к наружной стенке трубы, Вт/(м²·К);

α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к выпариваемому раствору, Вт/(м²·К);

$\delta_{СТ}$ - толщина стенки кипятильной трубы, м;

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

$R_{ЗАГ}$ - термическое сопротивление загрязнений с обеих сторон кипятильной трубы, (м²·К)/Вт; значение $R_{ЗАГ}$ 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 $R_{ЗАГ}$ вычисляют по формуле

$$R_{ЗАГ} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad (26)$$

$R_{ОКС}$ - термическое сопротивление оксидной пленки, (м²·К)/Вт, (учитывается только для труб из углеродистой стали).

Часто расчетный коэффициент теплопередачи вычисляют по формуле

$$K_{\text{РАСЧ}} = K_{\text{ТЕОР}} \cdot \psi, \quad (27)$$

где $K_{\text{ТЕОР}}$ - коэффициент теплопередачи, найденный по формуле (25) в случае $R_{\text{ЗАГ}} = 0$, («теоретический»); ψ - поправочный коэффициент на загрязнение, величина которого находится в пределах от 0,7 до 0,9 в зависимости от количества отложений и их теплопроводности.

3.5.1. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора

При кипении раствора, движущегося внутри трубы, удобно условное разделение всей длины трубы на две зоны теплообмена и гидродинамики:

- 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 - так называемая конвективная зона;
- зона развитого кипения.

Согласно методике расчета теплопередачи при пузырьковом кипении в трубе [9] рекомендуется следующий порядок расчетов:

I. Выбирают отношение площади сечения обратной циркуляционной трубы выпарного аппарата $f_{\text{Ц}}$, к площади

поперечного сечения трубного пучка f_0 . Рекомендуется $f_{Ц} / f_0 = 0,1..0,4$.

2. Определяют размер, пропорциональный отрывному диаметру парового пузыря, м:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_P - \rho_{ВП})}}, \quad (28)$$

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

ρ_P - плотность раствора, кг/м³; определяется по концентрации и температуре раствора из [4] или по Приложению;

$\rho_{ВП}$ - плотность вторичного пара, кг/м³; определяется по давлению вторичного пара из [3];

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

3. Определяют критерий Прандтля для раствора по формуле:

$$Pr_P = \frac{c_P \cdot \mu_P}{\lambda_P}, \quad (29)$$

где c_P - изобарная теплоемкость раствора, Дж/(кг·К);

μ_P - динамический коэффициент вязкости раствора, Па·с;

λ_P - теплопроводность раствора, Вт/(м·К).

Указанные теплофизические свойства и критерий Прандтля определяют по средней концентрации и температуре раствора в данной ступени по Приложению 2.

5. Кратностью циркуляции n называют отношение количества раствора, кг/с, циркулирующего в контуре выпарного аппарата, к паропроизводительности аппарата W , кг/с. Определяется по формуле:

$$n = C \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0,32} \cdot \left(\frac{f_{Ц}}{f_0}\right)^{0,29} \cdot \left(\frac{\mu_{ВП}}{\mu_P}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_P}{\rho_{ВП}}\right)^{0,27} \times \\ \times \left(\frac{\delta}{d}\right)^{0,52} \cdot Pr_P^{0,41} \cdot \left(\frac{r_{ВП}}{c_P \cdot \Delta t}\right)^{1,67} \quad (30)$$

где C – коэффициент, значение которого выбирают в зависимости от типа выпарного аппарата по табл. 2.

L, d - длина и внутренний диаметр кипяточной трубы, м; выбирается для заданного типа аппарата по [10];

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

$r_{ВП}$ - теплота парообразования вторичного пара, Дж/кг;

Δt - полезная разность температур в данном аппарате, °С или К.

Таблица 2

Характеристики циркуляционного контура
выпарных аппаратов

Обозначение аппарата ГОСТ 1987-73	С в формуле (30)	$H_{\text{ТР}}$, м	$L_{\text{ТР}}$, м	$D_{\text{ТР}}$, м	$\zeta_{\text{М}}$
Тип I Исполнение II:	0,064	$0,6D_{\text{К}}$	$0,785D_{\text{К}}$	$\sqrt{\frac{4f_0}{\pi}}$	0,35
Тип II Исполнение II:	0,068	$1,5D_{\text{К}}$	$1,3D_{\text{К}} + 0,6$		0,72
Тип II Исполнение I:	0,083	$0,6D_{\text{К}}$	$0,75D_{\text{К}} + 0,6$		1,32

Обозначения в таблице 2:

$H_{\text{ТР}}$ - высота трубопровода парорастворной смеси относительно верхней трубной решетки;

$L_{\text{ТР}}$ - длина трубопровода парорастворной смеси;

$D_{\text{ТР}}$ - диаметр трубопровода парорастворной смеси;

$\zeta_{\text{М}}$ - суммарный коэффициент местных сопротивлений трубопровода парорастворной смеси;

$D_{\text{К}}$ - диаметр корпуса греющей камеры.

Пределы применения формулы (30):

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

$$f_{\text{ц}}/f_0 = 0,1..0,4; \quad \text{Pr}_p = 1,43..21;$$

$$\mu_p/\mu_{\text{ВП}} = 17,9..357; \quad r_{\text{ВП}}/(c_p \cdot \Delta t) = 13,7..61;$$

$$\rho_{\text{ВП}}/\rho_p = (7,35..119) \cdot 10^{-5}; \quad C = 0,064..0,083;$$

$$n = 12..150.$$

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

$$x = \frac{1}{n}. \quad (31)$$

6. Вычисляют количество раствора, кг/с, поступающего в кипятивные трубы

$$G_0 = nw. \quad (32)$$

7. Определяют площадь сечения трубного пучка аппарата, м²:

$$f_0 = 0,25 \pi d^2 z, \quad (33)$$

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

8. Находят массовую скорость двухфазового потока, кг/(м²с) по формуле

$$S = \frac{G_0}{f_0}. \quad (34)$$

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

$$Re_p = \frac{G_0 \cdot d}{f_0 \cdot \mu_p}. \quad (35)$$

Если $Re_p < 2200$, то переходят к другому варианту расчета, уменьшая число труб в греющей камере Z до тех пор, пока число Re_p не станет больше или равным 2200.

10. В диапазоне $2200 \leq Re_p < 9000$ коэффициент φ определяют как.

$$\begin{aligned} \varphi = & -(1,89 \cdot 10^{-15}) \cdot Re_p^4 + (4,81 \cdot 10^{-11}) \cdot Re_p^3 - \\ & -(4,53 \cdot 10^{-7}) \cdot Re_p^2 + 0,002 \cdot Re_p - 2,229 \end{aligned} \quad (36)$$

Если $Re_p > 9000$, то принимают $\varphi = 1$.

11. Критерий Нуссельта вычисляется по формуле

$$Nu = 0,021 \cdot Re_p^{0,8} Pr_p^{0,43} \cdot \varphi. \quad (37)$$

Далее определяется коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К), со стороны раствора в зоне конвективного теплообмена:

$$\alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{d}. \quad (38)$$

12. Находят температуру стенки трубы со стороны конденсирующегося пара:

$$t'_w = 0,5 \cdot (t + \vartheta), \quad (39)$$

где t - температура греющего пара, °С (пример: для первой ступени $t = t_1$);

ϑ – температура кипения раствора (пример: для первой ступени $\vartheta = \vartheta_0$), °С.

13. Определяют температуру пленки конденсата:

$$t_{\text{ПЛ}} = 0,5(t + t'_w). \quad (40)$$

14. Коэффициент A в зависимости от $t_{\text{ПЛ}}$ определяют по формуле.

$$A = (9,47 \cdot 10^{-7}) \cdot t_{\text{ПЛ}}^4 - (3,9 \cdot 10^{-4}) \cdot t_{\text{ПЛ}}^3 + 0,02 \cdot t_{\text{ПЛ}}^2 + 10,73 \cdot t_{\text{ПЛ}} + 1264,83 \quad (41)$$

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

$$\Delta t' = t - t'_w. \quad (42)$$

16. Коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного водяного пара, Вт/(м²К), рекомендуется вычислять по формуле

$$\alpha_E = 0,92 \cdot A \cdot \left(\frac{\Gamma_{ГР}}{L \cdot \Delta t'} \right)^{0,25}, \quad (43)$$

где $\Gamma_{ГР}$ - теплота парообразования греющего пара, кДж/кг; выбирается по параметрам пара из [3].

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

$$\bar{t}_w = \frac{\alpha_C \cdot \vartheta + \alpha_E \cdot t}{\alpha_C + \alpha_E}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (44)$$

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

$$B = \frac{\Gamma_{ВП} \cdot \rho_P \cdot \rho_{ВП}}{9,8(\vartheta + 273,16)(\rho_P - \rho_{ВП})}, \text{ кг}/(\text{м}^2\text{К}) \quad (45)$$

Здесь $\Gamma_{ВП}$ в Дж/кг.

$$\Pi = 3,14 \cdot Z \cdot d, \text{ м}; \quad (46)$$

$$R = \alpha_C \cdot \Pi, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad (47)$$

$$Q_C = G_0 \cdot c_P, \text{ Вт}/\text{К} \quad (48)$$

$$\Psi = \frac{2Q_C}{R}, \text{ м}; \quad (49)$$

$$\psi = \left(\frac{\rho_{\text{ВП}}}{\rho_{\text{P}}} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_{\text{P}}}{\mu_{\text{ВП}}} \right)^{0.5} \quad (50)$$

19. Вычисляют параметр двухфазного потока

$$X_{\text{tt}} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \cdot \psi, \quad (51)$$

где x - определяется по формуле (31).

Далее определяют структуру двухфазного потока в зависимости от величины $1/X_{\text{tt}}$ и S по рисунку 2. 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 кипяточной трубы d .

20. Объемная доля жидкости R_{P} в двухфазном потоке и множитель, учитывающий потери давления в двухфазном потоке Φ_{tt} , определяют в зависимости от X_{tt} по формуле.

$$\Phi_{\text{tt}} = 4,674 \cdot (X_{\text{tt}})^{-0,665} \quad (52)$$

$$R_{\text{P}} = 0,106 \cdot \ln(X_{\text{tt}}) + 0,282 \quad (53)$$

21. Определяют массовое паросодержание двухфазного потока, равное 1/3 от x : $X_1 = x/3$ и соответственно ему – параметр двухфазного потока

$$X'_{\text{tt}} = \left(\frac{1-x_1}{x_1} \right)^{0.9} \cdot \psi \quad (54)$$

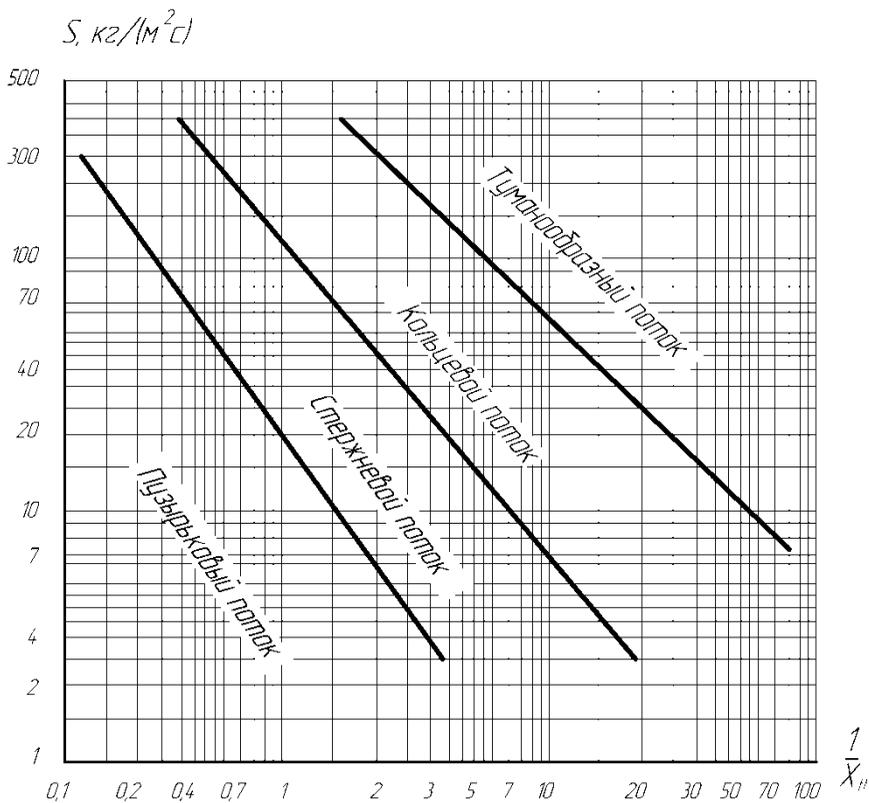


Рис. 2 Структура двухфазного потока в трубах

22. Объемную долю жидкости R'_p и множитель Φ'_{tt} определяют в зависимости от X'_{tt} по формулам (52) и (53).

23. Определяют массовое паросодержание двухфазного потока, равное $2/3$ от x : $X_2 = 2x/3$, и соответственно ему – параметр двухфазного потока:

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

24. Объемную долю жидкости R''_p и множитель Φ''_{tt} определяют в зависимости от X''_{tt} по формулам (52) и (53).

25. Вычисляют количество жидкой фазы, кг/с, на выходе из кипяtilьных труб:

$$G_p = G_0 - w . \quad (56)$$

26. Определяют диаметр трубопровода парорастворной смеси, так называемой трубы вскипания. В современных выпарных аппаратах кипение раствора происходит непосредственно в трубе вскипания, установленной над греющей камерой. Кипение в трубах предотвращается за счет гидростатического давления столба жидкости в трубе вскипания [10]. Диаметр трубы, м

$$D_{TP} = \left(\frac{4f'_0}{\pi} \right)^{0,5} , \quad (57)$$

где f'_0 - площадь поперечного сечения трубопровода парорастворной смеси, м².

Принимается [9] $f'_0 = f_0$ (формула (33)).

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

$$\text{Re}_{\text{ТР}} = \frac{G_{\text{P}} \cdot D_{\text{ТР}}}{f_0 \cdot \mu_{\text{P}}}. \quad (58)$$

28. Коэффициент трения λ_0 для парорастворной смеси определяют в зависимости от $\text{Re}_{\text{ТР}}$ по следующим соотношениям:

для любых труб в диапазоне $0 \leq \text{Re}_{\text{ТР}} \leq 2300$

$$\lambda_0 = 58,251 \cdot \text{Re}^{-0,981}; \quad (59)$$

для труб из меди, латуни и свинца при $\text{Re}_{\text{ТР}} > 2300$

$$\lambda_0 = 0,263 \cdot \text{Re}^{-0,236} \quad (60)$$

для труб из стали и чугуна при $\text{Re}_{\text{ТР}} > 2300$

$$\lambda_0 = 0,148 \cdot \text{Re}^{-0,158} \quad (61)$$

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

$$\text{Re}_{\text{В}} = \frac{G_0 (1 - x_2) d}{f_0 \cdot \mu_{\text{P}}}. \quad (62)$$

30. Коэффициент трения $\lambda_{0\text{В}}$ для потока в зоне кипения определяют в зависимости от $\text{Re}_{\text{В}}$ по формулам (59) – (61).

31. Вычисляют коэффициенты для определения размеров конвективной зоны:

$$\Delta P_0 = \frac{1}{2g} \left(\frac{G_0}{f_0} \right)^2 \frac{1}{\rho_p}, \quad (63)$$

$$S_0 = (\Phi''_{tt})^2 (1 - x_2)^2. \quad (64)$$

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

$$\rho_{TR} = \rho_p R_p + \rho_{ВП} (1 - R_p), \quad (65)$$

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

34. Определяют статические потери давления в трубопроводе парорастворной смеси:

$$\Delta P'_{TR} = \rho_{TR} \cdot H_{TR}, \text{ кг/м}^2. \quad (66)$$

35. Сумму местных сопротивлений трубопровода парорастворной смеси вычисляют по формуле

$$\sum_{i=1}^n \zeta_{i,TR} = \zeta_M + 1. \quad (67)$$

Здесь значения ζ_M выбирают из табл. 2 по принятому типу аппарата.

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

$$\Delta P''_{TP} = \frac{1}{2g \cdot \rho_P} \left(\frac{G_P \cdot \Phi_{tt}}{f_0'} \right)^2 \left(\lambda_0 \frac{L_{TP}}{D_{TP}} + \sum_{i=1}^n \zeta_{i,TP} \right), \quad (68)$$

где L_{TP} - длина трубопровода парорастворной смеси (выбирают по типу аппарата из табл.2).

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

$$\Delta P_{TP} = \Delta P'_{TP} + \Delta P''_{TP}, \quad (69)$$

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

$$Z_B = \frac{\lambda_{0B} \cdot L}{d} + 1. \quad (70)$$

39. Вычисляют потери давления на ускорение парорастворной смеси:

$$\Delta P_Q = 2 \cdot \Delta P_0 \left[\frac{(1-x)^2}{R_P} + \frac{\rho_P \cdot x^2}{\rho_{ВП} (1-R_P)} - 1 \right]. \quad (71)$$

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

$$\bar{\rho}_{\text{ТР}} = \rho_{\text{Р}} \cdot R'_{\text{Р}} + \rho_{\text{ВП}} (1 - R'_{\text{Р}}), \quad (72)$$

41. Вычисляют коэффициенты для формулы определения размеров конвективной зоны:

$$Y = \bar{\rho}_{\text{ТР}} + \frac{\lambda_{0\text{В}}}{d} \cdot \Delta P_0 \cdot S_0 ; \quad (73)$$

$$I = \Delta P_{\text{ТР}} + \rho_{\text{ТР}} \cdot L + \Delta P_0 \cdot S_0 \cdot Z_{\text{В}}; \quad (74)$$

$$\theta = \bar{t}_{\text{В}} - \vartheta; \quad (75)$$

$$v = \frac{\Psi \cdot I}{Y}; \quad (76)$$

$$a = \frac{2 \cdot \theta \cdot v + \Psi \cdot Y - I}{Y} . \quad (77)$$

42. Определяют длину конвективной зоны кипяточной трубы, м:

$$L_{\text{С}} = \left(0,25 \cdot a^2 + v \right)^{0,5} - 0,5 \cdot a . \quad (78)$$

Формулу (78) используют при расчете аппаратов, выпаривающих водные растворы в диапазоне изменения параметров:

$$\begin{aligned}
 L/d &= 60,5..150; & \mu_P / \mu_{H_2O} &= 1..1,4; \\
 f_{ц} / f_o &= 0,1..0,4; & \rho_P / \rho_{H_2O} &= 1..1,45; \\
 \zeta_M &= 0,32..1,32; & P_B &= 0,12..3 \text{ бар(абс.);} \\
 P_1 &= 1,4..21 \text{ бар;} & \Delta t &= 12..40 \text{ }^\circ\text{C.}
 \end{aligned}$$

43. Вычисляют длину зоны кипения:

$$L_B = L - L_C, \text{ м.} \quad (79)$$

44. Рассчитывают скорость потока на выходе из кипя-
тельных труб, м/с

$$v'_{TP} = \frac{w}{f_0} + \frac{G_P}{\rho_{ВП} \rho_P}, \quad (80)$$

и скорость раствора в трубах, м/с

$$v_P = \frac{G_0}{f_0 \cdot \rho_P}, \quad (81)$$

и далее среднюю логарифмическую скорость потока в
трубах, м/с, по формуле:

$$v_{CP} = \frac{v'_{TP} - v_P}{\ln \left(\frac{v'_{TP}}{v_P} \right)}. \quad (82)$$

45. Вычисляют коэффициент теплоотдачи со стороны раствора в зоне кипения, Вт/(м²К):

$$\alpha_B = 5,08 \frac{\lambda_P \left(\frac{10 \cdot c_P \cdot \mu_P}{\lambda_P} \right)^{0,25} \left(\frac{v_{CP} \cdot d \cdot \rho_P}{\mu_P} \right)^{0,55}}{d \left(\frac{\rho_P}{\rho_{ВП}} - 1 \right)^{0,8} \left(\frac{1}{\sigma \cdot c_P} \right)^{0,45} L_B^{0,25}}. \quad (83)$$

46. Вычисляют усредненное по длине трубы значение коэффициента теплоотдачи со стороны раствора, Вт/(м²К):

$$\alpha_P = \frac{\alpha_C \cdot L_C + \alpha_B \cdot L_B}{L}. \quad (84)$$

47. По формулам (25) или (27) определяют коэффициент теплопередачи в выпарном аппарате с естественной циркуляцией при условии, что $\alpha_1 = \alpha_E$ и $\alpha_2 = \alpha_P$.

3.5.2 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, °С, вычисляют по следующему соотношению:

$$t_p'' = t_p' + \Delta t_p, \quad (85)$$

где t_p' - температура раствора, поступающего на вход в теплообменные трубки греющей камеры, °С; для первой ступени $t_p' = \vartheta_0$ (п. 2);

Δt_p - перегрев раствора в теплообменных трубках, °С.

Для аппаратов с принудительной циркуляцией раствора $\Delta t_2 = 1..3$ °С. В первом приближении принимается $\Delta t_2 = 1,5$ °С. Затем эта величина уточняется методом итераций после определения коэффициента теплопередачи K , Вт/(м²·К).

2. Коэффициент теплоотдачи от греющего пара к наружной поверхности теплообменных труб α_1 , Вт/(м²К), вычисляют по формуле:

$$\alpha_1 = 1,15 \frac{A \cdot B}{\left[L (t_{\text{ГР}} - \bar{t}_{\text{СТ}}) \right]^{0,25}}, \quad (86)$$

где $A = r_{\text{ГР}}^{0,25}$;

$r_{\text{ГР}}$ - теплота парообразования греющего пара данного аппарата, Дж/кг; определяют по давлению греющего аппарата из [3];

$$B = \left(\frac{g \cdot \rho_K \cdot \lambda_K^3}{v_K} \right)^{0,25},$$

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

ρ_K - плотность конденсата при средней температуре пленки $\bar{t}_{\text{ПЛ}}$, кг/м^3 ; определяется по [3,4];

ν_K - коэффициент кинематической вязкости конденсата при средней температуре пленки $\bar{t}_{\text{ПЛ}}$, $\nu_K = \mu_K / \rho_K$, $\text{м}^2/\text{с}$;

μ_K - коэффициент динамической вязкости конденсата при средней температуре пленки $\bar{t}_{\text{ПЛ}}$, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

$t_{\text{ГР}}$ - температура насыщенного греющего пара, поступающего в греющую камеру аппарата, $^{\circ}\text{C}$; определяется по давлению насыщения P_H , бар; для первой ступени $t_{\text{ГР}} = t_1$;

$\bar{t}_{\text{СТ}}$ - средняя температура стенки теплообменных труб со стороны конденсирующего пара, $^{\circ}\text{C}$; определяется по формуле

$$\bar{t}_{\text{СТ}} = t_{\text{ГР}} - \frac{k}{\alpha_1} (t_{\text{ГР}} - \bar{t}_p), \quad (87)$$

методом итераций; в первом приближении принимается $(k/\alpha_1)_i \approx 0,3$ и затем уточняется после определения коэффициентов α_1 и k ;

\bar{t}_p - средняя температура раствора в теплообменных трубах греющей камеры, $^{\circ}\text{C}$, определяется по формуле

$$\bar{t}_p = 0,5 (t_p' + t_p''), \quad (88)$$

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

$$\bar{t}_{\text{ПЛ}} = 0,5(t'_{\text{ГР}} + \bar{t}_{\text{СТ}}); \quad (89)$$

L - длина теплообменных труб греющей камеры, м; определяется по типу аппарата из [10] или из задания на проект.

3. Коэффициент теплоотдачи от труб к выпариваемому раствору α_2 , Вт/(м²·К), определяют по соотношению

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu}_p \cdot \lambda_p}{d_{\text{ВН}}}, \quad (90)$$

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

$d_{\text{ВН}}$ - внутренний диаметр теплообменной трубы, м; выбирается в соответствии с рекомендациями из [10] или из задания на проект;

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

$$\text{Nu}_p = K_0 \text{Pr}_p^{0,33} (\mu_p / \mu_{\text{СТ}})^{0,14}, \quad (91)$$

где K_0 - безразмерный комплекс, определяемый по следующей методике:

- ламинарное движение выпариваемого раствора
 $Re_p = 20..2000$; $Pr_p = 0,6..2500$:

$$K_0 = 1,86 \cdot Re_p^{0,33} (d_{BH} / L)^{0,33}; \quad (92)$$

- переходный режим движения выпариваемого раствора
 $Re_p = 2 \cdot 10^3 .. 10^4$; $Pr_p = 0,6..2500$:

$$K_0 = 0,116 \cdot (Re_p^{0,67} - 125) \cdot \left[1 - (d_{BH} / L)^{0,67} \right]. \quad (93)$$

При турбулентном режиме движения выпариваемого раствора и $Re_p = 10^4 .. 5 \cdot 10^6$; $Pr_p = 0,6..2500$ критерий Нуссельта

$$Nu_p = 0,023 Re_p^{0,8} Pr_p^{0,4}, \quad (94)$$

Re_p - критерий Рейнольдса для выпариваемого раствора

$$Re_p = \frac{w_p \cdot d_{BH}}{v_p}, \quad (95)$$

где w_p - средняя скорость движения раствора по теплообменным трубам, м/с; оптимальный вариант выпарного аппарата определяют по оптимальному значению скорости движения раствора $(w_p)_{ОПТ}$, которое рассчитывают по минимальной величине приведенных годовых

расчетных затрат $Z_{\text{ГОД}}$, руб/год, на осуществление конкретного процесса выпаривания (см. гл. 4); в первом приближении скорость движения раствора принимается из диапазона $W_p = 1..4$ м/с;

V_p - коэффициент кинематической вязкости раствора при средней температуре \bar{t}_p в теплообменных трубах, $\text{м}^2/\text{с}$; определяется по концентрации и средней температуре раствора из Приложения 3 $V_p = \mu_p / \rho_p$, м/с;

μ_p - коэффициент динамической вязкости при средней температуре раствора, Па·с;

ρ_p - плотность раствора, $\text{кг}/\text{м}^3$; определяется аналогично вязкости;

Pr_p - критерий Прандтля при средней температуре раствора в теплообменных трубах греющей камеры:

$$Pr_p = \frac{c_p V_p \rho_p}{\lambda_p}, \quad (96)$$

где c_p - изобарная теплоемкость раствора при средней температуре \bar{t}_p , Дж/(кг·К); определяется по концентрации и \bar{t}_p раствора; по указанным параметрам раствора непосредственно из Приложения 3 можно получить значение Pr_p ;

$\mu_{\text{СТ}}$ - коэффициент динамической вязкости раствора при средней температуре стенки со стороны выпариваемого раствора;

\bar{t}''_{CT} - средняя температура стенки теплообменных труб со стороны раствора, °С; определяется по формуле

$$\bar{t}''_{CT} = \bar{t}_p + \frac{k}{\alpha_2} (t_{ГР} - \bar{t}_p), \quad (97)$$

методом итераций. В первом приближении принимается $(k/\alpha_2)_1 \cong 0,5$ и затем уточняется после определения коэффициентов α_2 и k .

6. Термическое сопротивление материала теплообменных труб греющей камеры, $(m^2 \cdot K)/Вт$, вычисляют по формуле

$$R_{CT} = \delta_{CT} / \lambda_{CT}, \quad (98)$$

где δ_{CT} - толщина стенки теплообменной трубы, м; выбирается по типу аппарата из [10] или из задания на проект;

λ_{CT} - коэффициент теплопроводности теплообменных труб, $Вт/(м \cdot К)$; определяется по табл. 5.

7. Термическое сопротивление слоя отложений, $(m^2 \cdot K)/Вт$, находящегося на внутренней поверхности теплообменных труб греющей камеры определяется как

$$R_{ЗАГ} = \frac{\delta_{ЗАГ}}{\lambda_{ЗАГ}}, \quad (99)$$

где $\delta_{ЗАГ}$ - толщина слоя отложений на внутренней поверхности теплообменных труб, м; принимается $\delta_{ЗАГ} = const$ по исходным данным или на основании

опытной зависимости от скорости движения раствора при различной продолжительности работы аппарата τ_p между очистками, т.е. $\delta_2 = f(W_2, \tau_p)$; ориентировочно $\delta_{3AG} = 0,1..0,5$, мм;

λ_{3AG} - коэффициент теплопроводности слоя отложений, Вт/(м·К), определяется по табл. 6.

8. По формуле (25) определяют коэффициент теплопередачи в выпарном аппарате с принудительной циркуляцией и вычисляют отношения $(k/\alpha_1)_p$ и $(k/\alpha_2)_p$.

Таблица 3

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 ·К)/Вт
Сталь углеродистая марки ВСтЗсп, ВСтЗпс, ВСтЗпс	60	0,002	$3,34 \cdot 10^{-5}$
Сталь коррозионно-стойкая марки Х18Н10Т, Х17Н13М2Т, 0Х23Н28М3Д3Т, 000Х16Н15М3	16	0,002	$1,25 \cdot 10^{-4}$
Титановые сплавы	15	0,002	$1,33 \cdot 10^{-4}$

9. Производится проверка первого приближения отношения коэффициента теплопередачи k к коэффициенту теп-

лоотдачи со стороны конденсирующего греющего пара α_1 по соотношению

$$\varepsilon_1 = \frac{|(k/\alpha_1)_p - (k/\alpha_1)_1|}{(k/\alpha_1)_1} \leq 0,3. \quad (100)$$

Таблица 4

Ориентировочные значения термических сопротивлений слоя отложений

Наименование отложений	Коэффициент теплопроводности слоя отложений $\lambda_{\text{ЗАГ}}$, Вт/(м·К)	Термическое сопротивление слоя отложений $R_{\text{ЗАГ}}$, (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

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

$$\varepsilon_2 = \frac{|(k/\alpha_2)_P - (k/\alpha_2)_1|}{(k/\alpha_2)_1} \leq 0,3. \quad (101)$$

Если неравенства пунктов 9 и 10 не соблюдаются, то полученные расчетным путем величины $(k/\alpha_1)_P$ и $(k/\alpha_2)_P$ следует принять в качестве второго приближения и повторить расчет, начиная с формулы (87) до тех пор, пока неравенства (100) и (101) не будут соблюдены.

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

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_B / \Delta t_M)}, \quad (102)$$

где Δt_B - наибольший температурный напор между теплоносителями в греющей камере:

$$\Delta t_B = t_{ГР} - t'_P; \quad (103)$$

Δt_M - наименьший температурный напор между теплоносителями.

$$\Delta t_M = t_{ГР} - t_P'' \quad (104)$$

12. Производят проверку первого приближения величины перегрева выпариваемого раствора в трубах греющей камеры. Для этого определяют расчетную величину Δt_2 , по формуле

$$\Delta t_2 = \frac{4(t_{ГР}' - t_P') \cdot L}{\frac{d_{ВН} \rho_P c_p W_P}{k} + 2L}, \text{ } ^\circ \text{C.} \quad (105)$$

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

$$\varepsilon_3 = \frac{|\Delta t_2 - (\Delta t_2)_1|}{(\Delta t_2)_1} \leq 0,1. \quad (106)$$

При соблюдении неравенств по формулам (106), (100) и (101) 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 (85) по (106) включительно. Затем выбирается третье приближение и т.д. вплоть до соблюдения неравенства по формуле (106).

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

$$\frac{k_1}{k_1} : \frac{k_2}{k_1} : \frac{k_3}{k_1} : \dots : \frac{k_n}{k_1} = a_1 : a_2 : a_3 : \dots : a_n$$

и сравнить полученные результаты с ранее принятым соотношением для первого приближения (п. 3.4.). При расхождениях более $\pm 10\%$ следует принять в качестве второго приближения полученное расчетное соотношение коэффициентов теплопередачи и повторять расчет, начиная с формулы (22) или (23) до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность $\leq 10\%$.

3.6. 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

$$\alpha_i = \frac{i_i' - t_{\text{КОНД},i} \cdot c_{\text{КОНД},i}}{i_i'' - \vartheta_i \cdot c_{p,i}}, \quad (107)$$

где i_i' , i_i'' - соответственно энтальпия греющего и вторичного пара i -й ступени, кДж/кг; принимается по табл. 1, п. 3.4,

$t_{\text{КОНД},i}$ - температура конденсата греющего пара i -ой ступени, °С; принимается по табл. 1, п. 3.4.

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

ϑ_i - температура кипения раствора в i -ой ступени, °С; принимается по табл. 1, п. 3.4;

$C_{P,i}$ - изобарная теплоемкость кипящего раствора в i -й ступени, кДж/(кг·К).

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

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

$$\beta_i = \frac{\vartheta_{i-1} - \vartheta_i}{i_i'' - \vartheta_i \cdot c_{P,i}}, \quad (108)$$

где $\vartheta_{i-1}, \vartheta_i$ - температура кипения раствора в предыдущей и рассматриваемой ступенях выпарной установки, °С; принимается по табл. 1, п. 3.4.

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

$$\gamma_i = \frac{(t_{\text{конд}} \cdot c_{\text{конд}})_{i-1} - (t_{\text{конд}} \cdot c_{\text{конд}})_i}{i_1'' - \vartheta_i \cdot c_{p,i}}, \quad (109)$$

где $(t_{\text{конд}} \cdot c_{\text{конд}})_{i-1}$ и $(t_{\text{конд}} \cdot c_{\text{конд}})_i$ - энтальпия конденсата греющего пара в предыдущей и рассматриваемой ступенях выпарной установки, кДж/кг; $t_{\text{конд}}$ принимается по табл. 1, п. 3.4, а $c_{\text{конд}}$ из [4] по $t_{\text{конд}}$.

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 D_1 на обогрев аппаратов 1 ступени, кг/с, определяют по уравнению

$$D_1 = \frac{W - G_H c_H Y + E_1 K_1 + E_2 K_2 + \dots + E_{n-1} K_{n-1}}{X}, \quad (110)$$

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

Коэффициенты $X, Y, K_1, K_2, K_3, \dots$ определяются по методу И.А. Тищенко в функции коэффициентов α_i, β_i и γ_i .

1. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент X_n по формуле

$$X_n = \alpha_n \cdot X_{n-1} - \beta_n (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{n-1}) + \gamma_n (1 + X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{n-2}) \quad (111)$$

Например: $X_1 = \alpha_1$;

$$X_2 = \alpha_2 X_1 - \beta_2 X_1 + \gamma_2;$$

$$X_3 = \alpha_3 X_2 - \beta_3 (X_1 + X_2) + \gamma_3 (1 + X_1);$$

$$X_4 = \alpha_4 X_3 - \beta_4 (X_1 + X_2 + X_3) + \gamma_4 (1 + X_1 + X_2);$$

$$X_5 = \alpha_5 X_4 - \beta_5 (X_1 + X_2 + X_3 + X_4) + \gamma_5 (1 + X_1 + X_2 + X_3)$$

и т.д.

1. Определяют коэффициент X выпарной установки:

$$X = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_n \quad (112)$$

2. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент Y_n по формуле:

$$Y_n = \alpha_n \cdot Y_{n-1} - \beta_n (Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_{n-1} - 1) + \gamma_n (Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_{n-2}) \quad (113)$$

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.

3. Определяют коэффициент Y для выпарной установки

$$Y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n. \quad (114)$$

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

5. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент K'_n (отбор вторичного пара E_1) по формуле:

$$K'_n = \alpha_n K'_{n-1} - \beta_n (K'_2 + K'_3 + \dots + K'_{n-1}) + \gamma_n (1 + K'_2 + K'_3 + \dots + K'_{n-2}). \quad (115)$$

Например:

$$K'_1 = 0$$

$$K'_2 = \alpha_2;$$

$$K'_3 = \alpha_3 K'_2 - \beta_3 K'_2 + \gamma_3;$$

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

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

и т.д.

6. Определяют коэффициент K_1 для выпарной установки:

$$K_1 = K'_2 + K'_3 + K'_4 + \dots + K'_n. \quad (116)$$

7. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент K''_n (отбор вторичного пара E_2) по формуле

$$K''_n = \alpha_n K''_{n-1} - \beta_n (K''_3 + K''_4 + \dots + K''_{n-1}) + \gamma_n (1 + K''_3 + K''_4 + \dots + K''_{n-2}). \quad (117)$$

Например: $K''_1 = K''_2 = 0; \quad K''_3 = \alpha_3;$

$$K''_4 = \alpha_4 K''_3 - \beta_4 K''_3 + \gamma_4;$$

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

и т.д.

8. Определяют коэффициент K_2 для выпарной установки:

$$K_2 = K_3'' + K_4'' + K_5'' + \dots + K_n'' \quad (118)$$

9. Для каждой ступени выпаривания вычисляют коэффициент K_n''' (отбор вторичного пара E_3) по формуле

$$K_n''' = \alpha_n K_{n-1}''' - \beta_n (K_4''' + K_5''' + \dots + K_{n-1}''') + \gamma_n (1 + K_4''' + K_5''' + \dots + K_{n-2}'''). \quad (119)$$

Например: $K_1''' = K_2''' = K_3''' = 0$; $K_4''' = \alpha_4$;

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

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

и т.д.

10. Определяют коэффициент K_3 для выпарной установки

$$K_3 = K_4''' + K_5''' + \dots + K_n''' \quad (120)$$

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

11. По формуле (110) вычисляют расход греющего пара D_1 , кг/с.

12. Определяют количество выпаренной воды W_i , кг/с по отдельным ступеням установки:

$$\begin{aligned}
 w_1 &= D_1 x_1 + G_{\text{н}} c_{\text{н}} y_1; \\
 w_2 &= D_1 x_2 + G_{\text{н}} c_{\text{н}} y_2 - E_1 K_2'; \\
 w_3 &= D_1 x_3 + G_{\text{н}} c_{\text{н}} y_3 - E_1 K_3' - E_2 K_3''; \\
 w_4 &= D_1 x_4 + G_{\text{н}} c_{\text{н}} y_4 - E_1 K_4' - E_2 K_4'' - E_3 K_4''', \dots
 \end{aligned}$$

13. Количество выпаренной воды в любой n – ступени, кг/с, определяют по общему уравнению:

$$\begin{aligned}
 w_n &= D_1 x_n + G_{\text{н}} c_{\text{н}} y_n - E_1 K_n' - \\
 &- E_2 K_n'' - E_3 K_n''' - \dots - E_{n-1} K_n^{(n-1)},
 \end{aligned} \tag{121}$$

14. Определяют общее количество воды, кг/с, выпаренное во всех ступенях МВУ:

$$\sum W = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + \dots + w_n. \tag{122}$$

15. Проверяют совпадение найденного общего количества выпаренной воды во всех ступенях с заданным количеством воды, подлежащим выпариванию в проектируемой МВУ, рассчитанным по формуле (6).

Совпадение количеств выпариваемой воды «по паротборам» 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 , кг/с, на обогрев аппаратов 1-й ступени определяют по уравнению:

$$D_1 = \frac{W(1+Y) - G_H c_H (Y + \beta_n) + E_1 K_1 + E_2 K_2 + \dots + E_{n-1} K_{n-1}}{X}, \quad (123)$$

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

$$X_m = \frac{\alpha_m}{1 - \beta_m} X_{m-1} + \frac{\beta_m}{1 - \beta_m} (x_1 + x_2 + \dots + x_{m-1}) + \frac{\gamma_m}{1 - \beta_m} (1 + x_1 + x_2 + \dots + x_{m-2}) \quad (124)$$

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

$$X_n = \alpha_n \cdot X_{n-1} + \gamma_n (1 + x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{n-2}). \quad (125)$$

Например:

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

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

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

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

2. Определяют коэффициент X для выпарной установки:

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n. \quad (126)$$

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

$$y_m = \frac{\alpha_m}{1-\beta_m} y_{m-1} + \frac{\beta_m}{1-\beta_m} (1 + y_1 + y_2 + \dots + y_{m-1}) + \frac{\gamma_m}{1-\beta_m} (y_1 + y_2 + \dots + y_{m-2}). \quad (127)$$

Для последней ступени выпаривания вычисляют коэффициент y_n по формуле

$$y_n = \alpha_n y_{n-1} + \gamma_n (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{n-2}). \quad (128)$$

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 U для выпарной установки:

$$Y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + \dots + y_n. \quad (129)$$

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

$$K'_m = \frac{\alpha_m}{1 - \beta_m} K'_{m-1} + \frac{\beta_m}{1 - \beta_m} (K'_2 + K'_3 + \dots + K'_{m-1}) + \frac{\gamma_m}{1 - \beta_m} (1 + K'_2 + K'_3 + \dots + K'_{m-2}) \quad (130)$$

Для последней ступени выпаривания вычисляют коэффициент K'_n по формуле

$$K'_n = \alpha_n K'_{n-1} + \gamma_n (1 + K'_2 + K'_3 + \dots + K'_{n-2}). \quad (131)$$

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:

$$K_1 = K'_2 + K'_3 + K'_4 + \dots + K'_n. \quad (132)$$

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

$$K''_m = \frac{\alpha_m}{1-\beta_m} K''_{m-1} + \frac{\beta_m}{1-\beta_m} (K''_3 + K''_4 + \dots + K''_{m-1}) + \frac{\gamma_m}{1-\beta_m} (1 + K''_3 + K''_4 + \dots + K''_{m-2}) \quad (133)$$

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

$$K_n'' = \alpha_n K_{n-1}'' + \gamma_n (1 + K_3'' + K_4'' + \dots + K_{n-2}''). \quad (134)$$

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:

$$K_2 = K_3'' + K_4'' + K_5'' + \dots + K_n''. \quad (135)$$

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

$$K_m''' = \frac{\alpha_m}{1 - \beta_m} K_{m-1}''' + \frac{\beta_m}{1 - \beta_m} (K_4''' + K_5''' + \dots + K_{m-1}''') + \frac{\gamma_m}{1 - \beta_m} (1 + K_4''' + K_5''' + \dots + K_{m-2}''') \quad (136)$$

Для последней степени выпаривания вычисляют коэффициент K_n''' по формуле:

$$K_n''' = \alpha_n K_{n-1}''' + \gamma_n (1 + K_4''' + K_5''' + \dots + K_{n-2}'''). \quad (137)$$

Например:

$$K_1''' = K_2''' = K_3''' = 0; \quad K_4''' = \frac{\alpha_4}{1 - \beta_4};$$

$$K_5''' = \alpha_5 K_4''' + \gamma_5.$$

10. Определяют коэффициент K_3 для выпарной установки:

$$K_3 = K_4''' + K_5''' + \dots + K_n''' \quad (138)$$

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 (123) вычисляют расход греющего пара D_1 , кг/с.

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

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

Эту систему уравнений после подстановки численных величин $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, E_i, G_H, C_H$ решают относительно w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 .

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

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

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

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

$$\sum W = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + \dots + w_n. \quad (139)$$

14. Проверяют совпадение найденного общего количества выпаренной воды во всех ступенях с заданным количеством воды, подлежащим выпариванию в проектируемой МВУ, рассчитанном по формуле (6). Совпадение количеств выпариваемой воды “по паротборам” 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 D_1 , кг/с, на обогрев аппаратов 1-й ступени определяют по уравнению

$$D_1 = \frac{W - C_n (G_1 Y_1 + G_2 Y_2 + G_3 Y_3 + \dots + G_n Y_n)}{X} + \frac{E_1 (Z_1 - 1) + E_2 (Z_2 - 1) + E_3 (Z_3 - 1) + \dots + E_{n-1} (Z_{n-1} - 1)}{X}, \quad (140)$$

где $G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$ - количество раствора, кг/с, поступающее в отдельную ступень выпарной установки.
Полное количество выпариваемого раствора составит, кг/с:

$$G_H = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n. \quad (141)$$

Если все количество начального раствора поровну распределяется между ступенями

$$\left(G_1 = G_2 = G_3 = \dots = G_n = \frac{G_H}{n} \right), \text{ то уравнение (140)}$$

примет следующий вид:

$$D_1 = \frac{W - C_H(G_n/n)(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n) + E_1(Z_1 - 1) + \dots + E_{n-1}(Z_{n-1} - 1)}{X}, \quad (142)$$

1. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты X_n по формуле

$$X_n = \alpha_n X_{n-1} + \gamma_n (1 + X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{n-2}). \quad (143)$$

Например: $X_1 = \alpha_1$; $X_2 = \alpha_2 X_1 + \gamma_2$;

$$X_3 = \alpha_3 X_2 + \gamma_3 (1 + X_1);$$

$$X_4 = \alpha_4 X_3 + \gamma_4 (1 + X_1 + X_2);$$

$$X_5 = \alpha_5 X_4 + \gamma_5 (1 + X_1 + X_2 + X_3); \quad \text{и т.д.}$$

2. Определяют коэффициент X для выпарной установки

$$X = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_n. \quad (144)$$

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

$$y'_n = \alpha_n y'_{n-1} + \gamma_n (y'_1 + y'_2 + \dots + y'_{n-2}). \quad (145)$$

Например:

$$\begin{aligned}
y_1' &= \alpha_1 ; y_2' = \alpha_2 y_1' \\
y_3' &= \alpha_3 y_2' + \gamma_3 y_1' ; y_4' = \alpha_4 y_3' + \gamma_4 (y_1' + y_2') ; \\
y_5' &= \alpha_5 y_4' + \gamma_5 (y_1' + y_2' + y_3') \text{ и т.д.}
\end{aligned}$$

4. Определяют коэффициент Y_1 для выпарной установки:

$$Y_1 = y_1' + y_2' + y_3' + y_4' + \dots + y_n'. \quad (146)$$

5. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты y_n'' по формуле

$$y_n'' = \alpha_n y_{n-1}'' + \gamma_n (y_2'' + y_3'' + y_4'' + \dots + y_{n-2}''). \quad (147)$$

$$y_1'' = 0 ; y_2'' = \alpha_2 ;$$

$$\text{Например: } y_3'' = \alpha_3 y_2'' ; y_4'' = \alpha_4 y_3'' + \gamma_4 y_2'' ;$$

$$y_5'' = \alpha_5 y_4'' + \gamma_5 (y_2'' + y_3'') \text{ и т.д.}$$

6. Определяют коэффициент Y_2 для выпарной установки:

$$Y_2 = y_2'' + y_3'' + y_4'' + \dots + y_n''. \quad (148)$$

7. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты y_n''' по формуле

$$y_n''' = \alpha_n y_{n-1}''' + \gamma_n (y_3''' + y_4''' + y_5''' + \dots + y_{n-2}'''). \quad (149)$$

$$\begin{aligned}
 & y_1''' = y_2''' = 0 ; \\
 \text{Например} & y_3''' = \alpha_3 ; \\
 & y_4''' = \alpha_4 y_3''' ; \\
 & y_5''' = \alpha_5 y_4''' + \gamma_5 y_3''' \\
 & \text{и т.д.}
 \end{aligned}$$

8. Определяют коэффициент Y_3 для выпарной установки:

$$Y_3 = y_3''' + y_4''' + y_5''' + \dots + y_n''' . \quad (150)$$

9. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты Y_n^{IV} по формуле

$$y_n^{IV} = \alpha_n y_{n-1}^{IV} + \gamma_n (y_4^{IV} + y_5^{IV} + \dots + y_{n-2}^{IV}) . \quad (151)$$

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

и т.д.

10. Определяют коэффициент Y_4 для выпарной установки:

$$Y_4 = y_4^{IV} + y_5^{IV} + y_6^{IV} + \dots + y_n^{IV} . \quad (152)$$

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

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

$$z'_n = \alpha_n z'_{n-1} + \gamma_n (z'_1 + z'_2 + z'_3 + \dots + z'_{n-2}). \quad (153)$$

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:

$$Z_1 = z'_1 + z'_2 + z'_3 + \dots + z'_n. \quad (154)$$

13. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициенты z''_n по формуле

$$z''_n = \alpha_n z''_{n-1} + \gamma_n (z''_2 + z''_3 + z''_4 + \dots + z''_{n-2}). \quad (155)$$

Например: $z''_1 = 0; \quad z''_2 = 1;$

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

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

14. Определяют коэффициент Z_2 для выпарной установки:

$$Z_2 = z_2'' + z_3'' + z_4'' \dots + z_n'' . \quad (156)$$

15. Для всех ступеней выпаривания вычисляют коэффициент z_n''' по формуле

$$z_n''' = \alpha_n z_{n-1}''' + \gamma_n (z_3'' + z_4'' + z_5''' \dots + z_{n-2}'''). \quad (157)$$

Например: $z_1''' = z_2''' = 0; \quad z_3''' = 1;$
 $z_4''' = \alpha_4 z_3''; \quad z_5''' = \alpha_5 z_4'' + \gamma_5 z_3''$ и т.д.

16. Определяют коэффициент Z_3 для выпарной установки:

$$Z_3 = z_3''' + z_4''' + z_5''' \dots + z_n''' . \quad (158)$$

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

$$z_n^{IV} = \alpha_n z_{n-1}^{IV} + \gamma_n (z_4^{IV} + z_5^{IV} + z_6^{IV} \dots + z_{n-2}^{IV}) . \quad (159)$$

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

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

18. Определяют коэффициент Z_4 для выпарной установки:

$$Z_3 = z_4^{IV} + z_5^{IV} + z_6^{IV} \dots + z_n^{IV} \quad (160)$$

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

19. По формулам (140) или (143) вычисляют расход, кг/с, греющего пара D_1 .

20. Определяют количество выпаренной воды w_i по отдельным ступеням установки, кг/с:

$$w_1 = D_1 x_1 + G_1 C_H y_1' ;$$

$$w_2 = D_1 x_2 + G_1 C_H y_2' + G_2 C_H y_2'' - E_1 z_2' ;$$

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

$$w_4 = D_1 x_4 + G_1 C_H y_4' + G_2 C_H y_4'' + G_3 C_H y_4''' + G_4 C_H y_4^{IV} - E_1 z_4' - E_2 z_4'' - E_3 z_4''' ; \text{ и т.д.}$$

Количество выпаренной воды, кг/с, в любой n -ой ступени определяют по общему уравнению:

$$w_n = D_1 x_n + G_1 C_H y_n' + G_2 C_H y_n'' + G_3 C_H y_n''' + \dots + G_n C_H y_n^{(n)} - E_1 z_n' - E_2 z_n'' - E_3 z_n''' - \dots - E_{n-1} z_n^{(n-1)} \quad (161)$$

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

$$\sum W = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + \dots + w_n . \quad (162)$$

22. Проверяют совпадение найденного общего количества выпаренной воды во всех ступенях с заданным количеством воды, подлежащим выпариванию в проектируемой МВУ, рассчитанным по формуле (6).

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

Если МВУ работает без перепуска и самоиспарения конденсата, то уравнения (100), (123), (140) и (143) 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 $E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_{n-1} = 0$;

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, кг/с:

$$d = \frac{D_1}{W} . \quad (163)$$

2. Потеря тепла с уходящим конденсатом минимальна при перепуске его через все ступени. Отвод конденсата от-

дельно 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 $\sum F_i$, благодаря большим коэффициентам теплопередачи.

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

3.7 Уточнение величины полезной разности температур по ступеням МВУ

Если общее количество воды, выпариваемое на МВУ, подсчитанное «по пароотборам» (формулы (122), (139) и (162)) не совпадает с заданным для выпаривания количеством воды, подсчитанным “по концентрациям” формула (10), то определяется величина этого расхождения по формуле

$$W - \sum W = \Delta W, \quad (164)$$

Затем вводят поправки на нагрузки ступеней по вторичным парам.

1. Распределяется ΔW по ступеням МВУ пропорционально количествам выпариваемой воды, подсчитанным по формулам, приведенным в 3.6 для соответствующего типа МВУ, т.е.

$$\Delta w_i = \frac{w_i}{\sum W} \Delta W. \quad (165)$$

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

2. Уточняется расход греющего пара D_1 на основании найденных величин w_i^∂ по формулам:

а) прямоточная МВУ:

$$D_1 = \frac{w_1^\partial - G_H c_H y_1}{x_1}; \quad (166)$$

б) противоточная МВУ:

$$D_1 = \frac{w_1^\partial - \left[G_H c_H - (w_2^\partial + w_3^\partial + w_4^\partial + w_5^\partial) \right] \cdot \beta_1}{\alpha_1}; \quad (167)$$

в) МВУ с параллельным питанием:

$$D_1 = \frac{w_1^\partial - G_1 c_H y_1'}{x_1}. \quad (168)$$

3. Повторяют расчеты по п. 3.6. для конкретной МВУ с целью уточнения значений W_i .

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

Определяют тепловые нагрузки по ступеням выпаривания, Вт, по соотношениям:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= D_1 r_1; \\
 Q_2 &= D_2 r_2 + D_1 \gamma_2 r_2; \\
 Q_3 &= D_3 r_3 + D_2 \gamma_3 r_3; \\
 Q_4 &= D_4 r_4 + [D_2 (1 - \gamma_2) + D_3] \cdot \gamma_4 r_4;
 \end{aligned}
 \tag{169}$$

и так далее, с корректировкой по особенностям конденсатной схемы МВУ. Приведенные уравнения соответствуют тепловой схеме МВУ на рис.1.

Здесь $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ - теплота парообразования вторичного пара в ступенях выпаривания, Дж/кг

Определяется по давлению вторичного пара из [3];

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

Определяют:

D_1 - по формулам (110), (123), (140) или (143), в зависимости от типа установки;

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

Окончательно уточняются полезные разности температур по ступеням МВУ:

а) в случае выбора одинаковых поверхностей теплообмена аппаратов в каждой ступени МВУ, т.е.

$$F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_n :$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_{\text{ПОЛ}} \frac{Q_1 / k_1}{\sum_1^n (Q_i / k_i)};$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{\text{ПОЛ}} \frac{Q_2 / k_2}{\sum_1^n (Q_i / k_i)};$$

и так далее для всех ступеней, где

$$\sum_1^n (Q_i / k_i) = Q_1 / k_1 + Q_2 / k_2 + Q_3 / k_3 + \dots + Q_n / k_n ;$$

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

$$\Delta t_1 = \Delta t_{\text{ПОЛ}} \frac{(Q_1 / k_1)^{0,5}}{\sum_1^n (Q_i / k_i)^{0,5}},$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_{\text{ПОЛ}} \frac{(Q_2 / k_2)^{0,5}}{\sum_1^n (Q_i / k_i)^{0,5}},$$

и так далее для всех ступеней, где

$$\sum_1^n (Q_i / k_i)^{0,5} = (Q_1 / k_1)^{0,5} + (Q_2 / k_2)^{0,5} + (Q_3 / k_3)^{0,5} + \dots$$

$$\dots + (Q_n / k_n)^{0,5}$$

Проверка полученных результатов производится по соотношению

$$\Delta t_{\text{ПОЛ}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n.$$

При расхождении полученных здесь значений Δt_i^P по каждой ступени с ранее принятыми (п. 3.4, формулы (22) и (23)) более $\pm 2,5\%$ необходимо, взяв за второе приближение расчетные значения Δt_i^P , 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.

3.8 Поверхность теплообмена выпарных аппаратов

3.8.1. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора

После проведения всех уточнений необходимо вычислить поверхность теплообмена выпарных аппаратов, m^2 , каждой ступени по уравнению теплопередачи:

$$F_i = \frac{Q_i}{k_i \Delta t_i}, \quad (170)$$

где Q_i - тепловая нагрузка ступени выпаривания, Вт;
 k_i - коэффициент теплопередачи в аппаратах ступени, Вт/(м²·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_i в аппарате при длине зоны кипения, равной длине кипятильной трубы:

$$k_i = \frac{1}{(1/\alpha_E) + (\delta_{СТ} / \lambda_{СТ}) + (1/\alpha_P)}, \quad (171)$$

где α_E - коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного водяного пара, Вт/(м²·К), формула (43);

α_P - коэффициент теплоотдачи со стороны раствора в зоне кипения, Вт/(м²·К), формула (84).

2. Вычисляют плотность теплового потока через стенку кипятильной трубы:

$$q = k_i (t_1 - \vartheta_i), \quad (172)$$

где t_1 - температура греющего пара в данном аппарате, °С;
 ϑ_i - температура кипения раствора там же, °С.

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

$$q_{\text{MAX}} = 282,33 \cdot r_{\text{ВП}} \cdot \rho_{\text{ВП}}^{0,5} \cdot \sigma_p^{0,25} (\rho_p - \rho_{\text{ВП}})^{0,25}, \quad (173)$$

где $r_{\text{ВП}}$ - теплота парообразования вторичного пара, кДж / кг;

$\rho_{\text{ВП}}$ - плотность вторичного пара, кг/м³;

ρ_p - плотность кипящего раствора, кг/м³;

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

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

если $q \leq q_{\text{MAX}}$, то по каталогу [10] выбирается выпарной аппарат, у которого поверхность теплообмена соответствует рассчитанной по формуле (167);

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

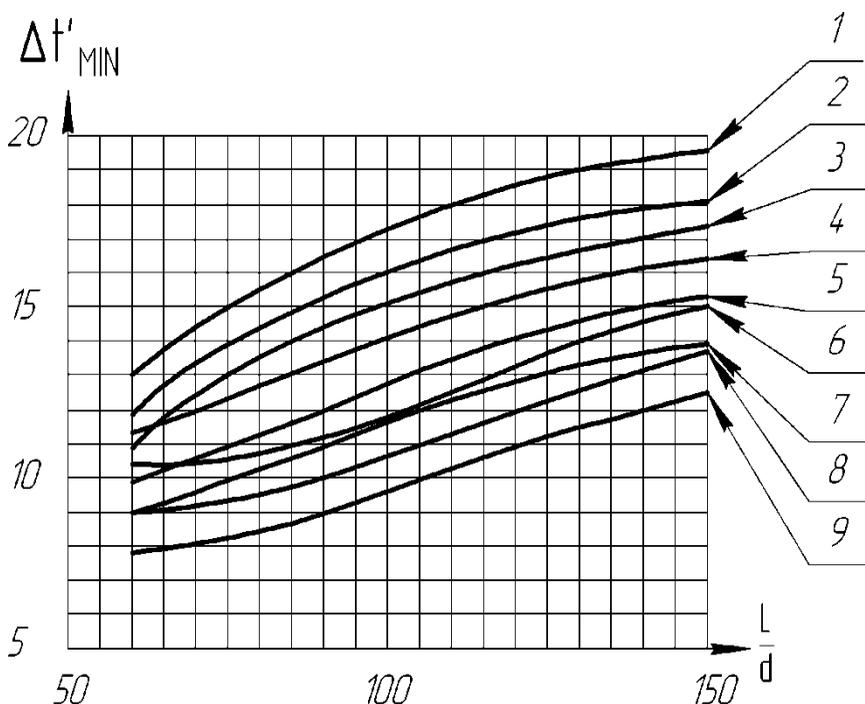


Рис. 4. Зависимость минимального температурного напора $\Delta t'_{MIN}$

от $\frac{L}{d}$ и ξ_M : 1- $\xi_M = 1,32$, $P = 0,126$ МПа; 2 -

$\xi_M = 0,72$, $P = 0,126$ МПа; 3 - $\xi_M = 0,35$, $P = 0,126$ МПа; 4 - $\xi_M = 1,32$, $P = 1,03$ МПа; 5- $\xi_M = 0,72$, $P = 1,03$ МПа; 6 - $\xi_M = 1,32$, $P = 2,02$ МПа; 7 - $\xi_M = 0,35$, $P = 1,03$ МПа; 8 - $\xi_M = 0,72$, $P = 2,02$ МПа; 9 - $\xi_M = 0,35$, $P = 2,02$ МПа

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

$$\Delta t_{\text{MIN}} = \Delta t'_{\text{MIN}} (\mu_{\text{P}} / \mu_{\text{H}_2\text{O}})^{0,1} (\rho_{\text{P}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}})^{0,35}, \quad (174)$$

где $\Delta t'_{\text{MIN}}$ - минимально полезная допустимая разность температур при работе выпарного аппарата на воде; определяется по графикам рис. 4.

Для давлений, не указанных на рис. 4, значение $\Delta t'_{\min}$ определяется линейной интерполяцией. Затем проверяют необходимое условие устойчивой работы аппарата:

$$\Delta t \geq \Delta t_{\text{MIN}} \quad (175)$$

Если $\Delta t < \Delta t_{\min}$, 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 P_1 и P_K , а затем весь расчет повторяют до соблюдения неравенства (172) во всех ступенях МВУ.

3.8.2 Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора

Поверхность теплообмена выпарных аппаратов каждой ступени МВУ, м^2 , с принудительной циркуляцией раствора вычисляют по уравнению теплопередачи:

$$F_i = \frac{Q_i}{k_i \cdot \Delta t_{CP,i}},$$

где Q_i - тепловая нагрузка ступени выпаривания, Вт;
 $\Delta t_{CP,i}$ - средняя разность температур в аппаратах данной ступени, °С; вычисляется по формуле (102);
 k_i - коэффициент теплопередачи в аппаратах ступени, Вт/(м²·К); вычисляется по формуле (25) или (27).

Таблица 5

Характеристики выпарного аппарата

Наименование характеристики	Обозначение	Размерность	Величина
Поверхность теплообмена	(F) _к	м ²	
Коэффициент теплопередачи	(K) _к	Вт/(м ² ·К)	
Производительность циркуляционного контура	(G ₂) _к	кг/с	
Потеря напора в циркуляционном контуре	(ΔP) _к	Па	
Мощность, потребляемая циркуляционным насосом	(N) _к	Вт	
Скорость движения раствора по теплообменным трубам	(W ₂) _к	м/с	

По каталогу [10] выбирают ближайший по величине поверхности теплообмена выпарной аппарат и в табл.5 записывают его основные характеристики (после проведения гидравлического расчета аппарата).

4. 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, м/с, по минимуму годовых приведенных затрат рекомендуется следующее уравнение:

$$W_{2i}^{\text{ОПТ}} = \frac{(B_{2i} \alpha_{li})^{1,25}}{(R_i^{\text{ОПТ}} \alpha_{li} - 1)^{1,25}}, \quad (176)$$

где α_{li} - коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара на наружной стенке кипятильной трубы, Вт/(м²·К) (для первой ступени $\alpha_1 = \alpha_E$, формула (43))

$R_i^{\text{ОПТ}}$ - оптимальное термическое сопротивление теплопередачи для i – го выпарного аппарата, (м²·К)/Вт; определяется в результате решения уравнения

$$2 \cdot \Theta \cdot R_i^{0,5} + \frac{E'}{z^2} (z - 2R_i \cdot d \cdot z) = 0. \quad (177)$$

Здесь

$$\Theta = \frac{\xi \cdot \Pi_A}{\Pi_{\text{эл}} \cdot \tau} \times 10^3, \quad (178)$$

где ξ - коэффициент, учитывающий амортизацию оборудования выпарной установки и коэффициент экономической эффективности, руб./руб.год; $\xi = 0,23..0,30$ руб./руб.год;

Π_A - стоимость оборудования выпарной установки, отнесенная к 1 м^2 поверхности теплообмена выпарного аппарата, руб/м² ;

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

τ - время работы выпарной установки, час/год;

$$E' = \frac{0,125 \cdot d \cdot \xi_{\text{ПР}} \cdot \rho_{\text{P,i}} \cdot B_{2i}^{3,75}}{\eta_{\text{H}} \cdot L_i}, \quad (179)$$

где d - внутренний диаметр кипятильной трубы, м;
 $\xi_{\text{ПР}}$ - приведенный коэффициент сопротивления циркуляционного контура аппарата; в диапазоне $Re = 10^4..5 \cdot 10^5$ можно считать $\xi_{\text{ПР}} = 19,9$;
 $\rho_{\text{P,i}}$ - плотность выпариваемого раствора в i – м корпусе, кг/м³ (по результатам п. 3.4);

$$B_{2i} = \frac{d^{0,2}}{A_{2i}} + 0,000072 ; \quad (180)$$

$$A_{2i} = 0,0219 \cdot \frac{\lambda_{\text{P,i}} \cdot Pr_{\text{P,i}}^{0,43}}{v_{\text{P,i}}^{0,8}}, \quad (181)$$

где $\lambda_{p,i}$, Вт/(м·К), $v_{p,i}$, м²/с, $Pr_{p,i}$ - соответственно коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и число Прандтля выпариваемого раствора в i – м корпусе (из п. 3.4);

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

L_i - высота кипятильной трубы в i – корпусе, м.

$$z = R_i^{3,25} - 3,75R_i^{2,25} \alpha_{li}^{-1} + 5,165R_i^{1,25} \alpha_{li}^{-2} - 3,01R_i^{0,25} \times \alpha_{li}^{-3} + 0,564R_i^{-0,75} \alpha_{li}^{-4}; \quad (182)$$

$$dz = 3,25R_i^{2,25} - 8,44R_i^{1,25} \times \alpha_{li}^{-1} + 8,46R_i^{0,25} \alpha_{li}^{-2} - 0,75R_i^{-0,75} \times \alpha_{li}^{-3} - 0,42R_i^{-1,75} \alpha_{li}^{-4};$$

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 вычис-

ляют его теплофизические свойства: $\rho_{p,i}$, кг/м³; $\lambda_{p,i}$, Вт/(м·К); $\nu_{p,i}$, м²/с и критерий $Pr_{p,i}$ [4].

2. Предварительно принимают значения следующих величин: d , м; $\xi_{ГПР}$, η_H , l , m , ξ , руб/(руб.год); Π_A , руб/м²; $\Pi_{\text{ЭЛ}}$, руб/кВт·ч; τ , ч/год.

3. Вычисляют комплексы \mathcal{E} , A_{2i} , B_{2i} , E_i' для каждой ступени выпаривания.

4. По формулам (176) и (177) определяют оптимальные скорости циркуляции в заданном диапазоне изменения величины коэффициента теплоотдачи при конденсации пара и строят графики функции $W_{\text{опт}} = f(b_i)$, где за постоянные параметры выбраны α_{1i} и t_{pi} (например, для раствора Na₂SO₄, рис. 5).

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

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

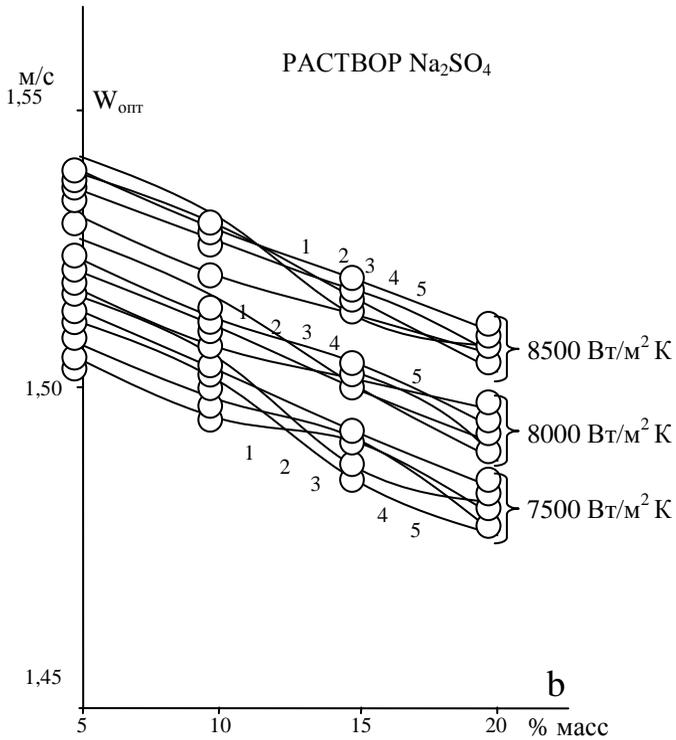


Рис. 5. Температура раствора, °С:
1-100; 2-105; 3-110; 4-115; 5-120

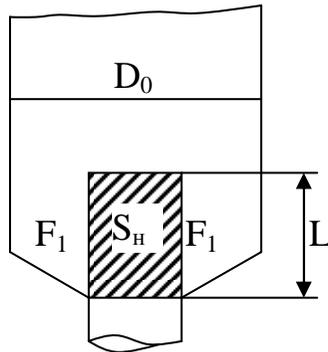


Рис. 6. Конструктивная схема нижней части сепаратора выпарного аппарата

5. 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 3.5.1. рассчитываются: $V'_{ТР}$ - скорость потока на выходе из кипяtilьных труб, м/с; V_P - скорость раствора в трубах, м/с; $V_{СР}$ - средняя логарифмическая скорость потока в трубах, м/с. (формулы 80-82)

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

1. Определяют расход выпариваемого раствора в циркуляционном контуре, кг/с

$$G_2 = \frac{Q}{c_p (t_2'' - t_2')}, \quad (183)$$

где Q - величина теплового потока к выпариваемому раствору, Вт;

c_p - средняя теплоемкость выпариваемого раствора при средней температуре \bar{t}_2 , Дж/(кг·К);

t_2' и t_2'' - соответственно температуры: раствора, поступающего на выпаривание, и раствора на выходе из теплообменных труб греющей камеры, °С (см. раздел 3.5.2).

2. Вычисляют объемную производительность циркуляционного контура выпарного аппарата, м³/с

$$V_p = \frac{G_p}{\rho_p}, \quad (184)$$

где ρ_p - плотность раствора при средней температуре \bar{t}_2 , кг/м³.

3. Вычисляют приведенный коэффициент гидравлического сопротивления циркуляционного контура:

$$\xi_{np} = \xi'_1 \left(\frac{W_1}{W_K} \right)^2 + \xi'_2 \left(\frac{W_2}{W_K} \right)^2 + \dots + \xi'_m \left(\frac{W_m}{W_K} \right)^2 \quad (185)$$

где W_1, \dots, W_m - скорость движения раствора в элементах циркуляционного контура, м/с;

W_K - скорость движения раствора в трубах греющей камеры выпарного аппарата, м/с.

Величину W_i определяют по уравнению неразрывности:

$$G_p = f_i W_i \rho_{p,i} = \text{const}, \text{ кг/с.} \quad (186)$$

где f_i - площадь поперечного сечения элементов циркуляционного контура, м²; (величина f_i типовых аппаратов определяется по эталонным чертежам к каталог-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. 5):

$$\xi'_1 = 1,15C_X \frac{\frac{S_M}{F_1}}{\left(1 - \frac{S_M}{F_1}\right)^3} \left(1 - \frac{2L}{D_0}\right)^{0,33} \quad (187)$$

где C_X - коэффициент лобового сопротивления тела; изменяется в пределах 0,63..0,82 [17];

F_1 - площадь продольного сечения сепаратора за вычетом площади трубы вскипания, м²;

S_M - площадь продольного сечения трубы вскипания, м²;

F_0 - суммарная площадь продольного сечения,

$$F_0 = F_1 + S_M, \text{ м}^2.$$

L - высота трубы вскипания в сепараторе, м;

D_0 - внутренний диаметр сепаратора вторичного пара, м.

В данном случае $W_1 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot F_1}$, м/с.

ξ'_2 - вход раствора из сепаратора в циркуляционную трубу

а) с внезапным сужением потока:

$$\xi_2' = 0,5 \left(1 - \frac{F_M}{F_B} \right) \quad (188)$$

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

где F_M - поперечное сечение циркуляционной трубы, м²;
 F_B - суммарная площадь продольного сечения сепаратора, м², $F_B = F_0$;
 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:

$$\xi_3' = \lambda \frac{l}{d}, \quad (186)$$

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 для $Re_{ж} = 3 \cdot 10^3..10^5$

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re_{ж}^{0,25}} \quad (190)$$

Для $Re_{ж} = 10^5..10^8$ справедлива формула Никурадзе

$$\lambda = 0,0032 + \left(\frac{0,221}{\text{Re}_{\text{ж}}^{0,237}} \right); \quad (191)$$

или для обоих случаев - формула Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{1,82 \cdot \lg(\text{Re}_{\text{ж}} - 1,64)^2}. \quad (192)$$

В формулах (190)-(192) все физические свойства жидкости отнесены к ее средней температуре, °С.

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

$$\lambda = \frac{1}{\left[1,74 + 2 \lg(1/\bar{\Delta}) \right]^2}, \quad (193)$$

где $\bar{\Delta} = \delta/r$ и δ - средняя высота выступов на поверхности трубы, м;
 r - радиус трубы, м;
 ξ'_4 - движение раствора в верхнем колене циркуляционной трубы.

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

$$\xi'_4 = K_{\Delta} \cdot K_{\text{Re}} \cdot \xi_{\text{М}} + \xi_{\text{ТР}}, \quad (194)$$

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

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

Таблица 5

$Re_{ж}$	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

ξ_M - 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

$$\xi_{ТР} = \xi_{ПР} \cdot f \left(\frac{R_0}{d} \right) \quad (195)$$

где $\xi_{\text{ПР}}$ - коэффициент сопротивления трения для прямой трубы. Вычисляется по формуле (189);

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

Таблица 6

$\frac{\xi_{\text{ТР}}}{\xi_{\text{ПР}}}$	2,69	2,26	1,92	1,73	1,58	1,49	1,41	1,36	1,3	1,27
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 (189);

ξ'_6 - движение раствора в отводе нижнего колена циркуляционной трубы. Суммарное сопротивление состоит из местного сопротивления и сопротивления трения при повороте потока на угол $\varphi = 90^\circ$: $\xi'_6 = \xi'_4$;

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].

$$\xi'_7 = \xi_{\text{ВЫХ}} \left(1 - \frac{F_M}{F_B} \right) + \xi_{\text{ТР}}, \quad (196)$$

где F_M - площадь выходного отверстия конфузора, м².

F_B - площадь входного отверстия конфузора, м².

При $\alpha \leq 40^\circ$ коэффициент $\xi_{\text{ВЫХ}}$ определяют по табл. 7.

Таблица 7

l/d_9	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 $d_9 = \frac{4F_M}{\Pi_M}$, м,

где Π_M - периметр выходного отверстия конфузора, м;

l - длина конфузора, м.

Значение $\xi_{\text{ВЫХ}}$ относится к скорости потока в меньшем сечении конфузора F_M ;

Значение $\xi_{\text{ТР}}$ определяют по табл. 8.

Таблица 8

F_B/F_M	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 (189);

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:

$$\xi'_9 = k \cdot \xi_{\text{ВЫХ}} + \xi_{\text{ТР}}; \quad (197)$$

где $\xi_{\text{ВЫХ}}$ - отнесенный к скорости потока в меньшем сечении F_M , определяется при $Re_{\text{Ж}} \geq 3,5 \cdot 10^3$ по табл. 9 в зависимости от отношения сечений диффузора F_M/F_B . $\xi_{\text{ТР}}$ определяется из таблицы 8.

Таблица 9

F_M/F_B	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 $\alpha \geq 40^\circ$ поправочный коэффициент сопротивления при $\xi_{\text{ВЫХ}}$ считать $k = 1$; при $\alpha < 40^\circ$ коэффициент k определяется по табл. 10.

Таблица 10

$\alpha,^\circ$	5	10	15	20	25	30	35	40
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 (188);

ξ'_{11} - движение раствора по теплообменным трубам греющей камеры. Сопротивление трения подсчитывается по формуле (189).

ξ'_{12} - внезапное расширение потока раствора при выходе из теплообменных труб греющей камеры. Суммарное сопротивление состоит из сопротивления от замедления потока и сопротивления трения. Определяется по формуле:

$$\xi'_{12} = \xi_{\text{ВЫХ}} \left(1 - \frac{F_M}{F_B} \right)^2 \quad (198)$$

ξ'_{13} - движение раствора по трубе вскипания. Сопротивление трения и ускорения потока на прямом участке подсчитывается по формуле (189);

ξ'_{14} - движение раствора по трубе вскипания. Сопротивление трения и ускорения потока в верхнем колене подсчитывается по формуле (194);

ξ'_{15} - выход потока раствора на экран сепаратора. Сопротивление от удара потока раствора об отбойник. Определяется по табл. 11 в зависимости от отношения расстояния отбойника h до трубы вскипания к диаметру трубы вскипания D_0 ;

Таблица 11

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] $\xi'_{16} = 2,0$.

Вычисляется общий коэффициент сопротивления циркуляционного контура выпарного аппарата:

$$\xi' = k' \xi'_{\text{ПР}}, \quad (199)$$

где k' - коэффициент учета взаимного влияния элементов при движении раствора по циркуляционному контуру аппарата; для аппаратов нормализованных конструкций величина k' определяется по табл. 12 в зависимости от $Re_{\text{ж}}$.

Таблица 12

$Re_{\text{ж}}$	$10^2 \dots 2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3 \dots 10^4$	$> 10^4$
k'	1,6	1,6..1,25	1,25

Определяется потеря давления при движении раствора по циркуляционному контуру выпарного аппарата (напор циркуляционного насоса):

$$\Delta p_2 = 0,5 \xi' \rho_2 W_2^2 s, \text{ Па}, \quad (200)$$

где W_2 - скорость движения раствора по теплообменным трубкам греющей камеры, м/с.

Коэффициент полезного действия циркуляционных насосов η_H выбирается в соответствии с их универсальными характеристиками. Для типовых горизонтальных осевых насосов $\eta_H = 0,5..0,8$.

Вычисляется мощность на приводе циркуляционного насоса выпарного аппарата, Вт.:

$$N = \frac{V_2 \cdot \Delta p_2}{\eta_H}. \quad (201)$$

6. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ

6.1. 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 ВСтЗсп, ВСтЗпс, ВСтЗгпс, 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 , шт., определяют по вычисленной поверхности теплообмена аппарата F_i , принятых длины труб L и диаметра d по формуле

$$n = \frac{F_i}{\pi d L}, \quad (202)$$

В качестве расчетного диаметра d обычно принимают средний диаметр теплообменных труб.

Для аппаратов с внутренней циркуляционной трубой число теплообменных труб составит

$$n = \frac{F_i - F_{\text{Ц}}}{\pi d_{\text{Ц}} L}, \text{ шт.}, \quad (203)$$

где $F_{\text{Ц}} = \pi d_{\text{Ц}} L$, м², - боковая поверхность циркуляционной трубы;

$d_{\text{Ц}}$ - 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:

$$S = (1,3..1,6) d_{\text{Н}}, \text{ м}, \quad (204)$$

где $d_{\text{Н}}$ - наружный диаметр теплообменной трубы, м.

Внутренний диаметр корпуса паровой греющей камеры определяется по следующей формуле:

$$D_{\text{К}} = (b - 1)S + 21, \text{ м}, \quad (205)$$

где b число труб в диагонали наибольшего правильного шестиугольника, а $l = 1,5d_{\text{Н}}$, м.

Внутренний диаметр корпуса греющей камеры, м, с учетом площади, занимаемой циркуляционной трубой диаметром $d_{Ц}$ и размещением труб по вершинам равносторонних треугольников, определяется из соотношения

$$D_{К} = \left[\frac{1,1nS^2}{\psi} + (d_{Ц} + 2S)^2 \right]^{0,5}, \quad (206)$$

где $\psi = 0,7..0,9$ - коэффициент использования площади трубной решетки.

Рекомендации Главхиммаша по выбору шага между трубами по известному наружному диаметру d_{H} приведены в табл. 16.

Таблица 13

d_{H} , 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.

6.2 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 $\text{м}^3/\text{ч}$ 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 R'_v сильно зависит от давления. Для воды эта зависимость показана на рис. 7.

Для растворов значение R'_v принимают приблизительно равным 0,7..0,8 от R'_v для воды. При давлении 1 бар $R'_v = 1600..1800 \text{ м}^3/(\text{м}^3\text{ч})$. Для выпарных аппаратов с давлением вторичного пара, отличным от атмосферного, в пределах от

0,86 до 16 бар – можно пользоваться для вычисления R_v^* следующей формулой:

$$R_v^* = \varphi R_v' \text{ м}^3 / (\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \quad (207)$$

где φ - поправочный коэффициент, который находят по графику рис. 8.

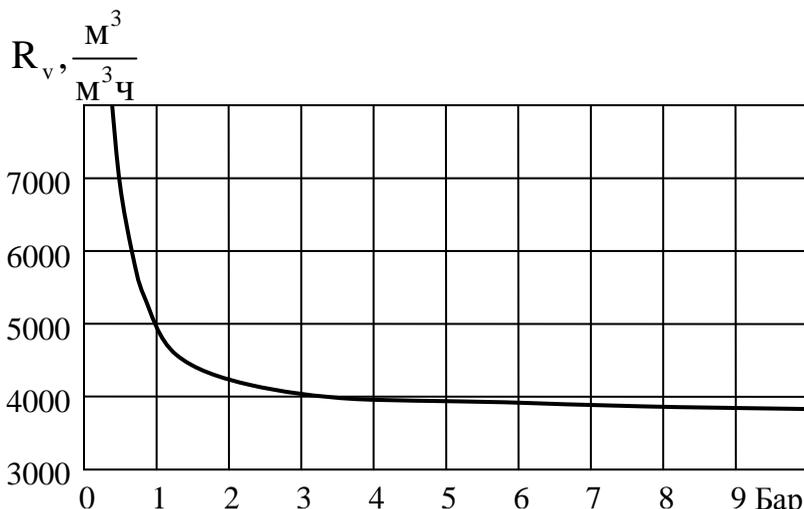


Рис.7. Зависимость предельного объемного напряжения от давления при кипении воды

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 H_v принимается равной не менее 1,5 м.

Для выпарного аппарата паропроизводительностью W , объем пространства вторичного пара определяется по формуле:

$$V_B = \frac{W}{R_v^* \cdot \rho}, \text{ м}^3 \quad (208)$$

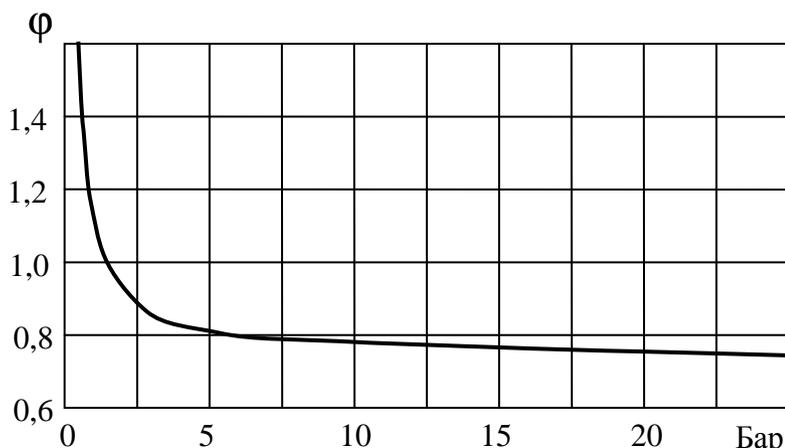


Рис.8. Зависимость коэффициента Φ от давления в выпарном аппарате

Высота пространства вторичного пара

$$H_V = \frac{4V_B}{\pi D_B^2} \geq 1,5, \text{ м} \quad (209)$$

где D_B - диаметр корпуса парового пространства аппарата, м.

Для пенящихся растворов H_V принимается равной 2,5..3 м.

Если принята высота H_V , то диаметр корпуса парового пространства можно определить по формуле:

$$D_B = \left(\frac{1,273V_B}{H_V} \right)^{0,5}, \text{ м} \quad (210)$$

Диаметр сепараторов 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).

6.3 Штуцеры и трубопроводы

Диаметр штуцеров и трубопроводов вычисляется на основании уравнения неразрывности:

$$d_{BH} = \left(\frac{1,273V_C}{W} \right)^{0,5}, \text{ м}, \quad (211)$$

где V_C - секундный объемный расход протекающей среды (пар, раствор, конденсат), м³/с.

$$V_C = \frac{G_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}, \text{ м}^3/\text{с}$$

Вычислив диаметр $d_{\text{вн}}$, 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 разрежением	$W=70..100$ 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.

6.4. Тепловая изоляция выпарных аппаратов

Выпарные аппараты и трубопроводы МВУ, наружная стенка которых имеет температуру выше 50°C 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/м² (табл. П-12 из 8,21).

2. Выбирают материал изоляции и по выбранной температуре на поверхности изоляционного слоя $t_{\text{ИЗ}}$ определяют среднюю температуру последнего $t_{\text{СР}}$, по которой находят соответствующее значение $\lambda_{\text{ИЗ}}$, Вт/(м·К).

3. При расчете изоляции термическим сопротивлением теплоотдачи $1/\alpha_1$ или $1/\pi d_{\text{В}} \alpha_1$ от среды к стенке и самой стенки можно пренебречь. Тогда температуру изолируемой поверхности можно принять равной температуре среды в аппарате или трубопроводе $t_{\text{Ж}}$.

4. Определяют коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности изоляции к воздуху (табл. 18 из 8, 21).

5. Зная $t_{\text{Ж}}$, $t_{\text{ВОЗД}}$, $\lambda_{\text{ИЗ}}$, 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 $t_{\text{ИЗ}}$ и средней температуры изоляционного слоя $t_{\text{СР}}$.

7. Если $t_{\text{ИЗ}}$ и $t_{\text{СР}}$ от предварительного принятого значения отличаются существенно, то есть весь расчет повторяют снова, задавшись новым значением температуры поверхности изоляции $t_{\text{ИЗ}}$. Указанная процедура продолжается до тех пор, пока расхождение температур не будет в допустимых пределах ($\pm 1^\circ \text{C}$). 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.

7. 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].

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». 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Формулы для расчета
нормальной физико-химической температурной депрессии
некоторых растворов

Раствор	Диапазон концентраций b, % мас.	Формула определения Δ_1^H , °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 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	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	$\Delta_1^H = -0,00000163b^4 + 0,00017184b^3 - 0,00394323b^2 + 0,10234514b - 0,1356091$

1	2	3
Бихромат калия $K_2Cr_2O_7$	6...67	$\Delta_1^H = 0,00000102b^4 + 0,00002677b^3 -$ $-0,00024606b^2 + 0,11249895b -$ $-0,30286667$
Нитрат калия KNO_3	1...20	$\Delta_1^H = 0,000983b^2 + 0,801b - 0,00766$
Гидроксид калия KOH	25...80	$\Delta_1^H = 0,0004024b^3 + 0,00060962b^2 -$ $-0,3905351b + 12,7381363$
Сульфат калия K_2SO_4	4...20	$\Delta_1^H = 0,00001928b^3 - 0,00032282b^2 +$ $+0,0697384b - 0,00779982$
Бромид лития LiBr	10...60	$\Delta_1^H = 0,0003291b^3 - 0,007478b^2 +$ $+0,1207b + 0,9271$
Хлорид лития LiCl	10...50	$\Delta_1^H = 0,64889 \cdot \exp(-0,000002332b^3 -$ $-0,00003b^2 + 0,09602b)$
Хлорид магния $MgCl_2$	1...20	$\Delta_1^H = 0,0133b^2 + 0,0562b + 0,0831$
Хлорид натрия NaCl	3...28	$\Delta_1^H = 0,0001438b^3 + 0,0006834b^2 +$ $+0,1732b - 0,02424$
Нитрат натрия $NaNO_3$	1...31	$\Delta_1^H = 0,0000227b^3 + 0,000585b^2 +$ $+0,1106b - 0,0294$
Гидроксид натрия NaOH	3...55	$\Delta_1^H = -0,0000271b^3 + 0,01664b^2 +$ $+0,0731b + 0,3448$

1	2	3
Сульфат натрия Na_2SO_4	2...27	$\Delta_1^H = -0,00038b^3 + 0,00219b^2 + 0,0643b - 0,00906$
Хлорид аммония NH_4Cl	5...40	$\Delta_1^H = -0,0000055b^4 + 0,0004522b^3 - 0,007296b^2 + 0,2197b - 0,1371$
Нитрат аммония NH_4NO_3	10...50	$\Delta_1^H = 0,0000393b^3 - 0,001003b^2 + 0,1436b - 0,2992$
Сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	5...50	$\Delta_1^H = 0,0000285b^3 + 0,000006601b^2 + 0,0686b + 0,04432$
Сульфат цинка ZnSO_4	8...45	$\Delta_1^H = 0,00006829b^3 - 0,00184066b^2 + 0,0522868b - 0,15825403$
Сахароза $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	10...75	$\Delta_1^H = 0,0000496b^3 - 0,003509b^2 + 0,1492b - 1,7318$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Теплофизические свойства воды и некоторых водных растворов нелетучих веществ

Таблица П2.1

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

t , °C	$P \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, 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
($10 \leq t \leq 250$ °С)

1. Плотность:

в диапазоне температур $10 \leq t \leq 160$ °С

$$\rho = 0,0000019t^3 - 0,003227t^2 - 0,12159t + 1001,331, \text{ кг/м}^3;$$

в диапазоне температур $160 \leq t \leq 250$ °С

$$\rho = -0,0024834t^2 - 0,19453t + 1002,6, \text{ кг/м}^3.$$

2. Изобарная теплоемкость:

в диапазоне температур $0 \leq t \leq 20$ °С

$$C_p = -0,0000009t^3 + 0,0000783t^2 - 0,002684t + 4,2118, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

в диапазоне температур $20 \leq t \leq 40$ °С

$$C_p = 0,0000276t^2 - 0,002063t + 4,2112, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

в диапазоне температур $40 < t \leq 160$ °С

$$C_p = 0,0000108t^2 - 0,0007652t + 4,1864, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

в диапазоне температур $160 < t \leq 250$ °С

$$C_p = 0,000032t^2 - 0,007851t + 4,7778, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

3. Теплопроводность:

в диапазоне температур $10 \leq t \leq 60$ °С

$$\lambda = 0,55758 \cdot \exp(0,003827t - 0,000017t^2), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

в диапазоне температур $60 < t \leq 120$ °С

$$\lambda = 0,55492 + 0,002367t - 0,0000106t^2, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

в диапазоне температур $120 < t \leq 250$ °С

$$\lambda = 0,6043314 + 0,0012582t - 0,0000048t^2, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

4. Кинематическая вязкость:

в диапазоне температур $10 \leq t \leq 120$ °С

$$\nu = [(1688,375/t^3) - (400,36/t^2) + (35,506/t) - 0,02934]/10^6, \text{ м}^2/\text{с};$$

в диапазоне температур $120 < t \leq 250$ °С

$$\nu = [1,3339 \cdot \exp(-0,00000007t^3 + 0,00006283t^2 - 0,02039t)]/10^6, \text{ м}^2/\text{с}.$$

5. Коэффициент объемного расширения:

в диапазоне температур $10 \leq t \leq 120$ °C

$$\beta = (0,0000047t^3 - 0,0011894t^2 + 0,1523t - 0,6763) / 10^4, \text{ 1/К};$$

в диапазоне температур $120 < t \leq 250$ °C

$$\beta = [3,4888 \cdot \exp(0,000000076t^3 - 0,00003637t^2 + 0,010908t)] / 10^4, \text{ 1/К}.$$

6. Поверхностное натяжение:

в диапазоне температур $10 \leq t \leq 120$ °C

$$\sigma = [756,49 \cdot \exp(-0,000000013t^3 - 0,000004974t^2 - 0,001886t)] / 10^4, \text{ Н/м};$$

в диапазоне температур $120 < t \leq 250$ °C

$$\sigma = [939,576 \cdot \exp(-0,000000075t^3 - 0,000022944t^2 - 0,006137t)] / 10^4, \text{ Н/м}.$$

7. Критерий Прандтля (Pr):

в диапазоне температур $10 \leq t \leq 120$ °C

$$\text{Pr} = 13,1487 \cdot \exp(-0,000000466t^3 + 0,0001934t^2 - 0,03478t);$$

в диапазоне температур $120 < t \leq 250$ °C

$$\text{Pr} = 12,1183 \cdot \exp(-0,0000001t^3 + 0,0000902t^2 - 0,026845t).$$

Таблица П2.2

Теплофизические свойства водного раствора хлорида кальция
CaCl₂

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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 CaCl₂

Диапазон температур $20 \leq t \leq 120$ °С,
концентраций $5 \leq b \leq 15$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(-0,00945b^3 + 0,208b^2 - 0,522b - 23,942) - t(-0,0000271b^3 - 0,000634b^2 + 0,037b + 0,0867) + (0,0074b^3 - 0,227b^2 + 11,198b + 994,1), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu \cdot 10^6 = (0,000481b^3 - 0,01083b^2 + 0,106b + 1,3723) \cdot \exp[10^{-6} \cdot t^2(0,0347b^3 - 0,6314b^2 + 2,2074b + 88,76) - 10^{-3}t(0,00476b^3 - 0,1014b^2 + 0,479b + 24,76)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_p = 10^{-6} \cdot t^2(0,005234b^3 + 0,077b^2 - 3,77b + 39,474) - 10^{-4}t(0,0112b^3 + 0,037b^2 - 4,827b + 47,883) + (0,000375b^3 + 0,01224b^2 - 0,161b + 4,555), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = t^{-2}(-0,0209b^2 + 0,111b + 62,182) + t^{-1}(-0,000816b^2 + 0,00534b - 5,804) + (0,0000096b^2 - 0,00171b + 0,734), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma \cdot 10^3 = 10^{-7} \cdot t^3(0,0138b^3 - 0,193b^2 + 2,487b + 36,672) - 10^{-5}t^2(0,0213b^3 - 0,119b^2 + 0,163b + 103,24) - t(-0,000049b^3 + 0,00126b^2 - 0,010b + 0,132) + (0,00494b^2 + 0,227b + 75,354), \text{ Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

$$Pr = (-0,000624b^3 + 0,0273b^2 - 0,0417b + 11,912) \cdot \exp[10^{-6} \cdot t^2 \times (-0,131b^2 + 2,377b + 83,413) - 10^{-3}t(0,00876b^3 - 0,28b^2 + 2,638b + 20,555)].$$

Таблица П2.3

Теплофизические свойства водного раствора нитрата кальция
 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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
$\nu \cdot 10^6$	$\text{м}^2/\text{с}$	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	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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 табл. П2.3

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 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Диапазон температур $20 \leq t \leq 120$ °С,
концентраций $5 \leq b \leq 50$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(-0,003007b^3 + 0,1737b^2 - 3,5975b + 5,54) - 10^{-2} t \times \\ \times (-0,005171b^3 + 0,293b^2 - 5,044b + 56,095) + (0,0004205b^3 + \\ + 0,0419b^2 + 7,0378b + 1008,45), \text{ кг/м}^3;$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(-0,0003241b^3 - 0,007977b^2 + 1,802b - 65,366) - \\ - 10^{-2} t(-0,0002242b^3 - 0,02013b^2 + 2,8445b - 32,284) + \\ + (0,0004205b^3 + 0,0419b^2 + 7,0378b + 1008,45), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 20$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = [1,434 \cdot \exp(0,0001392b^3 - 0,002974b^2 + 0,02291b)] \times \\ \times \exp\{[-11,2957 \times 10^{-7} t^3 \cdot \exp(0,001076b^3 - 0,02353b^2 - \\ - 0,06711b)] + [23,6365 \cdot 10^{-5} t^2 \cdot \exp(0,0005893b^3 - 0,01155b^2 - \\ - 0,04516b)] - 28,4696 \cdot 10^{-3} t \cdot \exp(0,000193b^3 - 0,003849b^2 - \\ - 0,004453b)\}, \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $20 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = [1,129 \cdot \exp(0,00000129b^3 + 0,000391b^2 + 0,02272b)] * \\ * \exp[10^{-7} t^3 (-0,0000166b^3 + 0,00455b^2 - 0,2198b + 1,3896) + \\ + 10^{-5} t^2 (-0,001796b^3 + 0,1717b^2 - 5,0b + 56,207) - 10^{-3} t * \\ * (-0,001082b^3 + 0,1015b^2 - 2,6581b + 47,374)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

$$C_p = 10^{-5} \cdot t^2 (0,00001213b^3 - 0,00838b^2 + 0,1325b + 1,132) - \\ - 10^{-3} t (0,0002816b^3 - 0,01782b^2 + 0,287b + 0,7113) + (0,00000401b^3 - \\ - 0,0002588b^2 - 0,02783b + 4,167), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$C_p = 10^{-5} \cdot t^2 (-0,0000112b^3 - 0,000501b^2 + 0,1087b - 1,6655) - 10^{-3} t (0,0000041b^3 - 0,001432b^2 + 0,1564b - 0,405) + \\ + (0,00000401b^3 - 0,0004915b^2 - 0,009538b + 3,829), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\lambda = t^{-3} (0,0441b^3 - 1,1553b^2 + 24,1634b - 383,172) + \\ + t^{-2} (-0,00355b^3 + 0,09092b^2 - 2,131b + 91,665) - \\ - t^{-1} (-0,0000985b^3 + 0,003095b^2 - 0,0771b + 6,4323) + \\ + (-0,000000601b^3 + 0,0000148b^2 - 0,001643b + 0,736), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\lambda = t^{-3} (1,09145b^2 - 138,368b + 3661,283) + t^{-2} (-0,0002204b^3 - \\ - 0,04774b^2 + 9,1344b - 211,394) - t^{-1} (0,0000033b^3 - \\ - 0,00161b^2 + 0,2033b - 0,4917) + (0,0000017b^3 - 0,0002255b^2 + \\ + 0,008285b + 0,5888), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

диапазон концентраций $5 \leq b \leq 50$ % 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 $5 \leq b \leq 20$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,0013735b^3 - 0,03368b^2 + 0,4474b + 8,977) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2 * \\ * (-0,0006422b^3 + 0,0131b^2 + 0,1368b + 6,093) - \\ - 10^{-3} t(0,0002175b^3 - 0,00684b^2 + 0,2957b + 23,163)];$$

а) диапазон концентраций $20 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,0025856b^3 - 0,1947b^2 + 5,7131b - 41,618) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2 * \\ * (-0,0003527b^3 + 0,02742b^2 - 0,5339b + 11,4587) - \\ - 10^{-3} t(-0,0000513b^3 - 0,00437b^2 + 0,6773b + 16,694)].$$

Таблица П2.4

Теплофизические свойства водного раствора нитрата калия
 KNO_3

Теплофизические свойства(символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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
$\nu \cdot 10^6$	$\text{м}^2/\text{с}$	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	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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 $20 \leq t \leq 120$ °С, концентраций $5 \leq b \leq 15$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(0,0093b^3 - 0,190b^2 + 1,354b - 31,533) - 10^{-2}t(-0,011b^3 + 0,414b^2 - 3,004b + 23,7) + (0,384b^3 - 11,49b^2 + 112,37b + 710,07), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu \cdot 10^6 = (0,00031b^3 - 0,0056b^2 - 0,018b + 1,796) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3(-0,0012b^3 - 0,00121b^2 + 0,79b - 6,54) + 10^{-5}t^2(0,000335b^3 + 0,096b^2 - 2,872b + 25,46) - 10^{-3}t(0,011b^3 - 0,243b^2 + 0,57b + 29,197)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_p = 10^{-6} \cdot t^2(-0,0059b^3 - 0,107b^2 + 3,0965b + 10,63) - 10^{-4}t(-0,0123b^3 + 0,0187b^2 + 2,263b + 14,482) + (0,001b^3 - 0,0309b^2 + 0,259b + 3,387), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = t^{-3}(-8,619b^2 + 185,13b - 539,73) + t^{-2}(0,612b^2 - 13,185b + 95,82) - t^{-1}(0,0099b^2 - 0,22b + 6,093) + (0,000042b^2 - 0,0028b + 0,733), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma \cdot 10^3 = 10^{-6} \cdot t^3(0,0000001b^3 + 0,05b^2 - 1,53b + 4,50) + 10^{-6}t^2(0,156b^3 - 16,462b^2 + 400,91b - 1535,23) - 10^{-2}t(0,0036b^3 - 0,191b^2 + 3,397b + 3,39) + (0,00196b^3 - 0,0773b^2 + 1,224b + 72,267), \text{ Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

$$\text{Pr} = (-0,00252b^3 + 0,086b^2 - 1,052b + 14,89) \cdot \exp[10^{-8} \cdot t^3 (-0,0111b^3 + 0,0377b^2 + 7,83b - 71,708) + 10^{-5} t^2 (0,0038b^3 - 0,0548b^2 - 1,086b + 21,49) - 10^{-3} t (-0,00428b^3 + 0,1645b^2 - 2,54b + 39,474)].$$

Таблица П2.5

Теплофизические свойства водного раствора сульфата меди
CuSO₄

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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 CuSO₄

Диапазон температур $20 \leq t \leq 120$ °С, концентраций $5 \leq b \leq 15$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(-0,000397b^3 - 0,0104b^2 + 0,0467b - 20,905) - 10^{-2}t(0,0131b^3 - 0,392b^2 + 3,844b + 15,416) + (0,364b^3 - 10,83b^2 + 109,96b + 732,5), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu \cdot 10^6 = (0,000816b^3 - 0,0204b^2 + 0,222b + 1,197) * \exp[10^{-6} \cdot t^2(-0,0194b^3 + 0,777b^2 - 8,44b + 113,99) - 10^{-3}t(0,0138b^3 - 0,364b^2 + 2,996b + 18,803)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_p = 10^{-6} \cdot t^2(0,000691b^3 - 0,0687b^2 + 0,59b + 14,48) - 10^{-4}t(-0,00486b^3 + 0,101b^2 - 1,606b + 45,08) + (-0,000384b^3 + 0,0116b^2 - 0,156b + 4,526), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = t^{-3}(8,0173b^2 - 123,25b + 132,504) + t^{-2}(-0,581b^2 + 7,898b + 63,02) - t^{-1}(-0,00911b^2 + 0,069b + 6,355) + (-0,0000056b^2 - 0,00208b + 0,741), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma \cdot 10^3 = (0,019b^3 - 0,583b^2 + 5,758b + 59,328) - t(-0,0000029b^3 + 0,0000464b^2 + 0,000334b + 0,13), \text{ Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

$$Pr = (0,0383b^2 - 0,162b + 14,23) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2(0,004b^3 - 0,0789b^2 + 0,382b + 10,219) - 10^{-3}t(0,00283b^3 - 0,0097b^2 - 0,478b + 33,4)].$$

Таблица П2.6

Теплофизические свойства
водного раствора бромида лития LiBr

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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 табл. П2.6

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 $20 \leq t \leq 120$ °С,
концентраций $10 \leq b \leq 60$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % 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 $30 \leq b \leq 60$ % 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 $10 \leq b \leq 30$ % 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 $30 \leq b \leq 60$ % 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 $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$C_p = 10^{-8} \cdot t^3(-0,001497b^3 - 0,006791b^2 + 2,0379b - 13,343) + 10^{-7}t^2(0,02188b^3 + 0,04872b^2 - 24,0916b + 220,029) + 10^{-5}t(-0,005678b^3 + 0,05939b^2 + 1,6168b + 11,4453) + (0,0000956b^3 - 0,00545b^2 + 0,0456b + 3,7664), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 60$ % мас.

$$C_p = 10^{-8} \cdot t^3(0,004043b^3 - 0,5759b^2 + 26,5095b - 384,879) + 10^{-7}t^2(-0,07247b^3 + 10,1049b^2 - 456,447b + 6687,43) + 10^{-5}t(0,03467b^3 - 4,5983b^2 + 198,698b - 2798,325) + (0,000002503b^3 + 0,000532b^2 - 0,06482b + 4,3446), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\lambda = 10^{-4}t(0,0002974b^3 - 0,01978b^2 + 0,4423b + 5,9562) + (-0,0000141b^3 + 0,0008631b^2 - 0,01917b + 0,6752), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 60$ % мас.

$$\lambda = 10^{-4}t(0,0000664b^3 - 0,007465b^2 + 0,2625b + 6,5076) + (-0,000000913b^3 + 0,0001119b^2 - 0,007358b + 0,6388), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3 = (-0,0003872b^3 + 0,03303b^2 - 0,4893b + 79,8832) - t(-0,000003356b^3 + 0,0003271b^2 - 0,01026b + 0,2381), \text{ Н/м};$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 60$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3 = (-0,0004016b^3 + 0,0529b^2 - 1,8896b + 104,4095) - t(-0,000006485b^3 + 0,0008165b^2 - 0,0358b + 0,6483), \text{ Н/м}.$$

б. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\text{Pr} = (-0,0003542b^3 + 0,02036b^2 - 0,3593b + 14,3066) * \exp[10^{-8} \cdot t^3(0,002314b^3 - 0,03294b^2 - 1,1866b + 28,9635) + 10^{-5} t^2(-0,0003948b^3 - 0,003637b^2 + 0,4788b + 1,1095) - 10^{-3} t(0,0001074b^3 - 0,02718b^2 + 0,7152b + 19,9708)];$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 60$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,00694b^3 - 0,8019b^2 + 30,9703b - 382,5) * \exp[10^{-8} \cdot t^3(0,003338b^3 - 0,4837b^2 + 18,1682b - 173,6501) + 10^{-5} t^2(0,0003395b^3 - 0,03473b^2 + 1,9518b - 34,925) - 10^{-3} t(0,0014501b^3 - 0,1779b^2 + 7,6555b - 88,830)].$$

Таблица П2.7

Теплофизические свойства водного раствора хлорида лития
LiCl

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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 табл. П2.7

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 $20 \leq t \leq 120$ °С, концентраций $10 \leq b \leq 50$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2 (-0,001755b^3 + 0,08522b^2 - 1,328b - 16,701) - t(0,000012b^3 - 0,0009341b^2 + 0,0229b + 0,0949) + (0,03917b^3 - 2,3278b^2 + 18,4541b + 769,869), \text{ кг/м}^3;$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2 (-0,0001719b^3 - 0,003936b^2 + 0,9563b - 47,736) - t(-0,000000501b^3 - 0,0001827b^2 + 0,01867b - 0,1315) + (0,003182b^3 - 0,3403b^2 + 19,5195b + 820,893), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0001456b^3 + 0,00295b^2 - 0,1042b + 2,6277) \cdot \exp[10^{-7}t^3 * (-0,0006392b^3 + 0,003755b^2 + 1,1648b - 18,745) + 10^{-5}t^2 * (0,0008944b^3 + 0,00723b^2 - 2,4479b + 45,781) - 10^{-3}t(0,001131b^3 - 0,0154b^2 - 1,3349b + 47,416)], \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0006226b^3 + 0,00869b^2 - 2,1314b + 45,399) \cdot \exp[10^{-7}t^3 * \\ * (0,0000611b^3 + 0,003714b^2 - 1,0722b + 29,642) + 10^{-5}t^2(-0,0001548b^3 - \\ - 0,0179b^2 + 3,2026b - 72,793) - 10^{-3}t(-0,0002733b^3 + 0,01122b^2 + \\ + 1,2472b - 16,0912)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$C_p = 10^{-5}t^2(-0,0000076b^3 + 0,002408b^2 - 0,05189b + 1,3358) - 10^{-4}t * \\ * (0,0000353b^3 + 0,003356b^2 - 0,08721b + 2,6131) + (0,0000284b^3 - \\ - 0,0009236b^2 + 0,0375b + 4,146), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$C_p = 10^{-5}t^2(-0,0000289b^3 - 0,0005773b^2 + 0,1885b - 2,6136) + 10^{-4}t * \\ * (0,0004984b^3 + 0,01179b^2 - 2,899b + 53,931) + (-0,0000024b^3 + \\ + 0,0001313b^2 - 0,0246b + 3,642), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\lambda = t^{-3}(-0,02942b^3 - 0,2818b^2 + 125,56b - 3632,584) + t^{-2}(0,007823b^3 - \\ - 0,3104b^2 - 4,5296b + 343,825) - t^{-1}(0,000193b^3 - 0,008817b^2 - \\ - 0,08065b + 12,6131) + (0,0000079b^3 - 0,0005013b^2 + 0,005014b + \\ + 0,719), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\lambda = t^{-3}(6,768b^2 - 474,453b + 7228,57) + t^{-2}(-0,004551b^3 - 0,08168b^2 + \\ + 22,8387b - 394,003) - t^{-1}(-0,0001169b^3 - 0,001693b^2 + 0,5743b - \\ - 5,077) + (-0,00000181b^3 + 0,0000908b^2 - 0,00373b + 0,7138), \\ \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3 = 10^{-6} \cdot t^3(-0,000304b^3 + 0,007241b^2 - 0,6144b + 7,1241) + 10^{-4}t^2 * \\ * (0,0005769b^3 - 0,0001477b^2 + 0,7454b - 18,219) + 10^{-2}t(-0,0000487b^3 - \\ - 0,01862b^2 + 0,2617b - 4,2336) + (0,002423b^3 - 0,1403b^2 + 3,1081b + \\ + 57,46), \text{ Н}/\text{м};$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3 = 10^{-6} \cdot t^3 (-0,0002461b^3 - 0,01146b^2 + 2,8032b - 80,132) + 10^{-4} t^2 * \\ * (0,0003951b^3 + 0,01447b^2 - 4,2003b + 121,917) + 10^{-2} t (-0,0001363b^3 - \\ - 0,006304b^2 + 1,6863b - 55,691) + (0,0001424b^3 - 0,01263b^2 + 1,102b + \\ + 64,3085), \text{ Н/м.}$$

б. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,002103b^3 - 0,03451b^2 + 0,1647b + 14,949) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * \\ * (-0,0005043b^3 - 0,00364b^2 + 1,3122b - 19,854) + 10^{-5} t^2 (0,0006577b^3 + \\ + 0,01984b^2 - 2,6763b + 48,354) - 10^{-3} t (0,002361b^3 - 0,09111b^2 + \\ + 0,0769b + 43,2117)];$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,005524b^3 + 0,2743b^2 - 32,9022b + 636,65) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * \\ * (-0,0000047b^3 + 0,003816b^2 - 0,8277b + 24,1433) + 10^{-5} t^2 * \\ * (0,0000267b^3 - 0,02051b^2 + 2,7226b - 60,033) - 10^{-3} t (0,0001569b^3 - \\ - 0,02651b^2 + 2,3358b - 23,1736)].$$

Таблица П2.8

Теплофизические свойства
водного раствора хлорида магния $MgCl_2$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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 $20 \leq t \leq 120$ °С, концентраций $5 \leq b \leq 15$ % 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/м³.

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0000653b^3 + 0,00438b^2 - 0,00616b + 1,869) \cdot \exp[10^{-6} \cdot t^2 * (0,00704b^3 + 0,207b^2 - 7,762b + 140,15) - 10^{-3}t(0,00445b^3 - 0,0788b^2 + 0,0522b + 30,60)],$$
 м²/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:

$$\sigma \cdot 10^3 = 10^{-6} \cdot t^3(0,000236b^3 - 0,0251b^2 + 0,535b - 0,277) - 10^{-5}t^2 * (-0,031b^3 + 0,188b^2 + 7,29b + 20,56) - t(0,000016b^3 + 0,000495b^2 - 0,0133b + 0,20) + (-0,000626b^3 + 0,05b^2 - 0,452b + 78,95),$$
 Н/м.

6. Критерий Прандтля:

$$Pr = (0,0032b^3 - 0,0556b^2 + 0,906b + 11,04) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2(0,00081b^3 - 0,009b^2 - 0,857b + 12,555) - 10^{-3}t(0,0093b^3 + 0,252b^2 + 2,088b + 27,796)].$$

Таблица П2.9

Теплофизические свойства водного раствора хлорида натрия
NaCl

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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 $20 \leq t \leq 120$ °С, концентраций $5 \leq b \leq 20$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = (0,0000328b^3 + 0,008679b^2 + 0,16454b + 994,365) + b[7,9685 * \exp(0,0000144t^2 - 0,002342t)], \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 10$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (-0,001072b^2 + 0,05338b + 1,5276) \cdot \exp[10^{-7}t^2(-738731,2/b^3 + 154305/b^2 - 2446,95/b + 2194,7) - 10^{-9}t^3(-653448,6/b^3 + 177087,3/b^2 - 12150,4/b + 1206,35) - 10^{-5}t(197701,7/b^3 - 146091,7/b^2 + 26570,1/b + 1986,3)], \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $10 < b \leq 20$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0325b + 1,6297) \cdot \exp[10^{-7}t^2(-2,1282b^2 - 46,974b + 3425,3) - 10^{-9}t^3(-0,6993b^2 - 47,498b + 1649,2) - 10^{-5}t(-2,204b^2 + 18,635b + 3417,2)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_p = (-0,001343b^2 - 0,011b + 4,1266) \cdot \exp[10^{-6}t^2(0,00594b^3 - 0,1682b^2 + 0,816b + 0,5932) - 10^{-4}t(0,007915b^3 - 0,2541b^2 + 1,802b + 3,596)], \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = (-0,0000066b^3 - 0,0000441b^2 + 0,00187b + 0,5486) + 10^{-3}t * (0,0001456b^3 - 0,0045b^2 + 0,04124b + 1,90) - 10^{-5}t^2(0,0000266b^3 - 0,001b^2 + 0,0143b + 1,14), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma \cdot 10^3 = (-0,00023b^3 + 0,0194b^2 - 0,1476b + 78,252) - 0,16t \cdot \exp(-0,0000728b^3 + 0,000568b^2 + 0,0025b), \text{ Н/м.}$$

6. Критерий Прандтля:

$$\text{Pr} = (0,000815b^3 - 0,0079b^2 + 0,0546b + 12,81) \cdot \exp[10^{-9} \cdot t^3(-0,16b^3 + 2,60b^2 + 12,601b - 513,0) + 10^{-5} t^2(0,00254b^3 - 0,028b^2 - 0,514b + 20,694) - 10^{-3} t(0,00128b^3 - 0,0027b^2 - 0,541b + 35,431)].$$

Таблица П2.10

Теплофизические свойства водного раствора хлорида аммония
NH₄Cl

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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
ν · 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	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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
σ · 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 $20 \leq t \leq 120$ °С, концентраций $5 \leq b \leq 25$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(0,006546b^3 - 0,3724b^2 + 7,2143b - 58,3894) - t(0,0000831b^3 - 0,004748b^2 + 0,0892b - 0,2244) + (0,001732b^3 - 0,1108b^2 + 4,9917b + 994,722), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 15$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0001617b^3 - 0,005803b^2 + 0,0494b + 1,4307) \cdot \exp[10^{-7}t^3 * (0,001561b^3 - 0,002256b^2 - 0,4494b - 0,0219) + 10^{-5}t^2(-0,00561b^3 + 0,07406b^2 + 0,2387b + 8,8175) - 10^{-3}t(-0,002246b^3 + 0,01775b^2 + 0,09244b + 24,5255)], \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $15 \leq b \leq 25$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (-0,0000192b^3 + 0,002132b^2 - 0,06151b + 1,9201) \cdot \exp[10^{-7}t^3 * (-0,0003537b^3 - 0,007393b^2 + 0,6222b - 8,4766) + 10^{-5}t^2(0,0002515b^3 + 0,01197b^2 - 0,8038b + 18,6446) - 10^{-3}t(-0,0001171b^3 + 0,0245b^2 - 0,9522b + 31,4931)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 15$ % мас.

$$C_p = 10^{-5}t^2(0,0002973b^3 - 0,00632b^2 - 0,02324b + 1,927) - 10^{-3}t * (0,0003198b^3 - 0,009848b^2 + 0,03656b + 1,927) + (-0,001694b^3 + 0,05073b^2 - 0,4949b + 5,4599), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) диапазон концентраций $15 < b \leq 25$ % мас.

$$C_p = 10^{-5}t^2(-0,0000531b^3 + 0,003787b^2 - 0,09342b + 1,888) - 10^{-3}t * (-0,0000979b^3 - 0,001359b^2 + 0,20b - 1,0236) + (-0,0001714b^3 + 0,01001b^2 - 0,2142b + 5,2727), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 15$ % мас.

$$\lambda = t^{-3}(-1,492b^2 + 72,723b - 316,023) + t^{-2}(0,009317b^3 - 0,09477b^2 - 5,1517b + 85,489) - t^{-1}(0,001292b^3 - 0,03303b^2 + 0,1182b + 5,5766) + (0,0001111b^3 - 0,003303b^2 + 0,0249997b + 0,653285), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

б) диапазон концентраций $15 < b \leq 25$ % мас.

$$\lambda = t^{-3}(-0,08867b^3 - 1,335b^2 + 116,683b - 711,471) + t^{-2}(0,005899b^3 + 0,05263b^2 - 5,8237b + 73,939) - t^{-1}(0,0001294b^3 - 0,003871b^2 + 0,05783b + 3,843) + (-0,0000024b^3 + 0,00017776b^2 - 0,007417b + 0,7397), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

диапазон концентраций $15 < b \leq 25$ % мас

$$\sigma \cdot 10^3 = (0,0004531b^3 + 0,01929b^2 - 0,01477b + 76,054) - t * (-0,000003701b^3 + 0,00017b^2 - 0,001457b + 0,1679), \text{ Н}/\text{м}.$$

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 15$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,0012634b^3 - 0,0445905b^2 + 0,398464b + 10,569343) * \exp[10^{-7} \cdot t^3 (0,0001321b^3 + 0,007235b^2 - 0,217655b - 0,75912) + 10^{-5} t^2 (-0,002247b^3 + 0,0348341b^2 - 0,037506b + 11,50365) - 10^{-3} t (0,0098771b^3 - 0,3237045b^2 + 2,9958b + 20,55474)];$$

б) диапазон концентраций $15 \leq b \leq 25$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,0000292b^3 - 0,0017334b^2 + 0,0209405b + 10,754821) * \exp[10^{-7} \cdot t^3 (0,0003899b^3 + 0,0040659b^2 - 0,4060396b + 1,913223) + 10^{-5} t^2 (-0,0008614b^3 - 0,0089041b^2 + 0,877949b + 2,93664) - 10^{-3} t * (-0,0017734b^3 + 0,074738b^2 - 1,166569b + 32,6612)].$$

Таблица П2.11

Теплофизические свойства водного раствора нитрата аммония
 NH_4NO_3

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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 $20 \leq t \leq 120$ °C

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2 (-0,001519b^3 - 0,002613b^2 + 3,0167b - 51,1533) - 10^{-2} t * (-0,0002301b^3 - 0,166b^2 + 8,3382b - 43,1387) + (-0,01018b^3 + 0,492b^2 - 1,8317b + 1024,0), \text{ кг/м}^3;$$

б) диапазон концентраций $30 < b \leq 50$ % мас.

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2 (-0,000296b^3 - 0,009108b^2 + 2,1791b - 53,201) - 10^{-2} t * (-0,000210b^3 - 0,0380b^2 + 4,4481b - 42,1928) + (0,0005457b^3 - 0,06849b^2 + 7,7952b + 949,95), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0,000001101b^3 - 0,000938b^2 + 0,02947b + 1,1752) \cdot \exp[10^{-7} t^3 * (0,0007773b^3 + 0,0006061b^2 - 0,9724b + 7,7956) + 10^{-5} t^2 (0,001172b^3 - 0,02759b^2 + 2,4849b - 12,7226) - 10^{-3} t (-0,000493b^3 - 0,02474b^2 + 1,4293b + 10,6277)], \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0,00001070b^3 - 0,0002704b^2 - 0,01297b + 1,5882) \cdot \exp[10^{-7} t^3 * (-0,0000249b^3 + 0,0005889b^2 - 0,1231b + 3,9945) + 10^{-5} t^2 * (0,0001342b^3 - 0,006664b^2 + 0,2707b - 0,3967) - 10^{-3} t (0,0000811b^3 + 0,00236b^2 - 0,3889b + 25,2782)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$C_p=10^{-7}t^3(-0,000008209b^3-0,003846b^2+0,1443b-2,5547)-10^{-5}t^2* \\ *(0,000242b^3-0,00306b^2-0,1889b+7,2117)-10^{-3}t(0,0002225b^3- \\ -0,001529b^2-0,3154b+8,7591)+(-0,0000001866b^3+0,0001112b^2- \\ -0,03288b+4,3212), \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$C_p=10^{-7}t^3(0,00001043b^3-0,00009653b^2-0,002917b-2,0165)+10^{-5}t^2* \\ *(0,00002952b^3-0,0006137b^2-0,1873b+10,6997)-10^3t* \\ *(0,0000136b^3+0,003185b^2-0,3908b+12,4187)+ \\ +(-0,000008707b^3+0,001192b^2-0,07932b+4,97245), \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\lambda=t^{-3}(-0,04014b^3-0,5054b^2+130,25b-2197,49)+t^{-2}(0,005706b^3- \\ -0,05545b^2-10,366b+245,723)-t^{-1}(0,0001453b^3-0,0003995b^2- \\ -0,3155b+10,511)+(-0,0000019b^3+0,0001625b^2- \\ -0,008056b+0,781), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K});$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\lambda=t^{-3}(0,00698b^3+0,1442b^2-46,4801b+1247,56)+t^{-2}(-0,0006304b^3- \\ -0,004759b^2+3,1439b-34,11)-t^{-1}(-0,000040b^3+0,003047b^2- \\ -0,07911b+5,3223)+(0,0000008b^3+0,0000741b^2- \\ -0,005721b+0,759), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3=(0,0003985b^3-0,02551b^2+0,6797b+72,409)-t(0,0000053b^3- \\ -0,000359b^2+0,007556b+0,1232), \text{ Н}/\text{м};$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3=(-0,0002217b^3+0,02648b^2-0,8215b+87,405)-t(0,000000201* \\ *b^3-0,0000435b^2+0,002671b+0,1218), \text{ Н}/\text{м}.$$

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\begin{aligned} Pr = & (0,0000831b^3 - 0,01071b^2 + 0,2836b + 8,9343) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * \\ & * (0,0006157 b^3 + 0,0003069b^2 - 0,8162b + 5,066) + 10^{-5} t^2 (-0,001147b^3 - \\ & 0,009732b^2 + 1,8414b - 3,679) - 10^{-3} t (-0,001386b^3 + 0,03793b^2 + \\ & + 0,1036b + 24,292)]; \end{aligned}$$

б) диапазон концентраций $30 \leq b \leq 50$ % мас.

$$\begin{aligned} Pr = & (0,0000224b^3 + 0,005326b^2 - 0,3995b + 16,639) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * \\ & * (-0,0000527b^3 + 0,001083b^2 + 0,1934b - 7,8733) + 10^{-5} t^2 * \\ & * (0,0000777b^3 + 0,002359b^2 - 0,617b + 26,1157) - 10^{-3} t * \\ & * (0,0001084b^3 - 0,003557b^2 - 0,2892b + 33,058)]. \end{aligned}$$

Таблица П2.12

Теплофизические свойства водного раствора
сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Диапазон температур $20 \leq t \leq 120$ °С,
концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(-0,0018454b^3 + 0,06162b^2 + 0,2023b - 25,089) - 10^{-2} t * (-0,002135b^3 + 0,07437b^2 + 0,01187b + 20,7584) + (-0,0006548b^3 + 0,02228b^2 + 5,72b + 1004,42), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0000404b^3 - 0,0005545b^2 + 0,02618b + 1,4656) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2 * (0,0003647b^3 - 0,02601b^2 + 0,5526b + 4,064) - 10^{-3} t(0,0002024b^3 - 0,01795b^2 + 0,3995b + 21,1715)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_p = 10^{-5} \cdot t^2(0,00000601b^3 + 0,00211b^2 - 0,1218b + 3,096) - 10^{-3} t * (-0,0000279b^3 + 0,003324b^2 - 0,1271b + 3,4612) + (-0,0000687b^3 + 0,003933b^2 - 0,09096b + 4,434), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = t^{-3}(-0,29656b^3 + 12,476b^2 - 130,2801b + 349,159) + t^{-2}(0,02142b^3 - 0,8457b^2 + 7,5135b + 42,285) - t^{-1}(0,0003309b^3 - 0,010b^2 + 0,006203b + 5,7686) + (-0,00000981b^3 + 0,0005869b^2 - 0,01225b + 0,7683), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma \cdot 10^3 = (-0,0002637b^3 + 0,01257b^2 + 0,0374b + 76,808) - t * (-0,00004801b^3 + 0,000237b^2 - 0,002526b + 0,1721), \text{ Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

$$\text{Pr} = (0,0001657b^3 + 0,003507b^2 + 0,09307b + 11,2534) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2 * (-0,0000771b^3 - 0,002047b^2 + 0,1542b + 6,6813) - 10^{-3} t(-0,0002693b^3 + 0,007113b^2 - 0,007256b + 26,152)].$$

Таблица П2.13

Теплофизические свойства водного раствора нитрата натрия
 NaNO_3

Теплофизические свойства(символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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
$\nu \cdot 10^6$	$\text{м}^2/\text{с}$	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 $20 \leq t \leq 120$ °С,
концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(-0,00338b^3 + 0,163b^2 - 1,456b - 22,538) - 10^{-2}t(-0,00374b^3 + 0,175b^2 - 0,627b + 22,354) + (-0,000737b^3 + 0,0708b^2 + 6,317b + 1004,72), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0000282b^3 - 0,000737b^2 - 0,00952b + 1,738) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * (-0,00175b^3 + 0,0698b^2 - 0,275b - 6,140) + 10^{-5}t^2(0,00374b^3 - 0,138b^2 + 0,526b + 19,01) - 10^{-3}t(0,00167b^3 - 0,0618b^2 - 0,053b + 31,06)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_p = 10^{-5} \cdot t^2(0,000031b^3 - 0,0168b^2 + 0,198b + 4,032) - 10^{-3}t(0,000352b^3 - 0,0184b^2 + 0,186b + 4,745) + (0,0000105b^3 - 0,000488b^2 - 0,0245b + 4,233), \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = t^{-3}(0,641b^2 - 14,706b - 523,12) + t^{-2}(-0,0584b^2 - 1,281b + 104,2) - t^{-1}(-0,00156b^2 + 0,0282b + 6,674) + (-0,0000177b^2 - 0,000805b + 0,739), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma \cdot 10^3 = (0,007b^3 - 0,243b^2 + 2,578b + 69,77) - t(-0,000015b^3 + 0,000478b^2 - 0,00458b + 0,181), \text{ Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

$$\text{Pr} = (-0,000051b^3 + 0,00606b^2 - 0,169b + 13,148) \cdot \exp[10^{-7} \cdot t^3 * \\ *(0,000112b^3 - 0,0131b^2 + 0,487b - 6,8) + 10^{-4} t^2 (0,000001b^3 + \\ + 0,00156b^2 - 0,09b + 2,233) - 10^{-2} t (-0,000015b^3 + 0,00188b^2 - \\ - 0,0814b + 3,622)].$$

Теплофизические свойства водного раствора
гидроксида натрия NaOH

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	массовая концентрация, %	Температура, °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
$\nu \cdot 10^6$	$\text{м}^2/\text{с}$	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	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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 табл. П2.14

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 $20 \leq t \leq 120$ °С,
концентраций $5 \leq b \leq 50$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = 10^{-4} \cdot t^2(-0,0008b^3 + 0,0663b^2 - 1,205b - 10,788) - 10^{-2}t(-0,000855b^3 + 0,0644b^2 - 0,496b + 35,398) + (-0,000647b^3 + 0,030b^2 + 10,70b + 1007,68), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\nu \cdot 10^6 = (0,00431b^3 - 0,1307b^2 + 1,365b - 2,149) \cdot \exp[10^{-5}t^2(0,001055b^3 - 0,0337b^2 + 0,701b + 4,384) - 10^{-3}t(0,00165b^3 - 0,0323b^2 + 0,741b + 21,52)], \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $30 < b \leq 50$ % мас.

$$v \cdot 10^6 = [28,1865 \cdot \exp(0,00000616b^3 + 0,000442b^2 - 0,00924b)] * \\ * \exp\{[10^{-5}t^2 (270,58 \cdot \exp(0,000013b^3 + 0,000326b^2 - 0,103b)] - \\ - [127,2 \cdot 10^{-3}t \cdot \exp(0,0000112b^3 - 0,000411b^2 - 0,0232b)]\}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

$$C_p = 10^{-5} \cdot t^2 (0,0000426b^3 - 0,00256b^2 - 0,011b + 2,234) - 10^{-3}t * \\ * (0,000137b^3 - 0,00694b^2 + 0,0282b + 2,477) + (0,00000301b^3 - \\ - 0,0000078b^2 - 0,0345b + 4,2454), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) диапазон концентраций $30 < b \leq 50$ % мас.

$$C_p = 10^{-5} \cdot t^2 (0,00000601b^3 + 0,0000764b^2 - 0,00762b + 0,8933) - 10^{-3}t * \\ * (-0,0000027b^3 - 0,000265b^2 + 0,043b - 0,20) + (0,00000301b^3 - \\ - 0,0000078b^2 - 0,03452b + 4,2454), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\lambda = t^{-3} (0,3661b^3 - 18,275b^2 + 241,75b - 904,974) + t^{-2} (-0,03108b^3 + \\ + 1,5526b^2 - 20,4916b + 138,642) - t^{-1} (-0,0007298b^3 + 0,03635b^2 - \\ - 0,47b + 7,544) + (-0,0000026b^3 + 0,000067b^2 + 0,002082b + 0,7384), \\ \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

б) диапазон концентраций $30 < b \leq 50$ % мас.

$$\lambda = (-215,202/t^3) + (82,211/t^2) - (6,452/t) + 0,789, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 25$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3 = [74,659 \cdot \exp(0,00000413b^3 - 0,0002b^2 + 0,0104b)] \cdot t * (-0,000012b^3 + 0,00072b^2 - 0,016b + 0,207), \text{ Н/м};$$

б) диапазон концентраций $25 < b \leq 50$ % мас.

$$\sigma \cdot 10^3 = [74,659 \cdot \exp(0,00000413b^3 - 0,0002b^2 + 0,0104b)] \cdot t * [330119,5 \exp(-0,000192b^3 + 0,0257b^2 - 1,135b)], \text{ Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $5 \leq b \leq 30$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,03064b^3 - 0,9363b^2 + 9,769b - 13,9673) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2(0,001492b^3 - 0,0477b^2 + 0,5547b + 9,6365) - 10^{-3}t(0,00214b^3 - 0,04817b^2 + 0,594b + 29,3828)];$$

а) диапазон концентраций $30 < b \leq 50$ % мас.

$$\text{Pr} = (0,009261b^3 + 0,1378b^2 - 30,995b + 819,482) \cdot \exp[10^{-5} \cdot t^2 * (0,0002742b^3 + 0,01195b^2 - 2,674b + 85,686) - 10^{-3}t(0,000461b^3 + 0,005145b^2 - 2,8677b + 130,556)].$$

Таблица П2.15

Теплофизические свойства водного раствора сульфата натрия
 Na_2SO_4

Теплофизические свойства(символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °С					
			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
$\nu \cdot 10^6$	$\text{м}^2/\text{с}$	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	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	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	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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 $20 \leq t \leq 120$ °С,
концентраций $5 \leq b \leq 20$ % мас.

1. Плотность:

$$\rho = t^2(0,0000001b^3 - 0,00001b^2 + 0,00023b - 0,00367) - t(0,0000467b^3 - 0,00226b^2 + 0,04253b + 0,0333) + (0,00121b^3 - 0,0155b^2 + 9,753b + 1000,53), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

$$\nu \cdot 10^6 = (0,0001212b^3 + 0,000353b^2 + 0,0192b + 1,661) \cdot \exp[10^{-9}t^2 * (6,875b^3 - 215,6b^2 + 2110,3b + 79995,7) - 10^{-5}t(0,0472b^3 + 0,0211b^2 - 9,023b + 2561,7)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

$$C_p = 10^{-7} \cdot t^2(0,1107b^3 - 6,24b^2 + 116,03b + 678) - 10^{-6}t(1,106b^3 - 69,57b^2 + 1383b + 1239,8) + (0,0000066b^3 - 0,00026b^2 - 0,0071b + 3,771), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = (-1246,76/t^3) + (165,96/t^2) - (7,995/t) + 0,739, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

5. Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma \cdot 10^3 = (0,000195b^3 - 0,00206b^2 + 0,275b + 75,553) - t(0,000003543b^3 - 0,00008914b^2 + 0,0007942b + 0,1513), \text{ Н/м}.$$

6. Критерий Прандтля:

$$Pr = (-0,0002332b^3 + 0,0423b^2 - 0,213b + 13,50) \cdot \exp[10^{-9} \cdot t^2(-4,164b^3 + 182,174b^2 - 1987,13b + 117164) - 10^{-6}t(-1,68b^3 + 72,993b^2 - 725,7b + 31903)].$$

Таблица П2.16

Теплофизические свойства водного раствора сахарозы
 $C_{12}H_{22}O_{11}$

Теплофизические свойства (символ)	Размерность	Массовая концентрация, % мас.	Температура, °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

Продолжение табл. П2.16

1	2	3	4	5	6	7	8	9
λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	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 $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$
 Диапазон температур $20 \leq t \leq 120$ °С,
 концентраций $10 \leq b \leq 60$ % мас.

1. Плотность:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 40$ % мас. (% СВ)
 $\rho = -10^{-3} \cdot t^2(0,0001375b^3 - 0,009736b^2 + 0,1882b + 1,9139) - t^*$

$$*(-0,0000141b^3+0,0009926b^2-0,01667b+0,2483)+(-0,0000992b^3+0,02348b^2+3,7063b+1002,42), \text{ кг/м}^3;$$

б) диапазон концентраций $40 < b \leq 60$ % мас. (% СВ)

$$\rho = -10^{-3} \cdot t^2(-0,0000128b^3+0,00131b^2-0,0696b+4,1824) - t * (-0,00000149b^3+0,0002632b^2-0,009445b+0,317) + (-0,01498b^3 + 2,2369b^2 - 104,573b + 2744,383), \text{ кг/м}^3;$$

в) диапазон концентраций $60 < b \leq 75$ % мас. (% СВ)

$$\rho = -10^{-3} \cdot t^2(-0,0000159b^3-0,00232b^2+0,5206b-17,494) - t * *(0,00000244b^3+0,0000368b^2-0,03634b+1,8974) + (0,003159b^3 - 0,6541b^2 + 51,557b - 133,638), \text{ кг/м}^3.$$

2. Кинематическая вязкость:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 40$ % мас. (% СВ)

$$v \cdot 10^6 = (0,0004193b^3 - 0,01254b^2 + 0,0744b + 3,1869) \cdot \exp[10^{-9}t^3 * *(0,2508b^3 - 23,4265b^2 + 653,135b - 5721,48) + 10^{-5}t^2(-0,005403b^3 + 0,5187b^2 - 14,665b + 136,556) - 10^{-3}t(-0,003097b^3 + 0,3166b^2 - 9,116b + 107,826)], \text{ м}^2/\text{с};$$

б) диапазон концентраций $40 < b \leq 60$ % мас. (% СВ)

$$v \cdot 10^6 = [0,09397 \cdot \exp(0,00007913b^3 - 0,007535b^2 + 0,298b)] * * \exp[10^{-9}t^3(-0,1064b^3 + 5,8416b^2 + 130,466b - 8780,76) + 10^{-5}t^2(0,002981b^3 - 0,2268b^2 + 2,4722b + 107,23) - 10^{-3}t(0,001451b^3 - 0,06678b^2 - 1,9961b + 145,41)], \text{ м}^2/\text{с};$$

в) диапазон концентраций $60 < b \leq 75$ % мас. (% СВ)

$$v \cdot 10^6 = [12,199 \cdot 10^{16} \cdot \exp(0,01136b^2 - 1,24584b)] \cdot \exp[10^{-9}t^3 * * (-0,0616b^3 - 3,4624b^2 + 1365,805b - 59093,3) + 10^{-5}t^2(0,001454b^3 + 0,07861b^2 - 30,596b + 1321,945) - 10^{-3}t(0,001366b^3 + 0,01778b^2 - 18,843b + 870,03)], \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Изобарная теплоемкость:

диапазон концентраций $10 \leq b \leq 75$ % мас. (% СВ)
 $C_p=4,19-[2,51-0,00754t+0,00461(100-Дб)] \cdot b \cdot 10^{-2}$, кДж/(кг·К).

4. Коэффициент теплопроводности:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 30$ % 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 $30 < b \leq 50$ % 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 $50 < b \leq 75$ % 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 $10 \leq b \leq 75$ % мас. (% СВ)
 $\sigma \cdot 10^3=0,204b-0,102t+0,382 \cdot Дб+31,0$, Н/м.

6. Критерий Прандтля:

а) диапазон концентраций $10 \leq b \leq 40$ % мас. (% СВ)
 $Pr=(0,0046512b^3-0,171b^2+1,9392b+17,4776) \cdot \exp[10^{-7}t^3 \cdot$
 $\cdot (0,0022536b^3-0,2136b^2+5,97506b-53,9802)+10^{-5}t^2(-0,0049112 \cdot$
 $\cdot b^3+0,4793b^2-13,595b+132,2833)-10^{-3}t(-0,0028303b^3+0,29503b^2-$

-8,5187b+108,8163)];

б) диапазон концентраций $40 < b \leq 60$ % мас. (% СВ)

$$\begin{aligned} Pr = & [1340015,3 \cdot \exp(-0,00003559b^3 + 0,01002b^2 - 0,57698b) * \\ & * \exp[10^{-7}t^3 (321,933 \cdot \exp(0,00005756b^3 - 0,003609b^2 - 0,0288b)) + \\ & + 10^{-5}t^2(0,002679b^3 - 0,1705b^2 - 0,6828b + 169,7434) - 10^{-3}t * \\ & *(0,00060728b^3 + 0,07003b^2 - 9,1832b + 274,9923)]; \end{aligned}$$

в) диапазон концентраций $60 < b \leq 75$ % мас. (% СВ)

$$\begin{aligned} Pr = & [25,18718 \cdot 10^{10} \cdot \exp(0,00004838b^3 + 0,0014888b^2 - 0,5699b) * \\ & * \exp[10^{-7}t^3(-0,0006013b^3 - 0,03949b^2 + 14,0609b - 604,258) + \\ & + 10^{-5}t^2(0,0015739b^3 + 0,056377b^2 - 29,034b + 1292,782) - 10^{-3}t * \\ & *(0,0010335b^3 + 0,08717b^2 - 23,5574b + 983,666)]. \end{aligned}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колач Т.Н. Выпарные станции / Т.Н. Колач, Д.В. Радун. М.: Машгиз, 1963. 215 с.
2. Перри Дж. Справочник инженера-химика / Дж. Перри. Л.: Химия, 1969. 480 с.
3. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. М.: Энергия, 1980.
4. Майоров В.В. Таблицы и формулы теплофизических свойств воздуха, воды и водяных растворов некоторых неорганических и органических веществ / В.В. Майоров. Воронеж: ВПИ, 1980.
5. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев. М. : Энергия, 1972. 357 с.
6. Голубков Б.Н. Теплотехническое оборудование и теплоснабжение промышленных предприятий / Б.Н. Голубков. М.: Энергия, 1979. 289 с.
7. Портнов В.В. Рекуперативные и регенеративные теплообменные аппараты: учебн. пособие / В.В. Портнов. Воронеж: ВГТУ, 2008. 123 с.
8. РТМ 26-01-104-77. Аппараты выпарные с естественной циркуляцией и кипением раствора в трубах. Метод теплового и гидравлического расчета. Харьков: НИИхиммаш, 1977.
9. Выпарные трубчатые стальные аппараты общего назначения. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1979.
10. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов и др. Л.: Химия, 1979. 380 с.
11. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, С.М. Сукомел. М.: Энергия, 1980.
12. Гельперин Н.И. Выпарные аппараты / Н.И. Гельперин. М.: Химиздат, 1947.

13. Машины и аппараты химических производств. / под ред. И.И. Чернобыльского. – М.: Машиностроение, 1975.
14. Майоров В.В. Промышленные поверхностные выпарные аппараты: сборник задач / В.В. Майоров. Воронеж: ВПИ, 1998.
15. РТМ-26-01-54-72. Аппараты выпарные трубчатые с принудительной циркуляцией раствора. Методы тепловых и гидромеханических расчетов. М.: Минхимнефтемаш, 1972.
16. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. М.-Л.: ГЭИ, 1959.
17. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. М.-Л.: ГЭИ, 1960.
18. Кувшинский М.Н. Курсовое проектирование по предмету "Процессы и аппараты химической промышленности" / М.Н. Кувшинский. М.: Высш. шк., 1980.
19. Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции / С.В. Хижняков. М.-Л.: ГЭИ, 1959.
20. Альперт Л.З. Основы проектирования химических установок / Л.З. Альперт. М.: Энергия, 1973.
21. Расчет и конструирования трубопроводов: справ. пособие / под ред. Б.В. Зверькова. Л.: Машиностроение, 1979.
22. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплообменных установок: учеб. пособие для вузов / А.М. Бакластов и др. М.: Энергоиздат, 1981.
23. Чернобыльский И.И. Выпарные установки / И.И. Чернобыльский. Киев: КГУ, 1960.
24. Лебедев П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / П.Д. Лебедев, А.М. Щукин. М.: Энергия, 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Последовательность проектирования	4
многоступенчатой выпарной установки (МВУ)	4
1.1 Основные элементы МВУ	4
1.2 Исходные данные для расчета	5
1.3 Последовательность расчетов при проектировании МВУ	6
2. Определение числа ступеней выпаривания.....	7
3. Тепловой расчет МВУ	13
3.1. Распределение выпариваемой воды по ступеням МВУ	13
3.2. Концентрация раствора и давление пара по ступеням МВУ	15
3.3. Определение полезного перепада температур на МВУ	17
3.4. Предварительное распределение полезной разности температур по ступеням МВУ	21
3.5. Определение коэффициентов теплопередачи в выпарных аппаратах МВУ	26
3.5.1. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора	28
3.5.2 Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора	44
3.6. Определение расхода пара на первую ступень МВУ ...	55
3.7 Уточнение величины полезной разности температур по ступеням МВУ	78
3.8 Поверхность теплообмена выпарных аппаратов	82
3.8.1. Выпарные аппараты	

с естественной циркуляцией раствора.....	82
3.8.2 Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора	86
4. Оптимизация выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией раствора	88
5. Гидравлический Расчет Выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией	93
6. Конструктивный расчет выпарных аппаратов	105
6.1. Паровая греющая камера.....	105
6.2 Пространство вторичного пара.....	108
6.3 Штуцеры и трубопроводы.....	111
6.4. Тепловая изоляция выпарных аппаратов.....	112
7. Вспомогательное оборудование МВУ	114
Заключение	116
Приложение 1	117
Приложение 2.....	120
Библиографический список	170

Учебное издание

Майоров Владислав Всеволодович
Портнов Владимир Васильевич

МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ВЫПАРНЫЕ УСТАНОВКИ

В авторской редакции

Компьютерный набор
В.В. Портнова

Подписано в печать 27.11.2008.

Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 10,9. Уч.-изд. л. 9,1. Тираж 250 экз.

Зак. №

ГОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14