

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра промышленной теплоэнергетики

ТЕПЛОМАССООБМННЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЫПАРКИ И ВЫПАРНЫЕ УСТАНОВКИ

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ **Выполнение курсовой работы**

Методические указания для студентов заочной формы обучения
по направлению подготовки
13.04.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составитель
В. А. Суслов

Санкт-Петербург
2025

Утверждено
на заседании кафедры ПТЭ
21.04.2025 г., протокол № 8

Рецензент В. Г. Злобин

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Тепломассообменные процессы выпарки и выпарные установки» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Методические указания содержат основные понятия, определения и уравнения тепломассообмена, использующиеся в тепловых расчетах конструкций аппаратов и схем выпарных станций различных отраслях промышленности. Указания содержат методику, необходимую для теплового расчета выпарных аппаратов и станций.

Методические указания предназначены для магистров заочной формы обучения и могут быть использованы для расширения их знаний при выполнении курсовой работы.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2025 г., поз. 5283

Подписано к печати 01.09.2025. Формат 60x84/16. Бумага тип № 1.
Печать офсетная. Печ. л. 1,8. Уч.-изд. л. 1,8.
Тираж 30 экз. Изд. № 78. Цена «С». Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Составление тепловой схемы заданной выпарной батареи.....	5
2. Предварительное распределение выпаренной влаги по корпусам батареи ...	8
3. Определение теплофизических свойств раствора	9
4. Предварительное распределение температурного режима по корпусам выпарной установки.....	11
5. Составление теплового баланса по корпусам выпарной установки	13
6. Определение термическое сопротивление накипеобразования по корпусам выпарной установки	17
7. Определение коэффициента теплоотдачи со стороны конденсирующегося пара	17
8. Определение коэффициента теплоотдачи со стороны кипящего раствора.....	18
9. Определение коэффициента теплопередачи и поверхности теплообмена ВА	21
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	23
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	24

ВВЕДЕНИЕ

При изучении курса «Теплообменные процессы выпарки и выпарные установки» необходимо ознакомиться с содержанием тем, представленных в методических указаниях, а затем изучить материал по рекомендованной литературе [1, 2]. При изучении материала следует обращать внимание на физический смысл рассматриваемого явления и формулы, описывающие его.

При выполнении курсовой работы необходимо соблюдать следующие требования:

1. Переписывать полностью текст каждого задания.
2. Указывать словами, какая величина вычисляется, привести соответствующую формулу.
3. Для каждой найденной величины следует указывать размерность.
4. В тексте решения каждого задания необходимо придерживаться терминов и обозначений, принятых в учебной литературе.
5. Выбор варианта задания следует производить по порядковому номеру студента в списке или по заданию преподавателя.

Пояснительная записка оформляется [1, 2] без рамок и штампов.

Пояснительная записка должна быть напечатана с использованием компьютера и принтера на одной стороне листов белой бумаги формата А 4 с применением текстового редактора Microsoft Word.

Рекомендуется использовать:

- гарнитуру шрифта Times New Roman;
- размер шрифта – 14 кегль;
- межстрочный интервал текста – 1,5;
- выравнивание – двухстороннее;
- размеры полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм;
- равный по всему тексту документа абзацный отступ – 5 знаков (1,25).

Слово «рекомендуется» означает, что текст набирается именно по таким правилам. Заголовки, подзаголовки, подписи под рисунками, заголовки таблиц могут быть набраны другим шрифтом (иногда это даже целесообразно, чтобы отделить их от основного текста).

Нумерация страниц осуществляется внизу по центру, начиная с 3 или 4 стр. (Содержание).

1. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЗАДАННОЙ ВЫПАРНОЙ БАТАРЕИ

Выпаривание – термический процесс концентрирования растворов при их кипении и, вследствие этого, частичном или полном удалении жидкого растворителя в виде пара. Раствор до состояния кипения греют различными теплоносителями. В большинстве случаев используют водяной пар, называемый греющим или первичным. Пар, образующийся при выпаривании, называют вторичным [3].

Для концентрирования растворов может быть применен периодический метод выпаривания, при котором исходным раствором заполняют выпарной аппарат, нагревают его до температуры кипения и выпаривают до конечной концентрации. Готовый продукт удаляют из аппарата и процесс повторяется. Периодическое выпаривание применяют для получения малых, но разнообразных по свойствам количеств продукта.

Непрерывный метод выпаривания осуществляется в многоступенчатых выпарных станциях (ВС), укомплектованных выпарными аппаратами (ВА) поверхностного типа с использованием образующегося над раствором вторичного пара данной ступени в последующих ступенях с более низким давлением. Температуру греющего теплоносителя и кипящего раствора в каждом отдельном случае выбирают с учетом свойств выпариваемого раствора, минимальной стоимости ВС и наименьших эксплуатационных затрат.

По теплотехническим признакам ВС непрерывного действия разделяют на несколько групп [4].

1. По принципу действия:

- а) рекуперативные ВС, в которых теплоноситель и выпариваемый раствор разделены твердой стенкой;
- б) контактные ВС, в которых теплота передается при непосредственном соприкосновении теплоносителя и раствора без разделяющей стенки;
- в) адиабатные ВС, в которых концентрирование происходит вследствие испарения предварительно перегретого раствора в камерах мгновенного испарения.

2. По числу ступеней выпаривания:

- а) одноступенчатые;
- б) многоступенчатые.

3. По давлению вторичного пара в последней ступени:

- а) противодавленческие;
- б) вакуум-выпарные станции.

4. По подводу первичной теплоты:

- а) ВС с одним источником первичной теплоты;
- б) ВС с несколькими источниками теплоты;
- в) ВС с тепловыми насосами.

5. По технологии обработки раствора:

а) одностадийные ВС, в которых раствор не отводится из аппаратов для промежуточной обработки;

б) многостадийные ВС, в которых раствор после одной из ступеней выпаривания направляется для дополнительной обработки (осветление, центрифугование, отстой и т. д.), а затем снова поступает на дальнейшее выпаривание в последующую ступень.

6. По относительному движению теплоносителя и выпариваемого раствора:

- Прямоточные (рис. 1), в которых греющий пар и выпариваемый раствор движутся в одном направлении. В ВС, работающей по прямоточной схеме, давление пара в корпусах равномерно уменьшается по направлению к конденсатору. При этом выпариваемый раствор, двигаясь в одном направлении с потоком пара и попадая в последующий корпус с более низким давлением, становится перегретым относительно его температуры насыщения.

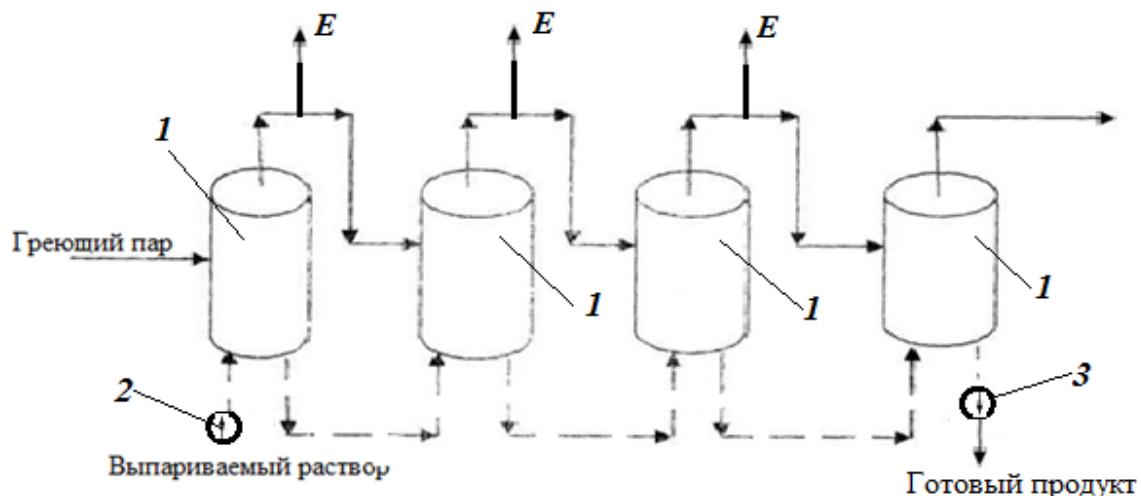


Рисунок 1 – Прямоточная схема ВС:
Е – отбор пара самоиспарения; 1 – ВА; 2 – насос подачи продукта;
3 – насос откачки продукта

Вследствие этого происходит вскипание раствора. Появляется избыток пара, который используется в схеме производства. В соответствие со схемой прямоточные ВС имеют минимальное количество перекачивающих насосов и теплообменников. Поэтому прямоточные ВС обладают максимальной энергоэффективностью. Однако вскипание раствора при входе в кипятильные трубы ВА служит причиной интенсивного накипеобразования на этом участке поверхности труб, что является причиной их тепловой развертки и снижает интенсивность теплообмена. Главный недостаток прямоточной схемы заключается в том, что в процессе выпаривания одновременно с повышением концентрации и снижением температуры раствора резко увеличивается его вязкость до значений, при которых циркуляция невозможна. Поэтому рассматриваемая схема питания корпусов ВС не может применяться для выпаривания высоковязких продуктов до высокой концентрации.

- Противоточные (рис. 2), в которых греющий пар и выпариваемый раствор движутся в противоположных направлениях. При такой схеме движения потоков по мере сгущения раствора повышается его температура, поэтому вязкость раствора остается в пределах, достаточных для его циркуляции, обеспечивающей относительно высокие коэффициенты теплоотдачи. При такой схеме питания раствора входит в кипятильные трубы ВА всегда в недогретом до температуры насыщения состоянии. Поэтому его вскипание, как при прямоточном выпаривании, исключено. За счет этого производительность противоточных ВС может быть наивысшая. К недостаткам противоточной схемы следует отнести необходимость установки для обеспечения движения раствора перед каждым ВА перекачивающего насоса и подогревателя раствора, увеличивающих энергоемкость ВС.

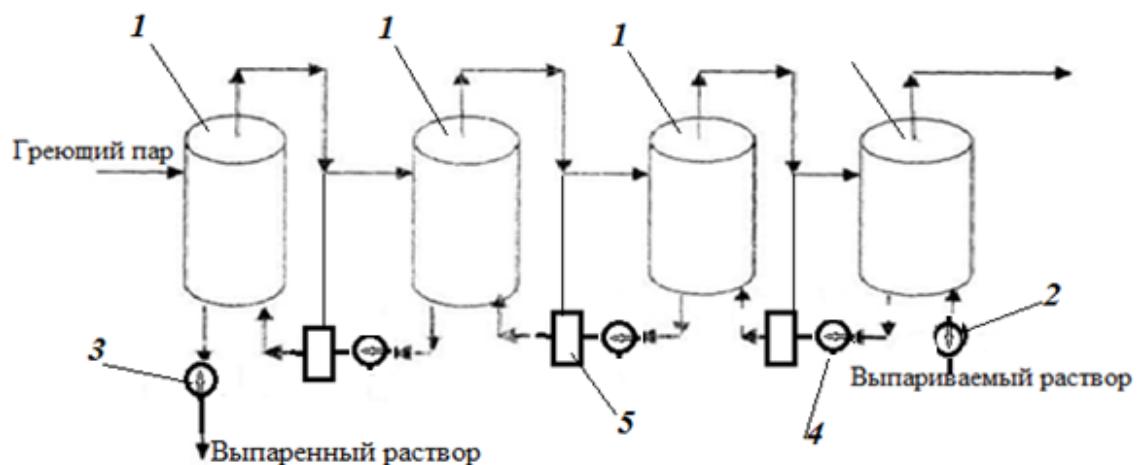


Рисунок 2 – Схема противоточной ВС:
 1 – ВА; 2 – насос подачи продукта; 3 – насос откачки продукта;
 4 – перекачивающий насос; 5 – теплообменник

Кроме того, тяжелые условия работы первого ВА, в котором одновременное сочетание максимальной концентрации и высокой температуры. Для исключения этого недостатка ВС должны комплектоваться головными ВА, концентрирующими на поверхности теплообмена гравитационно стекающий раствор высокой концентрации в режиме его испарения, а не кипения («падающая плёнка»). Результаты работ, представленных в [5], показывают, что применение подобных ВА в составе ВС, исключает накипеобразование.

- ВС со смешанным питанием корпусов (рис. 3), имеющие элементы прямо- и противотока. При этом схема питания ВА должна осуществляться таким образом, чтобы недостатки, присущие предыдущим схемам, были минимальными.

- Выпарные установки с параллельным питанием корпусов раствором.

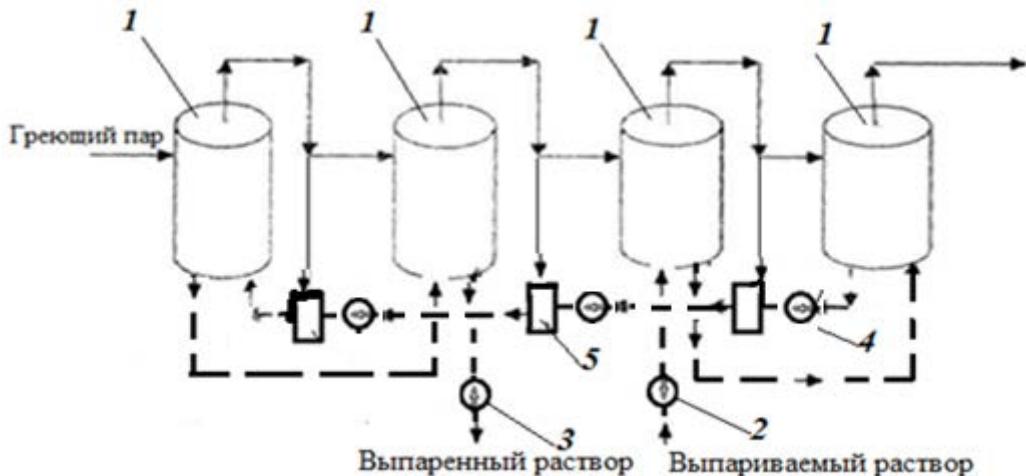


Рисунок 3 – Схема ВС со смешанным питанием корпусов:
 1 – ВА; 2 – насос подачи продукта; 3 – насос откачки продукта;
 4 – перекачивающий насос; 5 – теплообменник

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫПАРЕННОЙ ВЛАГИ ПО КОРПУСАМ БАТАРЕИ

В качестве примера возьмем шестикорпусную ВУ ($n = 6$) производительностью 100 т/ч по выпаренной влаге для концентрирования сульфатного щелока от $b = 20\%$ до $B = 65\%$ а. с. в. ВУ обогревается паром, давлением $P_{\text{гр}} = 3,5$ бар при температуре $T_{\text{гр}} = 138^{\circ}\text{C}$. Давление в конденсаторе установки составляет $P_{\text{k}} = 0,15$ бар. Условная поверхность теплообмена ВА (определяется методом последовательных приближений) составляет $F = 1800 \text{ м}^2$ при длине кипятильных труб $H = 9$ м, диаметром 49/53. Коэффициент тепловых потерь для всех ступеней одинаков: $\varphi = 0,98$.

Количество влаги, выпаренное корпусом 1, в первом приближении составит:

$$w_1 = \frac{s[(1-b/B)+0,015(n-1)]}{1+\varphi_i^2+\varphi_i^3+\dots+\varphi_n^{n-1}} = \frac{27,77[(1-20/65)+0,015(6-1)]}{1+0,96+0,94+0,92+0,90} = 4,09 \text{ кг/с.}$$

Находим количество влаги, выпаренное остальными корпусами:

$$w_2 = w_1 \cdot \varphi^{i-1} - (i-1) \cdot 0,015 \cdot S = 4,09 \cdot 0,98 - (2-1) \cdot 0,015 \cdot 27,77 = 3,59 \text{ кг/с}$$

$$w_3 = w_1 \cdot \varphi^{i-1} - (i-1) \cdot 0,015 \cdot S = 4,09 \cdot 0,98^2 - (3-1) \cdot 0,015 \cdot 27,77 = 3,10 \text{ кг/с}$$

$$w_4 = w_1 \cdot \varphi^{i-1} - (i-1) \cdot 0,015 \cdot S = 4,09 \cdot 0,98^3 - (4-1) \cdot 0,015 \cdot 27,77 = 2,64 \text{ кг/с}$$

$$w_5 = w_1 \cdot \varphi^{i-1} - (i-1) \cdot 0,015 \cdot S = 4,09 \cdot 0,98^4 - (5-1) \cdot 0,015 \cdot 27,77 = 2,14 \text{ кг/с}$$

$$w_6 = w_1 \cdot \varphi^{i-1} - (i-1) \cdot 0,015 \cdot S = 4,09 \cdot 0,98^5 - (6-1) \cdot 0,015 \cdot 27,77 = 1,66 \text{ кг/с}$$

где S – расход выпариваемого раствора; i – порядковый номер ВА.

Находим ошибку приближения Δ , которая не должна быть выше 10 %.

Полное количество воды, выпаренное батареей, определяется формулой: $W = S(1 - \frac{b}{B}) = 27,7(1 - 20/65) = 19,22 \text{ кг/с.}$

Расчетное количество воды, выпаренное батареей

$$W_p = (4,09 + 3,59 + 3,10 + 2,64 + 2,14 + 1,66) = 17,22 \text{ кг/с}$$

$$\Delta = 100 \cdot (19,22 - 17,22) / 19,22 = 10,4 \% > 10 \% \text{, что недопустимо.}$$

$$\text{Производим новое приближение: } (W - W_p)/n = (19,22 - 17,22)/6 = 0,33;$$

$$w_1 = 4,09 + 0,33 = 4,42; w_2 = 3,59 + 0,33 = 3,92; w_3 = 3,43; w_4 = 2,97; w_5 = 2,47;$$

$$w_6 = 1,99; W'_p = 19,2 \text{ кг/с. } \Delta = 100 \cdot (19,22 - 19,2) / 19,22 = 0,1 \% < 10 \text{ %.}$$

Полученные значения количеств выпаренной влаги в корпусах сводим в таблицу 1.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРА

Теплофизические свойства растворов в значительной степени зависят от их концентрации. Для определения их значений находим среднюю концентрацию раствора.

При противоточной схеме ВУ слабый раствор подается в 6 ВА. Концентрация раствора на выходе из этого аппарата определяется из уравнения материального баланса:

$$B_i = \frac{b_i}{1 - w_i/(s - \sum w)} = \frac{20}{1 - 1,99/27,77} = 21,5 \% = B_6$$

Средняя концентрация раствора в ВА находится по формуле:

$$B_i^{cp} = 0,5(b_i + B_i); B_6^{cp} = 0,5(20 + 21,5) = 20,7 \% \text{ абсолютно сухих веществ (а.с.в.).}$$

Согласно схеме питания корпусов далее раствор подается в 5 ВА.

Тогда

$$B_5 = \frac{21,5}{1 - 2,47/(27,77 - 1,99)} = 23,7 \% ; B_5^{cp} = 22,6 \% .$$

Аналогично в остальных: $B_4 = 27,1\%; B_4^{cp} = 25,4\%; B_3 = 32,5\%; B_3^{cp} = 29,8\%;$

$B_2 = 42,7\%; B_2^{cp} = 37,6\%; B_1 = 67,5\%; \Delta = 100 \cdot (67,5 - 65) / 67,5 = 3,7\%.$

$B_1^{cp} = 53,8\% \text{ а.с.в.}$

Зная среднюю концентрацию раствора в корпусе, находим значения его физических свойств с помощью *Приложений* и заносим их в таблицу 1.

Определяем нормальные температурные депрессии v_{ih} по корпусам ВУ по графику 5 *Приложений*. Находим поправку на величину внешнего давления от температуры насыщения раствора T_s, η .

Рассчитываем температурную депрессию в ВА по формуле: $v_i = v_h \cdot \eta$.

Для ВА с восходящим движением раствора примем ориентировочно следующие величины гидростатической депрессии по корпусам: $\Delta_1 = 0,80$; $\Delta_2 = 0,78$; $\Delta_3 = 0,76$; $\Delta_4 = 0,74$; $\Delta_5 = 0,72$; $\Delta_6 = 0,70$ °С.

Данные сводим в таблицу 1.

Таблица 1

№п.п./физ. св.	КОРПУСА					
	1	2	3	4	5	6
S , кг/с	12,99	16,91	20,34	23,31	25,78	27,77
w , кг/с	4,42	3,92	3,43	2,97	2,47	1,99
B_{cp} , %	53,8	37,6	29,8	25,4	22,6	20,7
v_h , м ² /с	8,0	4,0	2,0	1,8	1,5	1,20
η , °С	1,10	1,03	0,96	0,89	0,82	0,75
v , °С	8,80	4,12	1,92	1,60	1,23	0,90
Δ , °С	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70
ΔT , °С	10,98	10,25	9,52	8,78	8,05	7,32
T_i , °С	118,39	102,24	89,04	76,92	65,92	56,00
t_i , °С	127,99	107,14	91,72	79,26	67,87	57,60
t'_i , °С	138	117,39	101,24	88,04	75,92	64,92
T_{wi} , °С	133,0	112,2	96,4	83,6	71,8	61,2
$Q_{пар}$, кВт	13280	11947	10498	9113	7832	6466
Q' щел, кВт	4036	4963	5484	5537	5345	5574
Q' конд, кВт	-	-	2174	3536	3909	4687
$Q_{пр}$, кВт	17316	16910	18156	18186	17086	16727
Q'' щел, кВт	3126	4036	4963	5804	5576	5346
Q'' конд, кВт	2811	2174	3536	3909	4687	4680
$Q_{пот}$, кВт	346	338	363	364	342	334
$R_{нак} 10^5$, м ² ·К/Вт	1,78	1,38	1,11	0,90	0,72	0,56
α_{p1} , Вт/(м ² ·К)	1926	1699	1575	1476	1350	1250
$R_{конд} 10^4$, м ² ·К/Вт	5,19	5,88	6,34	6,77	7,4	8,0
α_2 , Вт/(м ² ·К)	8597	8632	8697	6620	5970	4955
$R_{кип} 10^4$, м ² ·К/Вт	1,2	1,1	1,1	1,5	1,7	2,0
$R_{ст} 10^4$, м ² ·К/Вт	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
K , Вт/(м ² ·К)	1214	1373	1138	1040	958	882
F , м ²	1408	1202	1676	1991	2215	2590
Δ , %	-21,8	-33	-6	+6	19	20

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПО КОРПУСАМ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ

Расчет температурного режима является исходным для теплового расчета всей батареи. Он необходим также для грамотной и технологичной эксплуатации оборудования. В результате расчета определяются температуры греющего и вторичного паров и температура кипящего раствора по корпусам установки. Температура греющего пара $t_{\text{гр}}$, подаваемого в аппарат, определяется наиболее просто. Ее определяют с помощью термопары и потенциометра, установленного на щите управления, или непосредственно по показаниям термометра и манометра – на кипятильнике корпуса. В качестве исходных данных для теплового расчета задается температура греющего пара, подаваемого на батарею.

Наибольшие сложности в достоверном измерении температур составляют измерения температуры вторичного пара. Малочисленные экспериментальные работы в этой области показывают, что температура вторичного пара является промежуточной между температурами кипения раствора и растворителя, то есть вторичный пар несколько перегрет. Величина степени перегрева определяется многими факторами, такими, как величина зеркала испарения, приходящаяся на единицу объема, размеры парового пространства, состояние внутренних поверхностей аппарата, и другими. Кроме того, показания термометра искажены вследствие его омывания частицами раствора, унесенным вторичным паром. При расчетах, как правило, принимают вторичный пар насыщенным при давлении в объеме сепаратора.

Температура кипящего раствора измеряется термопарами, установленными в кипятильных трубах выпарных аппаратов. Для расчетов температуру кипения принимают равной температуре вторичного пара, увеличенной на величину температурной и гидростатической депрессий.

Распределение температурных напоров между отдельными ступенями выпаривания является важным вопросом при тепловом расчете батареи. При равномерном распределении полезных тепловых нагрузок по отдельным ступеням выпаривания $Q = F \cdot K \cdot \Delta T$ - *idem*, что является справедливым для батарей ЦБП, наиболее выгодно температурные напоры распределять обратно пропорционально квадратным корням из соответствующих коэффициентов теплопередачи, т. е.:

$$\frac{\Delta T_n}{\Delta T_i} = \frac{\sqrt{K_i}}{\sqrt{K_n}} \quad (1)$$

Предварительное распределение температурных напоров, осуществляющееся в начале теплового расчета, производят руководствуясь следующим:

- величина температурного напора в корпусе должна быть не менее 5 °C

для аппаратов, выпаривающих раствор,двигающийся вверх, и не менее 3 °C
для аппаратов с «падающей пленкой»;

- значение температурного напора должно увеличиваться пропорционально увеличению концентрации раствора.

Для ориентировки:

$$\text{при прямотоке } T_1:T_2:T_3:T_4:T_5 = 1:1,2:1,4:1,9:3,0; \quad (2)$$

$$\text{при противотоке } T_1:T_2:T_3:T_4:T_5 = 1,4:1,3:1,2:1,1:1; \quad (3)$$

при смешанной схеме – согласно выражениям (2) и (3) в зависимости от конкретной схемы питания.

Расхождение между предварительно принятыми и расчетными температурными напорами не должно превышать 10 %.

Определяем располагаемый перепад температур ВУ

$$\Delta T_{\text{расп}} = T_{\text{гр}} - T_{\text{конд}} = 138 - 55 = 83 \text{ °C}.$$

Температурный напор по батарее составит:

$$\Delta T = T_{\text{гр}} - T_{\text{конд}} - (\sum v_i + \sum \Delta_i + \sum \delta t_i) = 138 - 55 - (18,57 + 4,5 + 5) = 54,93 \text{ °C}.$$

где δt – гидродинамическая депрессия, характеризующая потерю энергии паром при его движении по паровым коммуникациям. Принимается $\delta t = 1 \text{ °C}$ при переходе пара из корпуса в корпус.

Согласно формуле (3) температурный напор в ВА 6 определится как

$$\Delta T_6 = \frac{\Delta T}{(1,5+1,4+1,3+1,2+1,1+1)} = 7,32 \text{ °C}; \Delta T_5 = 8,05 \text{ °C}; \Delta T_4 = 8,78 \text{ °C}; \Delta T_3 = 9,52 \text{ °C}; \\ \Delta T_2 = 10,25 \text{ °C}; \Delta T_1 = 10,98 \text{ °C}.$$

Корпус 6

Температура вторичного пара $T_6'' = T_{\text{конд}} + \delta t_6 = 55 + 1 = 56 \text{ °C}$;
температура кипящего раствора ВА 6:

$$t_6 = T_6'' + v_6 + \Delta_6 = 56 + 0,9 + 0,7 = 57,6 \text{ °C};$$

температура греющего пара в ВА 6:

$$t_6' = t_6 + \Delta T_6 = 57,6 + 7,32 = 64,92 \text{ °C}^0$$

Корпус 5

Температура вторичного пара $T_5'' = t_6' + \delta t_5 = 64,92 + 1 = 65,22 \text{ °C}$;
температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_5 = T_5'' + v_5 + \Delta_5 = 65,22 + 1,23 + 0,72 = 67,87 \text{ °C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t_5' = t_5 + \Delta T_5 = 67,87 + 8,05 = 75,92 \text{ °C}^0$$

Корпус 4

Температура вторичного пара $T_4'' = t_5' + \delta t_4 = 75,92 + 1 = 76,92 \text{ °C}$;
температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_4 = T_4'' + v_4 + \Delta_4 = 76,92 + 1,6 + 0,74 = 79,26 \text{ °C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t'_4 = t_4 + \Delta T_4 = 79,26 + 8,78 = 88,04 {}^{\circ}\text{C}$$

Корпус 3

Температура вторичного пара $T''_3 = t'_4 + \delta t_3 = 88,04 + 1 = 89,04 {}^{\circ}\text{C}$;

температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_3 = T''_3 + v_3 + \Delta_3 = 89,04 + 1,92 + 0,76 = 91,72 {}^{\circ}\text{C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t'_3 = t_3 + \Delta T_3 = 91,72 + 9,52 = 101,24 {}^{\circ}\text{C}$$

Корпус 2

Температура вторичного пара $T''_2 = t'_3 + \delta t_2 = 101,24 + 1 = 102,24 {}^{\circ}\text{C}$;

температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_2 = T''_2 + v_2 + \Delta_2 = 102,24 + 4,12 + 0,78 = 107,14 {}^{\circ}\text{C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t'_2 = t_2 + \Delta T_2 = 107,14 + 10,25 = 117,39 {}^{\circ}\text{C}$$

Корпус 1

Температура вторичного пара $T''_1 = t'_2 + \delta t_1 = 117,39 + 1 = 118,39 {}^{\circ}\text{C}$;

температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_1 = T''_1 + v_1 + \Delta_1 = 118,39 + 8,80 + 0,80 = 127,99 {}^{\circ}\text{C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t'_1 = t_1 + \Delta T_1 = 127,99 + 10,98 = 138,97 {}^{\circ}\text{C}$$

Ошибка расчета $\Delta = 100 \cdot (138,97 - 138) / 138,97 = 0,7 \%$

Значения рассчитанных температур вносим в таблицу 1.

5. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПО КОРПУСАМ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ

Для проверки и подтверждения правильности определения температурного режима ВУ составляется тепловой баланс. Тепловой баланс корпуса ВУ определяется следующим уравнением:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{расх}},$$

где $Q_{\text{пр}} = Q_{\text{пар}} + Q_{\text{расш}} + Q_{\text{конц}} + Q_{\text{щел}} + Q_{\text{конд}}$;

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{вып}} + Q''_{\text{щел}} + Q''_{\text{конд}} + Q_{\text{пот}}. \quad (4)$$

Корпус 1

Количество теплоты, передаваемое греющим паром $Q_{\text{пар}}$, определяется как $Q_{\text{пар}} = D_{\text{гр}} \cdot i_{\text{гр}}$, где $D_{\text{гр}}$ и $i_{\text{гр}}$ – расход и теплосодержание пара, подаваемые в первый ВА, соответственно, $Q_{\text{пар}} = 1,1 \cdot 4,42 \cdot 2731,4 = 13280 \text{ кВт}$.

Количество теплоты, передаваемое паром от расширителя $Q_{\text{расш}}$,

$Q_{\text{расш}} = D_{\text{расш}} \cdot i_{\text{расш}}$, где $D_{\text{расш}}$ и $i_{\text{расш}}$ – расход и теплосодержание пара от расширителя. $D_{\text{расш}} = S \cdot (Cp' \cdot t_{\text{вых}} - Cp'' \cdot t_{\text{вых}}) / (i_{\text{расш}} - Cp'' \cdot t_{\text{вых}})$, где S – расход

раствора в расширитель; Cp' и Cp'' , $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$ – теплоемкость и температура раствора на входе и выходе из расширителя. Расширитель в схеме не приводится: расчет не проводим.

Количество теплоты, передаваемое со вторичным паром из концентратора, $Q_{\text{конц}} = W_{\text{конц}} \cdot I_{\text{конц}}$, где $W_{\text{конц}}$ – расход пара от концентратора и теплосодержание этого пара. Концентратор и его марка в задании не указаны: не учитываем.

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

$Q'_{\text{щел}} = S_{\text{пр}} \cdot Cp'_{\text{щ}} \cdot t_{\text{вх}}$, где $S_{\text{пр}}$; $Cp'_{\text{щ}}$ и $t_{\text{вх}}$ – расход выпариваемого раствора, его теплоемкость и температура на входе в аппарат соответственно.

$$Q'_{\text{щел}} = 12,99 \cdot 2,9 \cdot 107,14 = 4036 \text{ кВт}$$

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$Q'_{\text{конд}} = D'_{\text{конд}} \cdot Cp \cdot t_{\text{конд}}$, где $D'_{\text{конд}}$, Cp и $t_{\text{конд}}$ – расход приходящего конденсата, его теплоемкость и температура соответственно. В 1-й ВА конденсат пара не приходит.

Общее количество теплоты, вносимое во 2-й ВА теплоносителями

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{пар}} + Q_{\text{щел}} = 13280 + 4036 = 17316 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уходящее из аппарата со вторичным паром $Q_{\text{вып}}$, определяется по уравнению (4). Определив $Q_{\text{вып}}$, проверяют расход вторичного пара w , уходящего из аппарата, определенного ранее:

$$w_i = [Q_{\text{пр}} - (Q''_{\text{щел}} + Q''_{\text{конд}} + Q_{\text{пот}})] / i_{\text{вт.}}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным раствором $Q''_{\text{щел}} = S_{\text{ухи}} \cdot Cp''_i \cdot t_i$, где $S_{\text{ухи}}$; Cp''_i и i_i – расход раствора, его теплоемкость и температура кипения при выпаривании в ВА.

$$Q''_{\text{щел}} = (12,99 - 4,42) \cdot 2,85 \cdot 127,99 = 3126 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата конденсатом

$Q''_{\text{конд}} = 4,19 \cdot D''_{\text{конд}} \cdot t_{\text{конд.}}$, где $D''_{\text{конд.}}$ и $t_{\text{конд.}}$ – расход и температура уходящего из корпуса конденсата. $Q''_{\text{конд}} = 4,19 \cdot 4,86 \cdot 138 = 2811 \text{ кВт}$

Количество теплоты, теряемое аппаратом в окружающую среду

$$Q_{\text{пот}} = (1 - \varphi) Q_{\text{пр}}. Q_{\text{пот}} = (1 - 0,98) \cdot 17316 = 346 \text{ кВт.}$$

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

$$w_i = [Q_{\text{пр}} - (Q''_{\text{щел}} + Q''_{\text{конд}} + Q_{\text{пот}})] / i_{\text{вт.}}$$

$$w_1 = [17316 - (3126 + 346)] / 2704 = 5,38 \text{ кг/с}$$

$$\Delta = 100 \cdot (5,38 - 4,42) / 5,38 = 17,8 \%, \Delta > 10 \%$$

Корпус 2

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

$$Q_{\text{пар}} = D_{\text{гр}} \cdot i_{\text{гр}} = 4,42 \cdot 2702,9 = 11947 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

$$Q'_{\text{щел}} = S_{\text{пр}} \cdot Cp'_{\text{щ}} \cdot t_{\text{вх}} = 16,91 \cdot 3,2 \cdot 91,72 = 4963 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

Во 2-й ВА конденсат пара от 1-го ВА не приходит, поскольку направляется в котельную.

Общее количество теплоты, вносимое во 2-й ВА теплоносителями

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{пар}} + Q_{\text{щел}} = 11947 + 5812 = 16910 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным раствором $Q''_{\text{щел}} = S_{yx_i} \cdot Cp''_i \cdot t_i = 4036$ кВт. Это количество теплоты равно теплоте, вносимой раствором в 1-й ВА.

Количество теплоты, уносимое из аппарата конденсатом

$$Q''_{\text{конд}} = 4,19 \cdot D''_{\text{конд}} \cdot t_{\text{конд}} = 4,19 \cdot 4,42 \cdot 117,4 = 2174 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, теряемое аппаратом в окружающую среду

$$Q_{\text{пот}} = (1-\varphi) Q_{\text{пр}} = (1 - 0,98) \cdot 16910 = 338 \text{ кВт.}$$

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

$$w_i = [Q_{\text{пр}} - (Q''_{\text{щел}} + Q''_{\text{конд}} + Q_{\text{пот}})] / i_{\text{вн.}}$$

$$w_1 = [16910 - (4036 + 2174 + 338)] / 2703 = 3,83 \text{ кг/с}$$

$$\Delta = 100 \cdot (4,14 - 3,83) / 4,14 = 7,5 \% \text{, } \Delta < 10 \%$$

Корпус 3

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

$$Q_{\text{пар}} = D_{\text{гр}} \cdot i_{\text{гр}} = 3,92 \cdot 2678 = 10498 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

$$Q'_{\text{щел}} = S_{\text{пр}} \cdot Cp'_{\text{щел}} \cdot t_{\text{вх}} = 20,34 \cdot 3,4 \cdot 79,3 = 5484 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$$Q'_{\text{конд}} = D'_{\text{конд}} \cdot Cp \cdot t_{\text{конд}} = 2174 \text{ кВт.}$$

Общее количество теплоты, вносимое в 3-й ВА теплоносителями

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{пар}} + Q_{\text{щел}} + Q_{\text{конд}} = 10498 + 5484 + 2174 = 18156 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным раствором $Q''_{\text{щел}} = S_{yx_i} \cdot Cp''_i \cdot t_i = 16,91 \cdot 3,2 \cdot 91,72 = 5428 \text{ кВт.}$

Количество теплоты, уносимое из аппарата конденсатом при каскадном перепуске конденсата по корпусам

$$Q''_{\text{конд}} = 4,19 \cdot D''_{\text{конд}} \cdot t_{\text{конд}} = 4,19 \cdot 3,92 \cdot 101,2 + 4,19 \cdot 4,42 \cdot 101,2 = 3536 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, теряемое аппаратом в окружающую среду

$$Q_{\text{пот}} = (1-\varphi) Q_{\text{пр}} = (1 - 0,98) \cdot 18156 = 363 \text{ кВт.}$$

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

$$w_i = [Q_{\text{пр}} - (Q''_{\text{щел}} + Q''_{\text{конд}} + Q_{\text{пот}})] / i_{\text{вн.}}$$

$$w_3 = [18156 - (5428 + 3536 + 363)] / 2659 = 3,32 \text{ кг/с}$$

$$\Delta = 100 \cdot (3,43 - 3,32) / 3,43 = 3,2 \% \text{, } \Delta < 10 \%$$

Корпус 4

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

$$Q_{\text{пар}} = D_{\text{гр}} \cdot i_{\text{гр}} = 3,43 \cdot 2657 = 9113 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

$$Q'_{\text{щел}} = S_{\text{пр}} \cdot Cp'_{\text{щел}} \cdot t_{\text{вх}} = 23,31 \cdot 3,5 \cdot 67,87 = 5537 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$$Q'_{\text{конд}} = Q''_{\text{конд2}} + Q''_{\text{конд3}} = 3536 \text{ кВт.}$$

Общее количество теплоты, вносимое в 4-й ВА теплоносителями

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{пар}} + Q_{\text{щел}} + Q_{\text{конд}} = 9113 + 5537 + 3536 = 18186 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным рас-

твором $Q''_{щелi} = S_{yxi} \cdot Cp''_i \cdot t_i = 20,34 \cdot 3,6 \cdot 79,26 = 5804$ кВт.

Количество теплоты, уносимое из аппарата конденсатом при каскадном перепуске конденсата по корпусам

$$Q''_{конд} = 4,19 \cdot 3,92 \cdot 79,26 + 4,19 \cdot 4,42 \cdot 79,26 + 4,19 \cdot 3,43 \cdot 79,26 = 3909 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, теряющееся аппаратом в окружающую среду

$$Q_{пот} = (1-\varphi) Q_{пр} = (1 - 0,98) \cdot 18186 = 364 \text{ кВт.}$$

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

$$w_i = [Q_{пр} - (Q''_{щел} + Q''_{конд} + Q_{пот})] / i_{вт.}$$

$$w_4 = [18186 - (5804 + 3909 + 364)] / 2639 = 3,07 \text{ кг/с}$$

$$\Delta = 100 \cdot (3,07 - 2,97) / 3,07 = 3,3 \% \text{, } \Delta < 10 \%$$

Корпус 5

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

$$Q_{пар} = D_{гр} \cdot i_{гр} = 2,97 \cdot 2637 = 7832 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

$$Q'_{щел} = S_{пр} \cdot Cp'_{щ} \cdot t_{вх} = 25,78 \cdot 3,6 \cdot 57,6 = 5345 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$$Q'_{конд} = Q''_{конд4} = 3909 \text{ кВт.}$$

Общее количество теплоты, вносимое в 5-й ВА теплоносителями

$$Q_{пр} = Q_{пар} + Q_{щел} + Q_{конд} = 7832 + 5345 + 3909 = 17086 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным раствором $Q''_{щелi} = S_{yxi} \cdot Cp''_i \cdot t_i = 22,81 \cdot 3,6 \cdot 67,9 = 5576$ кВт.

Количество теплоты, уносимое из аппарата конденсатом при каскадном перепуске конденсата по корпусам

$$Q''_{конд} = 4,19 \cdot 3,92 \cdot 75,9 + 4,19 \cdot 4,42 \cdot 75,9 + 4,19 \cdot 3,43 \cdot 75,9 + 4,19 \cdot 2,97 \cdot 75,9 = 4687 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, теряющееся аппаратом в окружающую среду

$$Q_{пот} = (1-\varphi) Q_{пр} = (1 - 0,98) \cdot 17086 = 342 \text{ кВт.}$$

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

$$w_i = [Q_{пр} - (Q''_{щел} + Q''_{конд} + Q_{пот})] / i_{вт.}$$

$$w_5 = [17086 - (5576 + 4687 + 342)] / 2620 = 2,47 \text{ кг/с}$$

$$\Delta = 0 \text{ %.}$$

Корпус 6

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

$$Q_{пар} = D_{гр} \cdot i_{гр} = 2,47 \cdot 2618 = 6466 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

$$Q'_{щел} = S_{пр} \cdot Cp'_{щ} \cdot t_{вх} = 27,77 \cdot 3,65 \cdot 55 = 5574 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$$Q'_{конд} = Q''_{конд5} = 4687 \text{ кВт.}$$

Общее количество теплоты, вносимое в 6-й ВА теплоносителями

$$Q_{пр} = Q_{пар} + Q_{щел} + Q_{конд} = 6466 + 5574 + 4687 = 16727 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным раствором $Q''_{щелi} = S_{yxi} \cdot Cp''_i \cdot t_i = 25,78 \cdot 3,6 \cdot 57,6 = 5346$ кВт.

Количество теплоты, уносимое из аппарата конденсатом при каскадном

перепуске конденсата по корпусам

$$Q''_{\text{конд}} = 4,19 \cdot 3,92 \cdot 64,9 + 4,19 \cdot 4,42 \cdot 64,9 + 4,19 \cdot 3,43 \cdot 64,9 + 4,19 \cdot 2,97 \cdot 64,9 + 4,19 \cdot 2,47 \cdot 64,9 = 4680 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, теряемое аппаратом в окружающую среду

$$Q_{\text{пот}} = (1 - \varphi) Q_{\text{пр}} = (1 - 0,98) \cdot 16727 = 334 \text{ кВт}$$

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

$$w_i = [Q_{\text{пр}} - (Q''_{\text{щел}} + Q''_{\text{конд}} + Q_{\text{пот}})] / i_{\text{вт.}}$$

$$W_6 = [16727 - (5346 + 4680 + 334)] / 2602 = 2,45 \text{ кг/с}$$

$$\Delta = 100 \cdot (2,45 - 1,99) / 2,45 = 18 \% , \Delta > 10 \% /$$

$$\Delta_{\text{ср}} = (17,8 + 7,5 + 3,2 + 3,3 + 0 + 18) / 6 = 8,3, \text{ что } < 10 \%$$

6. ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ

В процессе выпаривания теплообменные поверхности кипятильных труб загрязняются и покрываются накипью, что увеличивает термическое сопротивление теплопередаче и снижает интенсивность теплообмена и эффективность выпаривания.

Термическое сопротивление накипи $R_{\text{нак}} = (\delta/\lambda)_{\text{нак}}$ составляет для корпусов большинства ВУ от 20 % до 50 % от полного термического сопротивления теплопередаче и определяется в зависимости от массового напряжения поверхности теплообмена, концентрации раствора и периода работы батареи между промывками: $R_{\text{нак}} = \psi \cdot U \cdot \tau$,

где ψ – термический коэффициент накипеобразования, характеризующий прирост термического сопротивления накипи в единицу времени, отнесенного к одному килограмму выпаренной влаги с единицы поверхности теплообмена; $U = w/F$ – массовое напряжение поверхности теплообмена, кг/(м² с); τ – время работы выпарного аппарата между промывками, сутки.

Величина среднесуточного прироста термического сопротивления накипи может быть определена согласно уравнению: $R_{\text{нак}} = 1,658 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot B^{0,37}$, где B – концентрация раствора на выходе из аппарата, %.

$$R_{\text{нак1}} \cdot 10^{-5} = 1,78 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}; R_{\text{нак2}} \cdot 10^{-5} = 1,38 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}; R_{\text{нак3}} \cdot 10^{-5} = 1,11 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}; \\ R_{\text{нак4}} \cdot 10^{-5} = 0,9 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}; R_{\text{нак5}} \cdot 10^{-5} = 0,72 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}; R_{\text{нак6}} \cdot 10^{-5} = 0,56 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}.$$

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ СО СТОРОНЫ КОНДЕНСИРУЮЩЕГОСЯ ПАРА

Теоретический коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного пара на поверхности вертикальных труб согласно [6] рассчитывается по

$$\alpha = \frac{Re}{B \cdot H \cdot \Delta t} \text{ либо } \alpha = 0,943 \sqrt[4]{\frac{r \cdot (\rho')^2 \cdot (\lambda')^3}{\mu' \cdot \Delta t \cdot H}},$$

где Re – число Рейнольдса пленки конденсата; $B = 4/(r \cdot \rho' \cdot v')$ – коэффициент, определяемый в справочных пособиях по температуре насыщения греющего пара; H – высота трубы; $\Delta t = t_s - t_w$ – температурный напор, где t_s – температура насыщенного пара; t_w – температура стенки трубы; r , p , λ' , μ' – теплота

парообразования, плотность конденсата, коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости конденсата, определяемые в справочных пособиях по температуре насыщения греющего пара.

Расчетный коэффициент теплоотдачи при конденсации определяется по уравнению: $\alpha_p = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \alpha$,

где $\varphi_1 = 0,5\text{--}0,9$ – коэффициент использования, учитывающий наличие неконденсирующихся газов; $\varphi_2 = 0,7\text{--}0,9$ – коэффициент использования, учитывающий неполноту омывания поверхности паром и потери теплоты в пленке конденсата.

Корпус 1

$$\alpha_{1p} = 0,943[2151 \cdot 10^3 \cdot (928)^2 \cdot (0,685)^3 / (204 \cdot 10^{-6} \cdot 5,0 \cdot 9)]^{1/4} = 2676 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = \\ = 1926 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Корпус 2

$$\alpha_{2p} = 0,943[2208 \cdot 10^3 \cdot (944,5)^2 \cdot (0,684)^3 / (273 \cdot 10^{-6} \cdot 5,2 \cdot 9)]^{1/4} \cdot 0,85 \cdot 0,8 = \\ = 1699 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Корпус 3

$$\alpha_{3p} = 0,943[2255 \cdot 10^3 \cdot (957,4)^2 \cdot (0,68)^3 / (324 \cdot 10^{-6} \cdot 4,8 \cdot 9)]^{1/4} \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 1575 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Корпус 4

$$\alpha_{4p} = 0,943[2288 \cdot 10^3 \cdot (966)^2 \cdot (0,67)^3 / (350 \cdot 10^{-6} \cdot 4,4 \cdot 9)]^{1/4} \cdot 0,75 \cdot 0,8 = 1476 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Корпус 5

$$\alpha_{5p} = 0,943[2319 \cdot 10^3 \cdot (974)^2 \cdot (0,665)^3 / (410 \cdot 10^{-6} \cdot 4,1 \cdot 9)]^{1/4} \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 1350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Корпус 6

$$\alpha_{6p} = 0,943[2346 \cdot 10^3 \cdot (982)^2 \cdot (0,66)^3 / (463 \cdot 10^{-6} \cdot 3,7 \cdot 9)]^{1/4} \cdot 0,65 \cdot 0,8 = 1250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ СО СТОРОНЫ КИПЯЩЕГО РАСТВОРА

Термическое сопротивление теплоотдачи при кипении восходящего парожидкостного потока в вертикальных трубах – величина, обратная коэффициенту теплоотдачи $R_{\text{кип}} = 1/\alpha_2$, которая может определяться уравнением

Л. С. Стермана [7]: $\frac{Nu_{\text{кип}}}{Nu_{\text{б.к.}}} = 6150 \cdot N^{0,7}$, где $N = k_w \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{1,45} \cdot k_s^{1/3}$;

при $N < 0,4 \cdot 10^{-5} \rightarrow Nu_{\text{кип}} = Nu_{\text{б.к.}}$ – для воды и растворов; $k_w = \frac{q}{\rho'' \cdot r \cdot w_0}$ и

$k_s = \frac{r}{c_p \cdot T_s}$ – критерий кипения; q – плотность теплового потока; ρ'' –

плотность пара; w_0 – скорость циркуляции; c_p – теплоемкость; T_s – абсолютная

температура насыщения; $Nu_{\text{б.к.}} = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_w)^{0,25}$ – для турбулентно

двигающегося потока; $Nu_{\text{б.к.}} = 0,15 Re^{0,33} Gr^{0,1} Pr^{0,43} (Pr/Pr_w)^{0,25}$ – для ламинарно

двигающегося потока.

Для черного сульфатного щелока $R_{\text{кип}} = 1/\alpha_2$, может определяться уравнением [3]: $\frac{Nu_{\text{кип}}}{Nu_{\text{б.к.}}} = 12,5 \cdot 10^3 \cdot k_w^{0,45} \cdot k_{\Delta i_h}^{0,31} \cdot Pr_{\text{пл}}^{0,6} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0,93}$ при $k_{\Delta i_h} < 0,04$; уравнением $\frac{Nu_{\text{кип}}}{Nu_{\text{б.к.}}} = 2910 \cdot k_w^{0,45} \cdot k_{\Delta i_h}^{-0,28} \cdot Pr_{\text{пл}}^{0,6} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0,93}$ при $k_{\Delta i_h} > 0,04$ в диапазоне параметров работы ВС ЦБП, где $k_{\Delta i_h} = \frac{q}{\rho' \cdot w_0 \cdot \Delta i_h}$.

Для гравитационно стекающего раствора в вертикальных трубах – по уравнению Г. Гимбутиса: $Nu_{mf} = (0,165 \cdot Re_f^{0,16} - 0,4) \cdot Pr_f^{0,34} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25}$, где $Nu_{mf} = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3}$, $Re = 4\Gamma/\mu = 4\Gamma_v/v$, $\Gamma = G/\Pi$ и Γ_v – массовая и объемная плотности орошения соответственно. Уравнение справедливо при $Re > Re_{\text{кр}} = 2200 \cdot Pr^{0,3}$.

Воспользуемся уравнением Л. С. Стермана [7]: $\frac{Nu_{\text{кип}}}{Nu_{\text{б.к.}}} = 6150 \cdot N^{0,7}$.

Корпус 1

$$K_{w1} = (Q_{\text{пр}}/F)/(\rho'' \cdot r \cdot w_0),$$

$$\text{где } w_0 = 4S_{\text{пр}}/(\rho' \cdot n \cdot \pi \cdot d^2) = 4 \cdot 12,99/(1230 \cdot 1800 \cdot 3,14 \cdot 0,049^2) = 0,0031 \text{ м/с.}$$

$$K_{w1} = (17316 \cdot 10^3 / 1800) / (1,05 \cdot 2208 \cdot 10^3 \cdot 0,0031) = 1,34.$$

$$K_s = r/(c_p \cdot T_s) = 2208/(2,9 \cdot 401) = 1,9.$$

$$N = 1,34 \cdot (1,05/1230)^{1,45} \cdot 1,9^{0,33} = 1,34 \cdot 0,000035 \cdot 1,24 = 0,000058 > 0,4 \cdot 10^{-5}.$$

$$N^{0,7} = 0,000058^{0,7} = 0,001.$$

$Re = w \cdot d/v$, где v – коэффициент кинематической вязкости.

$$Re = 0,0031 \cdot 0,049 / 20 \cdot 10^{-6} = 7,6; Re^{0,33} = 1,95.$$

$$Nu_{\text{б.к.}} = 0,15 Re^{0,33} \cdot Gr^{0,1} \cdot Pr^{0,43} (Pr_f/Pr_w)^{0,25}.$$

$Gr = \beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t / v^2$; где $\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = (1/1230)(20/40) = 0,0004$ – коэффициент объемного расширения; $\Delta t = 133 - 128 = 5^{\circ}\text{C}$, температурный напор между стенкой трубы и раствором;

$$Gr = 9,81 \cdot 9^3 \cdot 5 / [0,0004 \cdot (18 \cdot 10^{-6})^2] = 2,76 \cdot 10^{17}; Gr^{0,1} = 55,47.$$

$$Pr = v \cdot c_p \cdot \rho' / \lambda = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 2,9 \cdot 10^3 \cdot 1230 / 0,5 = 143; Pr^{0,43} = 8,44.$$

$$Nu_{\text{б.к.}} = 0,15 \cdot 1,95 \cdot 55,47 \cdot 8,44 = 137;$$

$$\alpha_{\text{пр}} = 6150 \cdot 0,001 \cdot 137 \cdot 0,5 / 0,049 = 8597 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot K).$$

Корпус 2

$$w_0 = 4S_{\text{пр}}/(\rho' \cdot n \cdot \pi \cdot d^2) = 4 \cdot 16,91 / (1190 \cdot 1800 \cdot 3,14 \cdot 0,049^2) = 0,0041 \text{ м/с.}$$

$$K_{w2} = (Q_{\text{пр}}/F)/(\rho'' \cdot r \cdot w_0) = (16910 / 1800) / (0,636 \cdot 2252 \cdot 0,0041) = 1,6.$$

$$K_{s2} = r/(c_p \cdot T_s) = 2252 / (3,2 \cdot 375) = 1,87.$$

$$N = 1,6 \cdot (0,636 / 1190)^{1,45} \cdot 1,87^{0,33} = 1,6 \cdot 0,000018 \cdot 1,23 = 0,0000354 > 0,4 \cdot 10^{-5}.$$

$$N^{0,7} = 0,00077.$$

$$Re = w \cdot d / v = 0,0041 \cdot 0,049 / 6 \cdot 10^{-6} = 33,5; Re^{0,33} = 3,2.$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = (1/1190)(20/40) = 0,00042; \Delta t = 112,2 - 107,1 = 5,1 {}^{\circ}\text{C}.$$

$$Gr = \beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t / v^2 = 9,81 \cdot 9^3 \cdot 5,1 / [0,00042 \cdot (6 \cdot 10^{-6})^2] = 2,41 \cdot 10^{18}; Gr^{0,1} = 68,9.$$

$$Pr = \nu \cdot c_p \cdot \rho' / \lambda = 6 \cdot 10^{-6} \cdot 3,2 \cdot 10^3 \cdot 1190 / 0,54 = 42,3; Pr^{0,43} = 5,0.$$

$$Nu = 0,15 \cdot 3,2 \cdot 68,9 \cdot 5,0 = 165,4;$$

$$\alpha_{pk} = 6150 \cdot 0,00077 \cdot 165,4 \cdot 0,54 / 0,049 = 8632 \text{ BT/(m}^2 \cdot K).$$

Корпус 3

$$w_0 = 4S_{np}/(\rho' \cdot n \cdot \pi \cdot d^2) = 4 \cdot 20,34 / (1130 \cdot 1800 \cdot 3,14 \cdot 0,049^2) = 0,0053 \text{ м/с.}$$

$$K_{w3} = (Q_{np}/F)/(\rho'' \cdot r \cdot w_0) = (18156 \cdot 10^3 / 1800) / (0,408 \cdot 2286 \cdot 1000 \cdot 0,0053) = 2,04.$$

$$K_{s3} = r / (c_p \cdot t_s) = 2286 / (3,4 \cdot 365) = 1,84.$$

$$N = 2,04 \cdot (0,408 / 1130)^{1,45} \cdot 1,84^{0,33} = 2,04 \cdot 0,00001 \cdot 1,22 = 0,000025 > 0,4 \cdot 10^{-5}.$$

$$N^{0,7} = 0,0006.$$

$$Re = w \cdot d / \nu = 0,0053 \cdot 0,049 / 5 \cdot 10^{-6} = 51,9; Re^{0,33} = 4,32.$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = (1/1130)(20/40) = 0,00044; \Delta t = 96,4 - 91,7 = 4,7 {}^{\circ}\text{C}.$$

$$Gr = \beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t / v^2 = 9,81 \cdot 9^3 \cdot 4,7 / [0,00044 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2] = 3,05 \cdot 10^{18}; Gr^{0,1} = 70,5.$$

$$Pr = \nu \cdot c_p \cdot \rho' / \lambda = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,4 \cdot 10^3 \cdot 1130 / 0,55 = 34,9; Pr^{0,43} = 4,6.$$

$$Nu = 0,15 \cdot 4,32 \cdot 70,5 \cdot 4,6 = 210;$$

$$\alpha_{pk} = 6150 \cdot 0,0006 \cdot 210 \cdot 0,55 / 0,049 = 8697 \text{ BT/(m}^2 \cdot K).$$

Корпус 4

$$w_0 = 4S_{np}/(\rho' \cdot n \cdot \pi \cdot d^2) = 4 \cdot 23,31 / (1120 \cdot 1800 \cdot 3,14 \cdot 0,049^2) = 0,0061 \text{ м/с.}$$

$$K_{w4} = (Q_{np}/F)/(\rho'' \cdot r \cdot w_0) = (18186 \cdot 10^3 / 1800) / (0,261 \cdot 2316 \cdot 1000 \cdot 0,0061) = 2,74.$$

$$K_{s4} = r / (c_p \cdot t_s) = 2316 / (3,5 \cdot 350,3) = 1,89.$$

$$N = 2,74 \cdot (0,261 / 1120)^{1,45} \cdot 1,89^{0,33} = 2,74 \cdot 0,0000054 \cdot 1,23 = 0,000018 > 0,4 \cdot 10^{-5}.$$

$$N^{0,7} = 0,000477.$$

$$Re = w \cdot d / \nu = 0,0061 \cdot 0,049 / 3 \cdot 10^{-6} = 99,6; Re^{0,33} = 4,56.$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = (1/1120)(20/40) = 0,00045; \Delta t = 83,6 - 79,3 = 4,3 {}^{\circ}\text{C}.$$

$$Gr = \beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t / v^2 = 9,81 \cdot 9^3 \cdot 4,3 / [0,00045 \cdot (3 \cdot 10^{-6})^2] = 7,6 \cdot 10^{18}; Gr^{0,1} = 77,3$$

$$Pr = \nu \cdot c_p \cdot \rho' / \lambda = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot 10^3 \cdot 1120 / 0,57 = 21; Pr^{0,43} = 3,67.$$

$$Nu = 0,15 \cdot 4,56 \cdot 77,3 \cdot 3,67 = 194;$$

$$\alpha_{pk} = 6150 \cdot 0,000477 \cdot 194 \cdot 0,57 / 0,049 = 6620 \text{ BT/(m}^2 \cdot K).$$

Корпус 5

$$w_0 = 4S_{np}/(\rho' \cdot n \cdot \pi \cdot d^2) = 4 \cdot 25,78 / (1110 \cdot 1800 \cdot 3,14 \cdot 0,049^2) = 0,0068 \text{ м/с.}$$

$$K_{w4} = (Q_{np}/F)/(\rho'' \cdot r \cdot w_0) = (17086 \cdot 10^3 / 1800) / (0,168 \cdot 2344 \cdot 1000 \cdot 0,0068) = 3,54$$

$$K_{s4} = r / (c_p \cdot t_s) = 2344 / (3,6 \cdot 341) = 1,91$$

$$N = 3,54 \cdot (0,168/1110)^{1,45} \cdot 1,91^{0,33} = 3,54 \cdot 0,0000029 \cdot 1,24 = 0,0000127 > 0,4 \cdot 10^{-5}.$$

$$N^{0,7} = 0,000374.$$

$$Re = w \cdot d / v = 0,0068 \cdot 0,049 / 1,2 \cdot 10^{-6} = 277; Re^{0,33} = 6,4.$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = (1/1110)(20/40) = 0,00045; \Delta t = 71,8 - 67,8 = 4,0 {}^{\circ}\text{C}.$$

$$Gr = \beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t / v^2 = 9,81 \cdot 9^3 \cdot 4,0 / [0,00045(1,2 \cdot 10^{-6})^2] = 4,41 \cdot 10^{19}; Gr^{0,1} = 92,1.$$

$$Pr = \nu \cdot c_p \cdot \rho' / \lambda = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3,6 \cdot 10^3 \cdot 1110 / 0,58 = 8,26; Pr^{0,43} = 2,48.$$

$$Nu = 0,15 \cdot 6,4 \cdot 92,1 \cdot 2,48 = 219,3;$$

$$\alpha_{pk} = 6150 \cdot 0,000374 \cdot 219,3 \cdot 0,58 / 0,049 = 5970 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot K).$$

Корпус 6

$$w_0 = 4S_{\text{пп}} / (\rho' \cdot n \cdot \pi \cdot d^2) = 4 \cdot 27,77 / (1115 \cdot 1800 \cdot 3,14 \cdot 0,049^2) = 0,0073 \text{ м/с.}$$

$$K_{w4} = (Q/F) / (\rho'' \cdot r \cdot w_0) = (16627 \cdot 10^3 / 1800) / (0,109 \cdot 2368 \cdot 1000 \cdot 0,0073) = 4,9.$$

$$K_{s4} = r / (c_p \cdot t_s) = 2368 / (3,65 \cdot 329) = 1,97.$$

$$N = 4,9 \cdot (0,109/1115)^{1,45} \cdot 1,97^{0,33} = 4,9 \cdot 0,00000153 \cdot 1,25 = 0,00000937 > 0,4 \cdot 10^{-5}.$$

$$N^{0,7} = 0,000302.$$

$$Re = w \cdot d / v = 0,0073 \cdot 0,049 / 1,5 \cdot 10^{-6} = 238; Re^{0,33} = 6,09.$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = (1/1115)(20/40) = 0,00045; \Delta t = 61,2 - 57,6 = 3,6 {}^{\circ}\text{C}.$$

$$Gr = \beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t / v^2 = 9,81 \cdot 9^3 \cdot 3,6 / [0,00045 \cdot (1,5 \cdot 10^{-6})^2] = 2,54 \cdot 10^{19}; Gr^{0,1} = 87,2.$$

$$Pr = \nu \cdot c_p \cdot \rho' / \lambda = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,65 \cdot 10^3 \cdot 1115 / 0,61 = 10,0; Pr^{0,43} = 2,69.$$

$$Nu = 0,15 \cdot 6,09 \cdot 87,2 \cdot 2,69 = 214,3;$$

$$\alpha_{pk} = 6150 \cdot 0,000302 \cdot 214,3 \cdot 0,61 / 0,049 = 4955 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot K).$$

Полученные значения коэффициентов теплоотдачи заносим в таблицу 1.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ВА

Поверхность теплообмена ВА определяется по уравнению теплопередачи: $F = Q / (K \cdot \Delta T)$,

где $Q = w \cdot r$ – тепловая нагрузка корпуса; w – количество испаренной ВА влаги; r – теплота парообразования; $\Delta T_i = t_i - T''$ – температурный напор в кипятильниках ВА, в которых происходит кипение раствора; $\Delta T_i = (\Delta T_b - \Delta T_m) / \ln(\Delta T_b / \Delta T_m)$ – температурный напор в кипятильниках ВА, в которых осуществляется перегрев однофазного раствора; $K = \frac{1}{R_{\text{конд}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{нак}} + R_{\text{кип}}}$ – расчетный коэффициент теплопередачи; $R_{\text{конд}} = 1 / \alpha_{IP}$ – термическое сопротивление конденсации, $R_{cm} = (\delta / \lambda)_{\text{ст}}$ – термическое сопротивление стенки трубы, при этом обычно $\delta = 0,0025 - 0,0035$ м, а $\lambda = 45 - 55 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot K)$ – для труб из углеродистой стали и $\lambda = 14 - 18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot K)$ – для труб из нержавеющей стали;

$R_{\text{нак}}$ – термическое сопротивление накипи, определяется по уравнению:

$R_{\text{нак}} = 1,658 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot B^{0,37}$; $R_{\text{кип}} = 1/\alpha_2$ – термическое сопротивление теплоотдачи при кипении парожидкостного потока.

Корпус 1

$$K = 1/(5,19 + 1,16 + 0,0178 + 1,33) \cdot 10^{-4} = 8,93 \cdot 10^{-4} = 1120 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Межпромывочное время работы аппарата $\tau_{\text{сyt}} = 5,19/0,0178 = 29$ сут.

$$F = 17316 \cdot 10^3 / (8597 \cdot 10,98) = 1408 \text{ м}^2.$$

Корпус 2

$$K = 1/(5,88 + 1,33 + 0,0138 + 1,1) \cdot 10^{-4} = 8,324 \cdot 10^{-4} = 1201 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Межпромывочное время работы аппарата $\tau_{\text{сyt}} = 5,88/0,0138 = 40$ сут.

$$F = 16910 \cdot 10^3 / (1201 \cdot 10,25) = 1374 \text{ м}^2.$$

Корпус 3

$$K = 1/(6,34 + 1,33 + 0,0111 + 1,1) \cdot 10^{-4} = 8,78 \cdot 10^{-4} = 1139 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Межпромывочное время работы аппарата $\tau_{\text{сyt}} = 6,34/0,0111 = 634$ сут.

$$F = 18156 \cdot 10^3 / (1139 \cdot 9,52) = 1676 \text{ м}^2.$$

Корпус 4

$$K = 1/(6,77 + 1,33 + 0,009 + 1,5) \cdot 10^{-4} = 9,61 \cdot 10^{-4} = 1040 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Межпромывочное время работы аппарата $\tau_{\text{сyt}} = 6,77/0,009 = 70$ сут.

$$F = 18186 \cdot 10^3 / (1040 \cdot 8,78) = 1991 \text{ м}^2.$$

Корпус 5

$$K = 1/(7,4 + 1,33 + 0,009 + 1,7) \cdot 10^{-4} = 10,44 \cdot 10^{-4} = 958 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Межпромывочное время работы аппарата $\tau_{\text{сyt}} = 7,4/0,009 = 82$ сут.

$$F = 17086 \cdot 10^3 / (958 \cdot 8,05) = 2215 \text{ м}^2.$$

Корпус 6

$$K = 1/(8,0 + 1,33 + 0,0056 + 2,0) \cdot 10^{-4} = 11,33 \cdot 10^{-4} = 882 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Межпромывочное время работы аппарата $\tau_{\text{сyt}} = 8,00/0,0056 = 1428$ сут.

$$F = 16727 \cdot 10^3 / (882 \cdot 7,32) = 2590 \text{ м}^2.$$

$$\Sigma F_p = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 = 1408 + 1374 + 1676 + 1991 + 2215 + 2590 = 11254 \text{ м}^2.$$

$$F_{cp} = \Sigma F_p / n = 11254 / 6 = 1875 \text{ м}^2. \Delta = (1875 - 1800) / 1875 = 4 \text{ \%}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оформление текстовой части курсовой работы и курсового проекта. Краткая выписка из ГОСТ 7.32-2017 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления: методические рекомендации для студентов и предодавателей / М. Д. Баранова, А. Ю. Котова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 22 с. – Текст электронный. – URL: <http://nizrp:narod.ru/recomedation.pdf>
2. Белоусов В. Н. Выпускная работа бакалавра: методические указания к выполнению выпускной квалификационной работы по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»: методические указания / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, С. В. Антуфьев. – СПб.: СПбГТУРП, 2015.
3. Суслов, В. А. Тепловые процессы в выпарных установках ЦБП: монография / В. А. Суслов, А. А. Поздняков. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 400 с. – Текст: непосредственный.
4. Суслов, В. А. Теплообменные процессы выпарки и выпарные установки: учеб. пособие / В. А. Суслов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. – 113 с. – Текст: непосредственный.
5. Справочник инженера-химика. В 2-х т. / Пер. с англ.; Под общ. ред. акад. Н. М. Жаворонкова. – М., 1969. – Текст: непосредственный.
6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Справочник / А. М. Бакластов; В. М. Бродянский; Б. П. Голубев и др.; Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – Текст: непосредственный.
7. Кутепов А. М., Стерман Л. С. Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1986. – 448 с. – Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

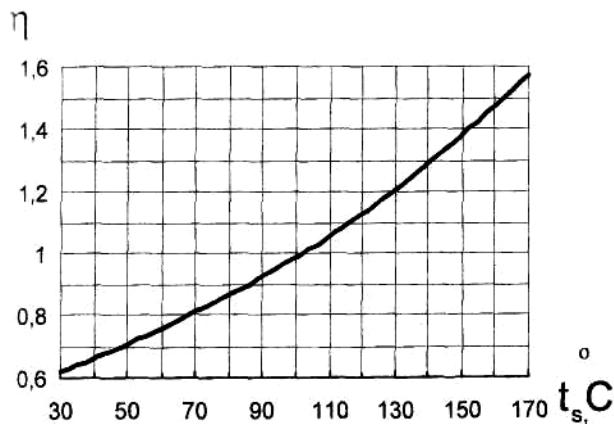


Рисунок 4 – Зависимость поправки на величину внешнего давления от температуры насыщения воды T_s

Рисунок 5 – Зависимость нормальной температурной депрессии щелоков целлюлозного производства от концентрации сухих веществ:
 1 – черный сульфатный щелок;
 2 – нейтральные сульфитные щелока;
 3 – сульфатный щелок на кальциевом основании

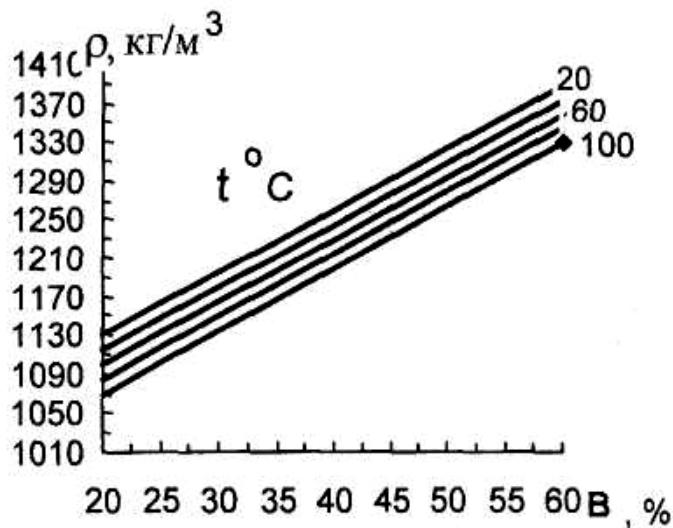
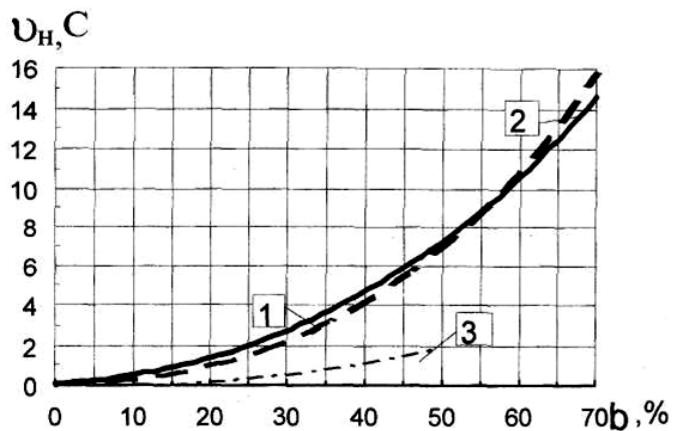


Рисунок 6 – Зависимость плотности сульфатных щелоков от концентрации и температуры

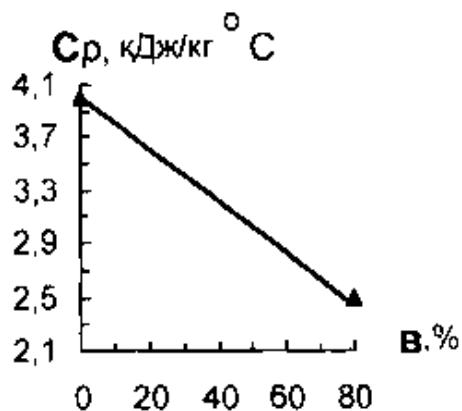


Рисунок 7 – Теплоемкость сульфатных щелоков

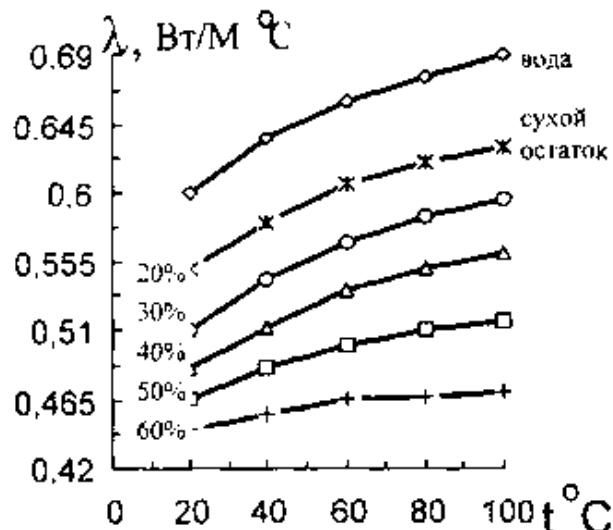


Рисунок 8 – Теплопроводность сульфатного щелока

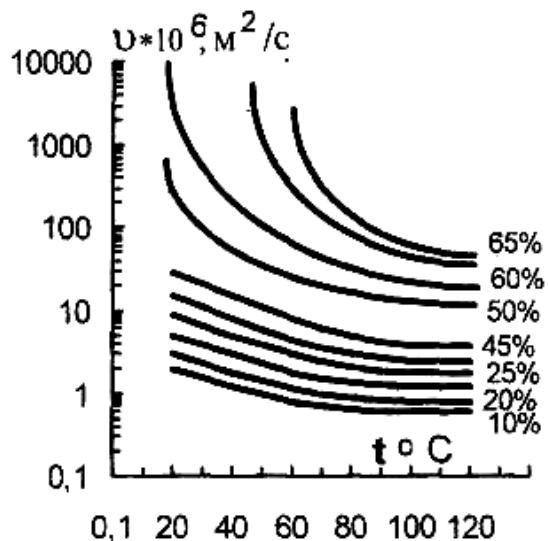


Рисунок 9 – Зависимость кинетической вязкости сульфатных щелоков от содержания сухой массы и температуры

Теплофизические свойства некоторых растворов приводятся в справочной и специальной литературе [3,4].

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА
В СОСТОЯНИИ НАСЫЩЕНИЯ (ПО ТЕМПЕРАТУРАМ)**

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>h'</i>	<i>h''</i>	<i>r</i>	<i>s'</i>	<i>s''</i>	<i>s'' - s'</i>
0	273,15	$6,108 \cdot 10^2$	0,0010002	206,321	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565	9,1567
0,01	273,16	$6,112 \cdot 10^2$	0,00100022	206,175	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1562	9,1562
1	274,15	$6,566 \cdot 10^2$	0,0010001	192,611	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298	9,1146
2	275,15	$7,054 \cdot 10^2$	0,0010001	179,935	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035	9,0729
3	276,15	$7,575 \cdot 10^2$	0,0010000	168,165	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773	9,0314
4	277,15	$8,129 \cdot 10^2$	0,0010000	157,267	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514	8,9903
5	278,15	$8,718 \cdot 10^2$	0,0010000	147,167	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258	8,9496
6	279,15	$9,346 \cdot 10^2$	0,0010000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003	8,9090
7	280,15	$1,0012 \cdot 10^3$	0,0010001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751	8,8688
8	281,15	$1,0721 \cdot 10^3$	0,0010001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501	8,8288
9	282,15	$1,1473 \cdot 10^3$	0,0010002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254	8,7892
10	283,15	$1,2271 \cdot 10^3$	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009	8,7499
11	284,15	$1,3118 \cdot 10^3$	0,0010003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766	8,7108
12	285,15	$1,4015 \cdot 10^3$	0,0010004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525	8,6720
13	286,15	$1,4967 \cdot 10^3$	0,0010006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286	8,6334
14	287,15	$1,5974 \cdot 10^3$	0,0010007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050	8,5952
15,0	288,15	$1,7041 \cdot 10^3$	0,0010008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815	8,5572
15,5	288,65	$1,7598 \cdot 10^3$	0,0010009	75,632	65,03	2529,5	2464,5	0,2316	8,7699	8,5383
16,0	289,15	$1,8170 \cdot 10^3$	0,0010010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583	8,5195
16,5	289,65	$1,8759 \cdot 10^3$	0,0010011	71,194	69,22	2531,3	2462,1	0,2460	8,7468	8,5008
17,0	290,15	$1,9364 \cdot 10^3$	0,0010012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353	8,4820
17,5	290,65	$1,9986 \cdot 10^3$	0,0010012	67,051	73,40	2533,1	2459,7	0,2605	8,7239	8,4634
18,0	291,15	$2,0626 \cdot 10^3$	0,0010013	65,080	75,50	2534,0	2458,5	0,2677	8,7125	8,4448
18,5	291,65	$2,1284 \cdot 10^3$	0,0010014	63,175	77,59	2535,0	2457,4	0,2748	8,7011	8,4263
19,0	292,15	$2,1960 \cdot 10^3$	0,0010015	61,334	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898	8,4078
19,5	292,65	$2,26547 \cdot 10^3$	0,0010016	59,556	81,77	2536,8	2455,0	0,2892	8,6786	8,3894
20,0	293,15	$2,3368 \cdot 10^3$	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674	8,3711
20,5	293,65	$2,4102 \cdot 10^3$	0,0010018	56,166	85,95	2538,6	2452,6	0,3034	8,6563	8,3529
21,0	294,15	$2,4855 \cdot 10^3$	0,0010019	54,556	88,04	2539,5	2451,5	0,3105	8,6452	8,3347
21,5	294,65	$2,5629 \cdot 10^3$	0,0010020	52,997	90,13	2540,4	2450,3	0,3176	8,6342	8,3166
22,0	295,15	$2,6424 \cdot 10^3$	0,0010022	51,488	92,22	2541,4	2449,2	0,3247	8,6232	8,2985
22,5	295,65	$2,7241 \cdot 10^3$	0,0010023	50,027	94,32	2542,3	2448,0	0,3318	8,6123	8,2805
23,0	296,15	$2,8079 \cdot 10^3$	0,0010024	48,615	96,41	2543,2	2446,8	0,3389	8,6014	8,2625
23,5	296,65	$2,8940 \cdot 10^3$	0,0010025	47,247	98,50	2544,1	2445,6	0,3459	8,5905	8,2446
24,0	297,15	$2,9824 \cdot 10^3$	0,0010026	45,923	100,59	2545,0	2444,4	0,3530	8,5797	8,2267
24,5	297,65	$3,0731 \cdot 10^3$	0,0010028	44,641	102,68	2545,9	2443,2	0,3600	8,5690	8,2090
25,0	298,15	$3,1663 \cdot 10^3$	0,0010029	43,399	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583	8,1913
25,5	298,65	$3,2619 \cdot 10^3$	0,0010030	42,196	106,86	2547,7	2440,8	0,3740	8,5476	8,1736
26,0	299,15	$3,3600 \cdot 10^3$	0,0010032	41,031	108,95	2548,6	2439,6	0,3810	8,5370	8,1560
26,5	299,65	$3,4606 \cdot 10^3$	0,0010033	39,904	111,04	2549,5	2438,5	0,3880	8,5264	8,1384
27,0	300,15	$3,5639 \cdot 10^3$	0,0010034	38,811	113,13	2550,4	2437,3	0,3949	8,5159	8,1210
27,5	300,65	$3,6698 \cdot 10^3$	0,0010036	37,752	115,22	2551,4	2436,2	0,4019	8,5054	8,1035
28,0	301,15	$3,7785 \cdot 10^3$	0,0010037	36,726	117,31	2552,3	2435,0	0,4088	8,4950	8,0862
28,5	301,65	$3,8900 \cdot 10^3$	0,0010039	35,732	119,40	2553,2	2433,8	0,4158	8,4846	8,0688
29,0	302,15	$4,0043 \cdot 10^3$	0,0010040	34,768	121,48	2554,1	2432,6	0,4227	8,4743	8,0516

Продолжение табл. II-1

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>h'</i>	<i>h''</i>	<i>r</i>	<i>s'</i>	<i>s''</i>	<i>s'' - s'</i>
29,5	302,65	$4,1215 \cdot 10^3$	0,0010042	33,834	123,57	2555,0	2431,4	0,4296	8,4640	8,0344
30,0	303,15	$4,2417 \cdot 10^3$	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537	8,0172
30,5	303,65	$4,3650 \cdot 10^3$	0,0010045	32,050	127,75	2556,8	2429,0	0,4434	8,4435	8,0001
31,0	304,15	$4,4913 \cdot 10^3$	0,0010046	31,199	129,84	2557,7	2427,9	0,4503	8,4334	7,9831
31,5	304,65	$4,6208 \cdot 10^3$	0,0010048	30,373	131,93	2558,6	2426,7	0,4571	8,4233	7,9662
32,0	305,15	$4,7536 \cdot 10^3$	0,0010049	29,572	134,02	2559,5	2425,5	0,4640	8,4132	7,9492
32,5	305,65	$4,8896 \cdot 10^3$	0,0010051	28,796	136,11	2560,4	2424,3	0,4708	8,4031	7,9323
33,0	306,15	$5,0290 \cdot 10^3$	0,0010053	28,042	138,20	2561,4	2423,2	0,4777	8,3932	7,9155
33,5	306,65	$5,1718 \cdot 10^3$	0,0010054	27,312	140,29	2562,3	2422,0	0,4845	8,3832	7,8987
34,0	307,15	$5,3182 \cdot 10^3$	0,0010056	26,602	142,38	2563,2	2420,8	0,4913	8,3733	7,8820
34,5	307,65	$5,4681 \cdot 10^3$	0,0010058	25,914	144,47	2564,1	2419,6	0,4981	8,3634	7,8653
35,0	308,15	$5,6217 \cdot 10^3$	0,0010060	25,246	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536	7,8487
36,0	309,15	$5,9401 \cdot 10^3$	0,0010063	23,968	150,74	2566,8	2416,1	0,5184	8,3341	7,8157
37,0	310,15	$6,2740 \cdot 10^3$	0,0010067	22,764	154,92	2568,6	2413,7	0,5319	8,3147	7,7828
38,0	311,15	$6,6240 \cdot 10^3$	0,0010070	21,629	159,09	2570,4	2411,3	0,5453	8,2955	7,7502
39,0	312,15	$6,9907 \cdot 10^3$	0,0010074	20,558	163,27	2572,2	2408,9	0,5588	8,2765	7,7177
40	313,15	$7,3749 \cdot 10^3$	0,0010078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576	7,6855
41	314,15	$7,7772 \cdot 10^3$	0,0010082	18,594	171,63	2575,8	2404,2	0,5854	8,2389	7,6535
42	315,15	$8,1983 \cdot 10^3$	0,0010086	17,694	175,81	2577,6	2401,8	0,5987	8,2203	7,6216
43	316,15	$8,6390 \cdot 10^3$	0,0010090	16,843	179,99	2579,4	2399,4	0,6120	8,2019	7,5899
44	317,15	$9,0998 \cdot 10^3$	0,0010094	16,039	184,17	2581,1	2396,9	0,6252	8,1836	7,5584
45	318,15	$9,5817 \cdot 10^3$	0,0010099	15,278	188,35	2582,9	2394,5	0,6383	8,1655	7,5272
46	319,15	$1,0085 \cdot 10^4$	0,0010103	14,559	192,53	2584,7	2392,2	0,6514	8,1475	7,4961
47	320,15	$1,0612 \cdot 10^4$	0,0010107	13,879	196,71	2586,5	2389,8	0,6645	8,1297	7,4652
48	321,15	$1,1161 \cdot 10^4$	0,0010112	13,236	200,89	2588,3	2387,4	0,6776	8,1121	7,4345
49	322,15	$1,1735 \cdot 10^4$	0,0010116	12,626	205,07	2590,1	2385,0	0,6906	8,0945	7,4039
50	323,15	$1,2335 \cdot 10^4$	0,0010121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771	7,3736
51	324,15	$1,2960 \cdot 10^4$	0,0010126	11,501	213,44	2593,6	2380,2	0,7164	8,0598	7,3434
52	325,15	$1,3612 \cdot 10^4$	0,0010131	10,982	217,62	2595,4	2377,8	0,7293	8,0427	7,3133
53	326,15	$1,4292 \cdot 10^4$	0,0010136	10,490	221,80	2597,2	2375,4	0,7422	8,0258	7,2836
54	327,15	$1,5001 \cdot 10^4$	0,0010140	10,024	225,98	2598,9	2372,9	0,7550	8,0089	7,2539
55	328,15	$1,5740 \cdot 10^4$	0,0010145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922	7,2245
56	329,15	$1,6510 \cdot 10^4$	0,0010150	9,1609	234,35	2602,4	2368,1	0,7804	7,9756	7,1952
57	330,15	$1,7312 \cdot 10^4$	0,0010156	8,7618	238,54	2604,2	2365,7	0,7931	7,9591	7,1660
58	331,15	$1,8146 \cdot 10^4$	0,0010161	8,3831	242,72	2606,0	2363,3	0,8058	7,9428	7,1370
59	332,15	$1,9015 \cdot 10^4$	0,0010166	8,0229	246,91	2607,7	2360,8	0,8184	7,9266	7,1082
60	333,15	$1,9919 \cdot 10^4$	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106	7,0796
61	334,15	$2,0859 \cdot 10^4$	0,0010177	7,3554	255,28	2611,2	2355,9	0,8435	7,8946	7,0511
62	335,15	$2,1837 \cdot 10^4$	0,0010182	7,0458	259,46	2613,0	2353,5	0,8560	7,8788	7,0228
63	336,15	$2,2854 \cdot 10^4$	0,0010188	6,7512	263,65	2614,7	2351,1	0,8685	7,8631	6,9946
64	337,15	$2,3910 \cdot 10^4$	0,0010193	6,4711	267,84	2616,4	2348,6	0,8809	7,8475	6,9666
65	338,15	$2,5008 \cdot 10^4$	0,0010199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320	6,9387
66	339,15	$2,6148 \cdot 10^4$	0,0010205	5,9502	276,21	2619,9	2343,7	0,9057	7,8167	6,9110
67	340,15	$2,7332 \cdot 10^4$	0,0010211	5,7082	280,40	2621,6	2341,2	0,9180	7,8015	6,8835
68	341,15	$2,8561 \cdot 10^4$	0,0010217	5,4775	284,59	2623,3	2338,7	0,9303	7,7864	6,8561
69	342,15	$2,9837 \cdot 10^4$	0,0010222	5,2576	288,78	2625,1	2336,3	0,9426	7,7714	6,8288
70	343,15	$3,1161 \cdot 10^4$	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565	6,8017
71	344,15	$3,2533 \cdot 10^4$	0,0010235	4,8481	297,16	2628,5	2331,3	0,9670	7,7417	6,7747
72	345,15	$3,3957 \cdot 10^4$	0,0010241	4,6574	301,36	2630,2	2328,8	0,9792	7,7270	6,7478
73	346,15	$3,5433 \cdot 10^4$	0,0010247	4,4753	305,55	2631,9	2326,3	0,9913	7,7125	6,7212
74	347,15	$3,6963 \cdot 10^4$	0,0010253	4,3015	309,74	2633,6	2323,9	1,0034	7,6980	6,6946
75	348,15	$3,8548 \cdot 10^4$	0,0010259	4,1356	313,94	2635,3	2321,4	1,0154	7,6837	6,6683
76	349,15	$4,0190 \cdot 10^4$	0,0010266	3,9771	318,13	2637,0	2318,9	1,0275	7,6694	6,6419
77	350,15	$4,1890 \cdot 10^4$	0,0010272	3,8257	322,33	2638,7	2316,4	1,0395	7,6553	6,6158
78	351,15	$4,3650 \cdot 10^4$	0,0010279	3,6811	326,52	2640,4	2313,9	1,0514	7,6413	6,5899
79	352,15	$4,5473 \cdot 10^4$	0,0010285	3,5427	330,72	2642,1	2311,4	1,0634	7,6274	6,5640
80	353,15	$4,7359 \cdot 10^4$	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135	6,5383
81	354,15	$4,9310 \cdot 10^4$	0,0010299	3,2839	339,11	2645,4	2306,3	1,0871	7,5998	6,5127
82	355,15	$5,1328 \cdot 10^4$	0,0010305	3,1629	343,31	2647,1	2303,8	1,0990	7,5862	6,4872
83	356,15	$5,3415 \cdot 10^4$	0,0010312	3,0471	347,51	2648,8	2301,3	1,1108	7,5726	6,4618

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v</i> *	<i>v</i> ''	<i>h</i> *	<i>h</i> ''	<i>r</i>	<i>s</i> *	<i>s</i> ''	<i>s</i> '' - <i>s</i> *
84	357,15	$5,5572 \cdot 10^4$	0,0010319	2,9362	351,71	2650,4	2298,7	1,1225	7,5592	6,4367
85	358,15	$5,7803 \cdot 10^4$	0,0010326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459	6,4116
86	359,15	$6,0107 \cdot 10^4$	0,0010333	2,7284	360,12	2653,7	2293,6	1,1460	7,5326	6,3866
87	360,15	$6,2488 \cdot 10^4$	0,0010340	2,6309	364,32	2655,4	2291,1	1,1577	7,5195	6,3618
88	361,15	$6,4947 \cdot 10^4$	0,0010347	2,5376	368,53	2657,0	2288,5	1,1693	7,5064	6,3371
89	362,15	$6,7486 \cdot 10^4$	0,0010354	2,4482	372,73	2658,7	2286,0	1,1809	7,4934	6,3125
90	363,15	$7,0108 \cdot 10^4$	0,0010361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805	6,2880
91	364,15	$7,2814 \cdot 10^4$	0,0010369	2,2801	381,15	2661,9	2280,7	1,2041	7,4677	6,2636
92	365,15	$7,5607 \cdot 10^4$	0,0010376	2,2012	385,36	2663,5	2278,1	1,2156	7,4550	6,2394
93	366,15	$7,8488 \cdot 10^4$	0,0010384	2,1256	389,57	2665,2	2275,6	1,2271	7,4424	6,2153
94	367,15	$8,1460 \cdot 10^4$	0,0010391	2,0529	393,78	2666,8	2273,0	1,2386	7,4299	6,1913
95	368,15	$8,4525 \cdot 10^4$	0,0010398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174	6,1674
96	369,15	$8,7685 \cdot 10^4$	0,0010406	1,9163	402,20	2670,0	2267,8	1,2615	7,4051	6,1436
97	370,15	$9,0943 \cdot 10^4$	0,0010414	1,8520	406,42	2671,6	2265,2	1,2729	7,3928	6,1199
98	371,15	$9,4301 \cdot 10^4$	0,0010421	1,7902	410,63	2673,2	2262,6	1,2842	7,3806	6,0964
99	372,15	$9,7760 \cdot 10^4$	0,0010429	1,7309	414,85	2674,8	2259,9	1,2956	7,3685	6,0729
100	373,15	$1,01325 \cdot 10^5$	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564	6,0495
101	374,15	$1,0450 \cdot 10^5$	0,0010445	1,6190	423,28	2677,9	2254,6	1,3182	7,3445	6,0263
102	375,15	$1,0878 \cdot 10^5$	0,0010453	1,5664	427,50	2679,5	2252,0	1,3294	7,3326	6,0032
103	376,15	$1,1267 \cdot 10^5$	0,0010461	1,5157	431,73	2681,0	2249,3	1,3406	7,3208	5,9802
104	377,15	$1,1668 \cdot 10^5$	0,0010469	1,4669	435,95	2682,6	2246,6	1,3518	7,3090	5,9572
105	378,15	$1,2080 \cdot 10^5$	0,0010477	1,4200	440,17	2684,1	2243,9	1,3630	7,2974	5,9344
106	379,15	$1,2504 \cdot 10^5$	0,0010485	1,3749	444,40	2685,7	2241,3	1,3742	7,2858	5,9116
107	380,15	$1,2941 \cdot 10^5$	0,0010494	1,3315	448,63	2687,2	2238,6	1,3853	7,2743	5,8890
108	381,15	$1,3390 \cdot 10^5$	0,0010502	1,2897	452,85	2688,8	2235,9	1,3964	7,2629	5,8665
109	382,15	$1,3852 \cdot 10^5$	0,0010510	1,2494	457,08	2690,3	2233,2	1,4074	7,2515	5,8441
110	383,15	$1,4326 \cdot 10^5$	0,0010519	1,2106	461,32	2691,8	2230,5	1,4185	7,2402	5,8217
111	384,15	$1,4814 \cdot 10^5$	0,0010527	1,1733	465,55	2693,3	2227,7	1,4295	7,2290	5,7995
112	385,15	$1,5316 \cdot 10^5$	0,0010536	1,1373	469,78	2694,8	2225,0	1,4405	7,2179	5,7774
113	386,15	$1,5832 \cdot 10^5$	0,0010544	1,1025	474,02	2696,3	2222,3	1,4515	7,2068	5,7553
114	387,15	$1,6361 \cdot 10^5$	0,0010553	1,0691	478,26	2697,8	2219,5	1,4624	7,1958	5,7334
115	388,15	$1,6905 \cdot 10^5$	0,0010562	1,0369	482,50	2699,3	2216,8	1,4733	7,1848	5,7115
116	389,15	$1,7464 \cdot 10^5$	0,0010570	1,0058	486,74	2700,8	2214,1	1,4842	7,1739	5,6897
117	390,15	$1,8038 \cdot 10^5$	0,0010579	0,97583	490,98	2702,2	2211,2	1,4951	7,1631	5,6680
118	391,15	$1,8628 \cdot 10^5$	0,0010588	0,94687	495,22	2703,7	2208,5	1,5060	7,1524	5,6464
119	392,15	$1,9233 \cdot 10^5$	0,0010597	0,91896	499,47	2705,2	2205,7	1,5168	7,1417	5,6249
120	393,15	$1,9854 \cdot 10^5$	0,0010605	0,89202	503,7	2706,6	2202,9	1,5276	7,1310	5,6034
121	394,15	$2,0491 \cdot 10^5$	0,0010615	0,86603	508,0	2708,1	2200,1	1,5384	7,1205	5,5821
122	395,15	$2,1145 \cdot 10^5$	0,0010625	0,84092	512,2	2709,5	2197,3	1,5491	7,1100	5,5609
123	396,15	$2,1815 \cdot 10^5$	0,0010634	0,81671	516,5	2710,9	2194,4	1,5599	7,0996	5,5397
124	397,15	$2,2503 \cdot 10^5$	0,0010643	0,79330	520,7	2712,3	2191,6	1,5706	7,0892	5,5186
125	398,15	$2,3209 \cdot 10^5$	0,0010652	0,77067	525,0	2713,8	2188,8	1,5813	7,0788	5,4975
126	399,15	$2,3932 \cdot 10^5$	0,0010662	0,74884	529,2	2715,2	2186,0	1,5919	7,0686	5,4767
127	400,15	$2,4674 \cdot 10^5$	0,0010671	0,72771	533,5	2716,6	2183,1	1,6026	7,0584	5,4558
128	401,15	$2,5434 \cdot 10^5$	0,0010681	0,70732	537,8	2717,9	2180,1	1,6132	7,0482	5,4350
129	402,15	$2,6213 \cdot 10^5$	0,0010690	0,68760	542,0	2719,3	2177,3	1,6238	7,0382	5,4144
130	403,15	$2,7012 \cdot 10^5$	0,0010700	0,66851	546,3	2720,7	2174,4	1,6344	7,0281	5,3937
131	404,15	$2,7830 \cdot 10^5$	0,0010710	0,65007	550,6	2722,1	2171,5	1,6449	7,0181	5,3732
132	405,15	$2,8668 \cdot 10^5$	0,0010720	0,63223	554,8	2723,4	2168,6	1,6555	7,0082	5,3527
133	406,15	$2,9527 \cdot 10^5$	0,0010730	0,61498	559,1	2724,8	2165,7	1,6660	6,9983	5,3323
134	407,15	$3,0406 \cdot 10^5$	0,0010740	0,59827	563,4	2726,1	2162,7	1,6765	6,9885	5,3120
135	408,15	$3,1306 \cdot 10^5$	0,0010750	0,58212	567,7	2727,4	2159,7	1,6869	6,9787	5,2918
136	409,15	$3,2227 \cdot 10^5$	0,0010760	0,56649	572,0	2728,8	2156,8	1,6974	6,9690	5,2716
137	410,15	$3,3171 \cdot 10^5$	0,0010770	0,55134	576,2	2730,1	2153,9	1,7078	6,9594	5,2516
138	411,15	$3,4137 \cdot 10^5$	0,0010780	0,53670	580,5	2731,4	2150,9	1,7182	6,9498	5,2316
139	412,15	$3,5125 \cdot 10^5$	0,0010790	0,52249	584,8	2732,7	2147,9	1,7286	6,9402	5,2116
140	413,15	$3,6136 \cdot 10^5$	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307	5,1917
141	414,15	$3,7170 \cdot 10^5$	0,0010811	0,49544	593,4	2735,2	2141,8	1,7493	6,9212	5,1719
142	415,15	$3,8228 \cdot 10^5$	0,0010822	0,48255	597,7	2736,5	2138,8	1,7597	6,9118	5,1521
143	416,15	$3,9311 \cdot 10^5$	0,0010832	0,47004	602,0	2737,8	2135,8	1,7700	6,9024	5,1324

Продолжение табл. II-1

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>h'</i>	<i>h''</i>	<i>r</i>	<i>s'</i>	<i>s''</i>	<i>s'' - s'</i>
144	417,15	$4,0418 \cdot 10^5$	0,0010843	0,45792	606,3	2739,0	2132,7	1,7803	6,8931	5,1128
145	418,15	$4,1550 \cdot 10^5$	0,0010853	0,44618	610,6	2740,3	2129,7	1,7906	6,8838	5,0932
146	419,15	$4,2707 \cdot 10^5$	0,0010864	0,43480	614,9	2741,5	2126,6	1,8008	6,8746	5,0738
147	420,15	$4,3890 \cdot 10^5$	0,0010875	0,42376	619,2	2742,7	2123,5	1,8110	6,8654	5,0544
148	421,15	$4,5099 \cdot 10^5$	0,0010886	0,41306	623,5	2743,9	2120,4	1,8213	6,8563	5,0350
149	422,15	$4,6334 \cdot 10^5$	0,0010897	0,40269	627,8	2745,1	2117,3	1,8315	6,8472	5,0157
150	423,15	$4,7597 \cdot 10^5$	0,0010908	0,39261	632,2	2746,3	2114,1	1,8416	6,8381	4,9965
151	424,15	$4,8887 \cdot 10^5$	0,0010919	0,38284	636,5	2747,5	2111,0	1,8518	6,8291	4,9773
152	425,15	$5,0205 \cdot 10^5$	0,0010930	0,37337	640,8	2748,7	2107,9	1,8619	6,8201	4,9582
153	426,15	$5,1552 \cdot 10^5$	0,0010941	0,36416	645,1	2749,8	2104,7	1,8721	6,8112	4,9391
154	427,15	$5,2926 \cdot 10^5$	0,0010953	0,35524	649,5	2751,0	2101,5	1,8822	6,8023	4,9201
155	428,15	$5,4331 \cdot 10^5$	0,0010964	0,34656	653,8	2752,1	2098,3	1,8923	6,7934	4,9011
156	429,15	$5,5764 \cdot 10^5$	0,0010976	0,33815	658,1	2753,3	2095,2	1,9023	6,7846	4,8823
157	430,15	$5,7228 \cdot 10^5$	0,0010987	0,32998	662,4	2754,4	2092,0	1,9124	6,7759	4,8635
158	431,15	$5,8722 \cdot 10^5$	0,0010999	0,32205	666,8	2755,5	2088,7	1,9224	6,7671	4,8447
159	432,15	$6,0248 \cdot 10^5$	0,0011010	0,31434	671,1	2756,6	2085,5	1,9325	6,7584	4,8259
160	433,15	$6,1804 \cdot 10^5$	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498	4,8073
161	434,15	$6,3393 \cdot 10^5$	0,0011034	0,29957	679,8	2758,8	2079,0	1,9525	6,7412	4,7887
162	435,15	$6,5014 \cdot 10^5$	0,0011046	0,29250	684,2	2759,8	2075,6	1,9624	6,7326	4,7702
163	436,15	$6,6668 \cdot 10^5$	0,0011058	0,28563	688,5	2760,9	2072,4	1,9724	6,7240	4,7516
164	437,15	$6,8355 \cdot 10^5$	0,0011070	0,27896	692,9	2761,9	2069,0	1,9823	6,7155	4,7332
165	438,15	$7,0075 \cdot 10^5$	0,0011082	0,27246	697,3	2763,0	2065,7	1,9922	6,7070	4,7148
166	439,15	$7,1830 \cdot 10^5$	0,0011095	0,26615	701,6	2764,0	2062,4	2,0022	6,6986	4,6964
167	440,15	$7,3620 \cdot 10^5$	0,0011107	0,26001	706,0	2765,0	2059,0	2,0120	6,6902	4,6782
168	441,15	$7,5445 \cdot 10^5$	0,0011119	0,25404	710,4	2766,0	2055,6	2,0219	6,6818	4,6599
169	442,15	$7,7305 \cdot 10^5$	0,0011132	0,24824	714,7	2767,0	2052,3	2,0318	6,6735	4,6417
170	443,15	$7,9202 \cdot 10^5$	0,0011145	0,24259	719,1	2768,0	2048,9	2,0416	6,6652	4,6236
171	444,15	$8,1136 \cdot 10^5$	0,0011157	0,23710	723,5	2768,9	2045,4	2,0515	6,6569	4,6054
172	445,15	$8,3106 \cdot 10^5$	0,0011170	0,23176	727,9	2769,9	2042,0	2,0613	6,6486	4,5873
173	446,15	$8,5114 \cdot 10^5$	0,0011183	0,22655	732,3	2770,8	2038,5	2,0711	6,6404	4,5693
174	447,15	$8,7161 \cdot 10^5$	0,0011196	0,22149	736,7	2771,8	2035,1	2,0809	6,6322	4,5513
175	448,15	$8,9246 \cdot 10^5$	0,0011209	0,21656	741,1	2772,7	2031,6	2,0906	6,6241	4,5335
176	449,15	$9,1370 \cdot 10^5$	0,0011222	0,21177	745,5	2773,6	2028,1	2,1004	6,6160	4,5156
177	450,15	$9,3534 \cdot 10^5$	0,0011235	0,20710	749,9	2774,5	2024,6	2,1101	6,6079	4,4978
178	451,15	$9,5739 \cdot 10^5$	0,0011248	0,20255	754,3	2775,3	2021,0	2,1199	6,5998	4,4799
179	452,15	$9,7984 \cdot 10^5$	0,0011262	0,19812	758,7	2776,2	2017,5	2,1296	6,5918	4,4622
180	453,15	$1,0027 \cdot 10^6$	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838	4,4445
181	454,15	$1,0260 \cdot 10^6$	0,0011289	0,18960	767,5	2777,9	2010,4	2,1490	6,5758	4,4268
182	455,15	$1,0497 \cdot 10^6$	0,0011302	0,18551	772,0	2778,7	2006,7	2,1586	6,5678	4,4092
183	456,15	$1,0738 \cdot 10^6$	0,0011316	0,18153	776,4	2779,6	2003,2	2,1683	6,5599	4,3916
184	457,15	$1,0984 \cdot 10^6$	0,0011330	0,17764	780,8	2780,4	1999,6	2,1780	6,5520	4,3740
185	458,15	$1,1234 \cdot 10^6$	0,0011344	0,17385	785,3	2781,2	1995,9	2,1876	6,5441	4,3565
186	459,15	$1,1488 \cdot 10^6$	0,0011358	0,17017	789,7	2781,9	1992,2	2,1972	6,5363	4,3391
187	460,15	$1,1748 \cdot 10^6$	0,0011372	0,16656	794,2	2782,7	1988,5	2,2068	6,5285	4,3217
188	461,15	$1,2011 \cdot 10^6$	0,0011386	0,16306	798,6	2783,5	1984,9	2,2164	6,5207	4,3043
189	462,15	$1,2279 \cdot 10^6$	0,0011401	0,15964	803,1	2784,2	1981,1	2,2260	6,5129	4,2869
190	463,15	$1,2552 \cdot 10^6$	0,0011415	0,15631	807,5	2784,9	1977,4	2,2356	6,5052	4,2696
191	464,15	$1,2830 \cdot 10^6$	0,0011430	0,15305	812,0	2785,6	1973,6	2,2451	6,4974	4,2523
192	465,15	$1,3112 \cdot 10^6$	0,0011444	0,14988	816,5	2786,3	1969,8	2,2547	6,4897	4,2350
193	466,15	$1,3400 \cdot 10^6$	0,0011459	0,14678	820,9	2787,0	1966,1	2,2642	6,4820	4,2178
194	467,15	$1,3692 \cdot 10^6$	0,0011474	0,14376	825,4	2787,7	1962,3	2,2738	6,4744	4,2006
195	468,15	$1,3989 \cdot 10^6$	0,0011489	0,14082	829,9	2788,3	1958,4	2,2833	6,4667	4,1834
196	469,15	$1,4291 \cdot 10^6$	0,0011504	0,13795	834,4	2789,0	1954,6	2,2928	6,4591	4,1663
197	470,15	$1,4598 \cdot 10^6$	0,0011519	0,13515	838,9	2789,6	1950,7	2,3023	6,4516	4,1493
198	471,15	$1,4910 \cdot 10^6$	0,0011534	0,13242	843,4	2790,2	1946,8	2,3117	6,4440	4,1323
199	472,15	$1,5228 \cdot 10^6$	0,0011549	0,12974	847,9	2790,8	1942,9	2,3212	6,4364	4,1152
200	473,15	$1,5551 \cdot 10^6$	0,0011565	0,12714	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289	4,0982
201	474,15	$1,5879 \cdot 10^6$	0,0011580	0,12459	856,9	2792,0	1935,1	2,3401	6,4214	4,0813
202	475,15	$1,6212 \cdot 10^6$	0,0011596	0,12211	861,4	2792,5	1931,1	2,3496	6,4139	4,0643
203	476,15	$1,6551 \cdot 10^6$	0,0011612	0,11968	865,9	2793,1	1927,2	2,3590	6,4064	4,0474