

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

ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ 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, используемые 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.

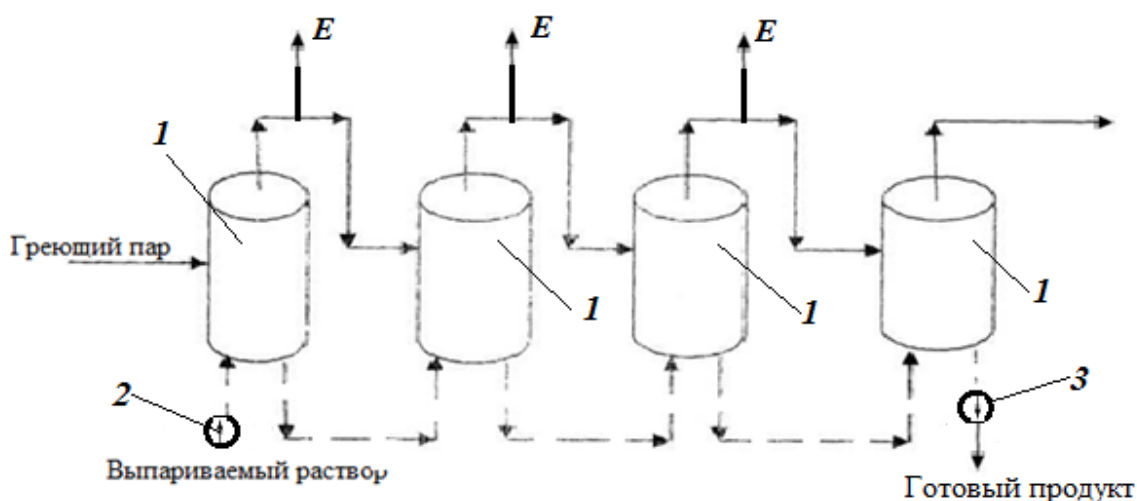


Рисунок 1 – Прямоточная схема ВС:

E – 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 соответствии со схемой прямооточные ВС имеют минимальное количество перекачивающих насосов и теплообменников. Поэтому прямооточные ВС обладают максимальной энергоэффективностью. Однако вскипание раствора при входе в кипяtilьные трубы ВА служит причиной интенсивного накипеобразования на этом участке поверхности труб, что является причиной их тепловой разверки и снижает интенсивность теплообмена. Главный недостаток прямооточной 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 раствор входит в кипяtilьные 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.

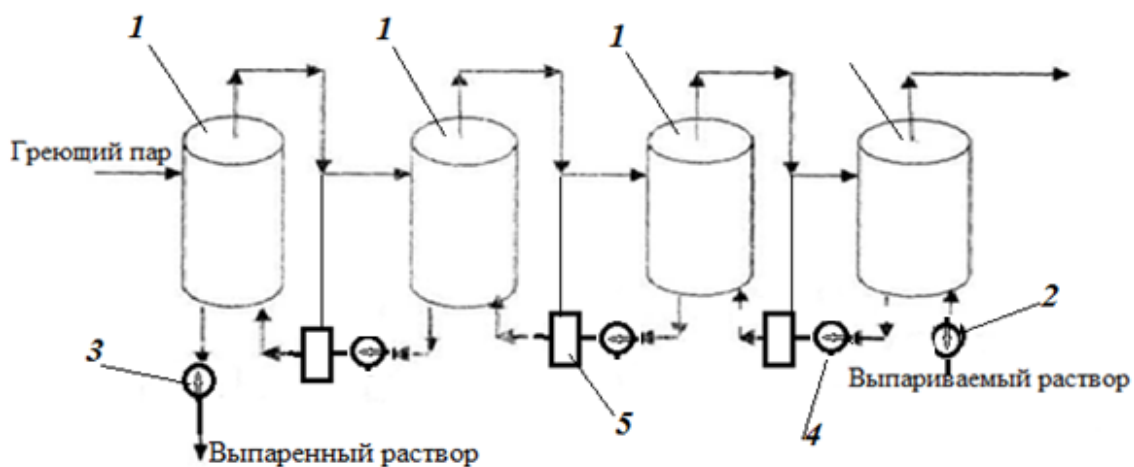


Рисунок 2 – Схема противоточной ВС:

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.

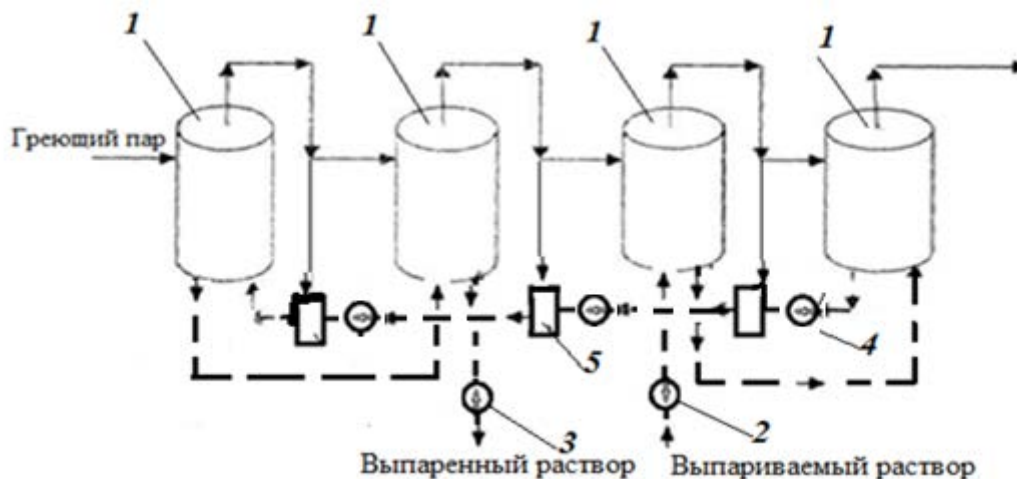


Рисунок 3 – Схема ВУ со смешанным питанием корпусов:
 1 – ВА; 2 – насос подачи продукта; 3 – насос откачки продукта;
 4 – перекачивающий насос; 5 – теплообменник

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 $P_{гр} = 3,5$ бар при температуре $T_{гр} = 138$ °С. Давление в конденсаторе установки составляет $P_k = 0,15$ бар. Условная поверхность теплообмена ВА (определяется методом последовательных приближений) составляет $F = 1800$ м² при длине кипяtilьных 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:

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

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

Расчетное количество воды, выпаренное батареями

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$B_1^{cp} = 53,8 \% \text{ а.с.в.}$$

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

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

Рассчитываем температурную депрессию в ВА по формуле: $v_i = v_{н} \cdot \eta$.

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 |
| $B_{ср}$, % | 53,8 | 37,6 | 29,8 | 25,4 | 22,6 | 20,7 |
| v_n , 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 |
| $Q'_{шел}$, кВт | 4036 | 4963 | 5484 | 5537 | 5345 | 5574 |
| $Q'_{конд}$, кВт | - | - | 2174 | 3536 | 3909 | 4687 |
| $Q_{пр}$, кВт | 17316 | 16910 | 18156 | 18186 | 17086 | 16727 |
| $Q''_{шел}$, 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 |
| $\alpha_{р1}$, 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 $t_{гр}$, 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, унесенными 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, осуществляемое в начале теплового расчета, производят руководствуясь следующим:

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

для аппаратов, выпаривающих раствор,двигающийся вверх, и не менее 3 °С 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

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

Температурный напор по батарее составит:

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

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

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

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

Корпус 6

$$\text{Температура вторичного пара } T_6'' = T_{\text{конд}} + \delta t_6 = 55 + 1 = 56 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура кипящего раствора ВА 6:

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

температура греющего пара в ВА 6:

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

Корпус 5

$$\text{Температура вторичного пара } T_5'' = t_6' + \delta t_5 = 64,92 + 1 = 65,22 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура кипящего раствора ВА 5:

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

температура греющего пара в ВА 5:

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

Корпус 4

$$\text{Температура вторичного пара } T_4'' = t_5' + \delta t_4 = 75,92 + 1 = 76,92 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура кипящего раствора ВА 5:

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

температура греющего пара в ВА 5:
 $t'_4 = t_4 + \Delta T_4 = 79,26 + 8,78 = 88,04 \text{ } ^\circ\text{C}^0$

Корпус 3

Температура вторичного пара $T_3'' = t'_4 + \delta t_3 = 88,04 + 1 = 89,04 \text{ } ^\circ\text{C}$;

температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_3 = T_3'' + v_3 + \Delta_3 = 89,04 + 1,92 + 0,76 = 91,72 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t'_3 = t_3 + \Delta T_3 = 91,72 + 9,52 = 101,24 \text{ } ^\circ\text{C}^0$$

Корпус 2

Температура вторичного пара $T_2'' = t'_3 + \delta t_2 = 101,24 + 1 = 102,24 \text{ } ^\circ\text{C}$;

температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_2 = T_2'' + v_2 + \Delta_2 = 102,24 + 4,12 + 0,78 = 107,14 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t'_2 = t_2 + \Delta T_2 = 107,14 + 10,25 = 117,39 \text{ } ^\circ\text{C}^0$$

Корпус 1

Температура вторичного пара $T_1'' = t'_2 + \delta t_1 = 117,39 + 1 = 118,39 \text{ } ^\circ\text{C}$;

температура кипящего раствора ВА 5:

$$t_1 = T_1'' + v_1 + \Delta_1 = 118,39 + 8,80 + 0,80 = 127,99 \text{ } ^\circ\text{C};$$

температура греющего пара в ВА 5:

$$t'_1 = t_1 + \Delta T_1 = 127,99 + 10,98 = 138,97 \text{ } ^\circ\text{C}^0$$

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

Значения рассчитанных температур вносим в таблицу 1.

5. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО 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, $Q_{\text{пар}}^1 = 1,1 \cdot 4,42 \cdot 2731,4 = 13280 \text{ кВт}$.

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. $D_{\text{расш}} = S \cdot (Cp' \cdot t_{\text{вх}} - Cp'' \cdot t_{\text{вых}}) / (i_{\text{расш}} - Cp'' \cdot t_{\text{вых}})$, где S – расход

раствора в расширитель; Cp' и Cp'' , $t_{вх}$ и $t_{вых}$ – 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, $Q_{конц} = W_{конц} \cdot I_{конц}$, где $W_{конц}$ и $I_{конц}$ – 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

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

$$Q'_{щел1} = 12,99 \cdot 2,9 \cdot 107,14 = 4036 \text{ кВт}$$

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$Q'_{конд} = D'_{конд} \cdot Cp \cdot t_{конд}$, где $D'_{конд}$, Cp и $t_{конд}$ – 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

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

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

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

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным раствором $Q''_{щел1} = S_{ух1} \cdot Cp''_i \cdot t_i$, где $S_{ух1}$; Cp''_i и t_i – расход раствора, его теплоемкость и температура кипения при выпаривании в ВА.

$$Q''_{щел1} = (12,99 - 4,42) \cdot 2,85 \cdot 127,99 = 3126 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, уносимое из аппарата конденсатом

$Q''_{конд} = 4,19 \cdot D''_{конд} \cdot t_{конд.}$, где $D''_{конд.}$ и $t_{конд.}$ – расход и температура уходящего из корпуса конденсата. $Q''_{конд1} = 4,19 \cdot 4,86 \cdot 138 = 2811 \text{ кВт}$

Количество теплоты, теряемое аппаратом в окружающую среду

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

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

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

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

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

Корпус 2

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

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

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

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

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 $Q''_{\text{щел}} = S_{\text{ухи}} \cdot Cp'' \cdot t_i = 4036 \text{ кВт.}$ 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

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

$$w_2 = [16910 - (4036 + 2174 + 338)] / 2703 = 3,83 \text{ кг/с}$$

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

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

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

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 $Q''_{\text{щел}} = S_{\text{ухи}} \cdot Cp'' \cdot t_i = 16,91 \cdot 3,2 \cdot 91,72 = 5428 \text{ кВт.}$

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

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

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

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

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

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

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$$Q'_{\text{конд}} = Q''_{\text{конд}2} + Q''_{\text{конд}3} = 3536 \text{ кВт.}$$

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 $Q''_{\text{щел}i} = S_{\text{ух}i} \cdot Cp''_i \cdot t_i = 20,34 \cdot 3,6 \cdot 79,26 = 5804$ кВт.

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

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

Количество теплоты, теряемое аппаратом в окружающую среду

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

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

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

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

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

Корпус 5

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

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

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

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

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$$Q'_{\text{конд}} = Q''_{\text{конд}4} = 3909 \text{ кВт.}$$

Общее количество теплоты, вносимое в 5-й ВА теплоносителями

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

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

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

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

Количество теплоты, теряемое аппаратом в окружающую среду

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

Расчетное количество влаги, выпаренное в ВА

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

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

$$\Delta = 0 \%$$

Корпус 6

Количество теплоты, передаваемое греющим паром

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

Количество теплоты, вносимое в аппарат с раствором

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

Количество теплоты, передаваемое приходящим конденсатом

$$Q'_{\text{конд}} = Q''_{\text{конд}5} = 4687 \text{ кВт.}$$

Общее количество теплоты, вносимое в 6-й ВА теплоносителями

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

Количество теплоты, уносимое из аппарата концентрированным раствором $Q''_{\text{щел}i} = S_{\text{ух}i} \cdot Cp''_i \cdot t_i = 25,78 \cdot 3,6 \cdot 57,6 = 5346$ 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

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

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

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

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

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, %.

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

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ СО СТОРОНЫ КОНДЕНСИРУЮЩЕГОСЯ ПАРА

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

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

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, ρ, 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 $\varphi_1 = 0,5-0,9$ – коэффициент использования, учитывающий наличие неконденсирующихся газов; $\varphi_2 = 0,7-0,9$ – 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 ТЕПЛОТДАЧИ 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 $N < 0,4 \cdot 10^{-5} \rightarrow Nu_{\text{кип}} = Nu_{\text{б.к.}} \rightarrow$ для воды и растворов; $k_w = \frac{q}{\rho'' \cdot r \cdot w_0}$ и

$k_s = \frac{r}{c_p \cdot T_s}$ – критерии 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 движущегося потока; $Nu_{\text{б.к.}} = 0,15 Re^{0,33} Gr^{0,1} Pr^{0,43} (Pr/Pr_w)^{0,25}$ – для ламинарно движущегося потока.

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

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 $Nu_{mf} = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3}$, $Re = 4\Gamma/\mu = 4\Gamma_v/\nu$, $\Gamma = G/\Pi$ и Γ_v – массовая и объемная плотности орошения соответственно. Уравнение справедливо при $Re > Re_{кр} = 2200 \cdot Pr^{-0,3}$.

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

Корпус 1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$Gr = \beta \cdot g \cdot h^3 \cdot \Delta t/\nu^2; \text{ где } \beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p = (1/1230)(20/40) = 0,0004 \text{ – коэффициент}$$

объемного расширения; $\Delta t = 133 - 128 = 5$ °С, температурный напор между стенкой трубы и раствором;

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

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

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

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

Корпус 2

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_{\text{пк}} = 6150 \cdot 0,00077 \cdot 165,4 \cdot 0,54 / 0,049 = 8632 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Корпус 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_{\text{пк}} = 6150 \cdot 0,0006 \cdot 210 \cdot 0,55 / 0,049 = 8697 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Корпус 4

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_{\text{пк}} = 6150 \cdot 0,000477 \cdot 194 \cdot 0,57 / 0,049 = 6620 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Корпус 5

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Корпус 6

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 кипятыльниках ВА, в которых происходит кипение раствора; $\Delta T_i = (\Delta T_6 - \Delta T_M) / \ln(\Delta T_6 / \Delta T_M)$ – температурный напор в кипятыльниках 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; $R_{\text{конд}} = 1/\alpha_{\text{IP}}$ – термическое сопротивление конденсации, $R_{\text{ст}} = (\delta/\lambda)_{\text{ст}}$ – термическое сопротивление стенки трубы, при этом обычно $\delta = 0,0025 - 0,0035$ м, а $\lambda = 45 - 55$ Вт/(м·К) – для труб из углеродистой стали и $\lambda = 14 - 18$ Вт/(м·К) – для труб из нержавеющей стали;

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

$R_{\text{нак}} = 1,65810^{-3} \cdot U \cdot B^{0,37}$; $R_{\text{кип}} = 1/\alpha_2$ – термическое сопротивление теплоотдачи при кипении парожидкостного потока.

Корпус 1

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

$$\text{Межпромывочное время работы аппарата } \tau_{\text{сут}} = 5,19/0,178 = 29 \text{ сут.}$$

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

Корпус 2

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

$$\text{Межпромывочное время работы аппарата } \tau_{\text{сут}} = 5,88/0,138 = 40 \text{ сут.}$$

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

Корпус 3

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

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

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

Корпус 4

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

$$\text{Межпромывочное время работы аппарата } \tau_{\text{сут}} = 6,77/0,09 = 70 \text{ сут.}$$

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

Корпус 5

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

$$\text{Межпромывочное время работы аппарата } \tau_{\text{сут}} = 7,4/0,09 = 82 \text{ сут.}$$

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

Корпус 6

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

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

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

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

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

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 преподавателей / 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 втузов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1986. – 448 с. – Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

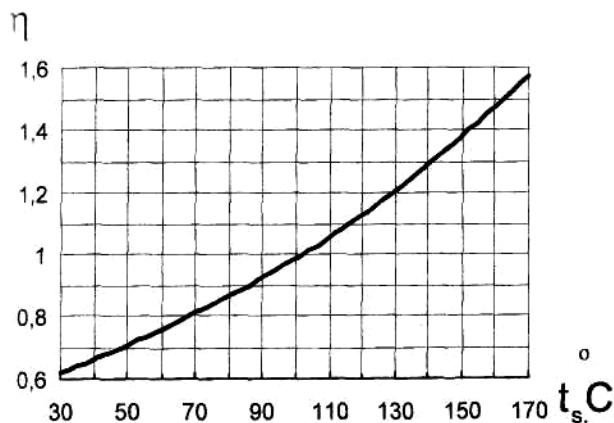


Рисунок 4 – Зависимость поправки на величину внешнего давления от температуры насыщения воды T_s

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

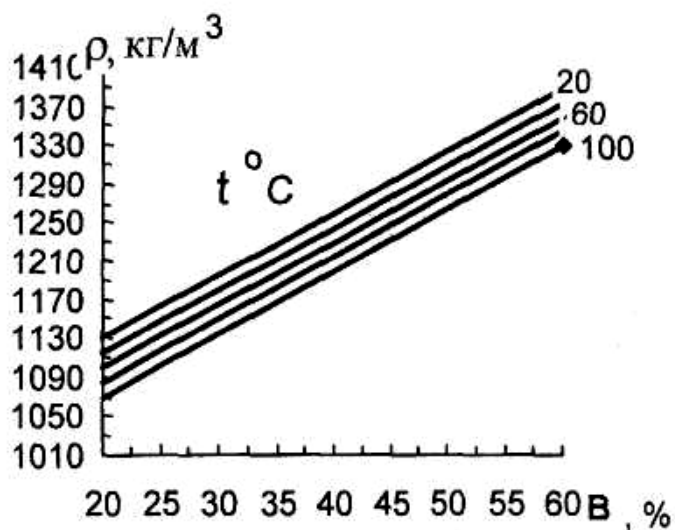
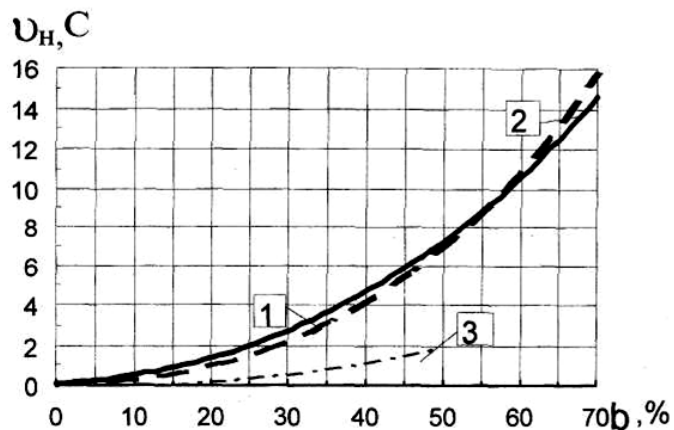


Рисунок 6 – Зависимость плотности сульфатных щелоков от концентрации и температуры

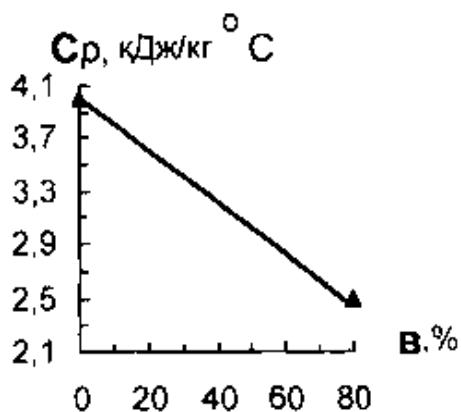


Рисунок 7 – Теплоемкость сульфатных щелоков

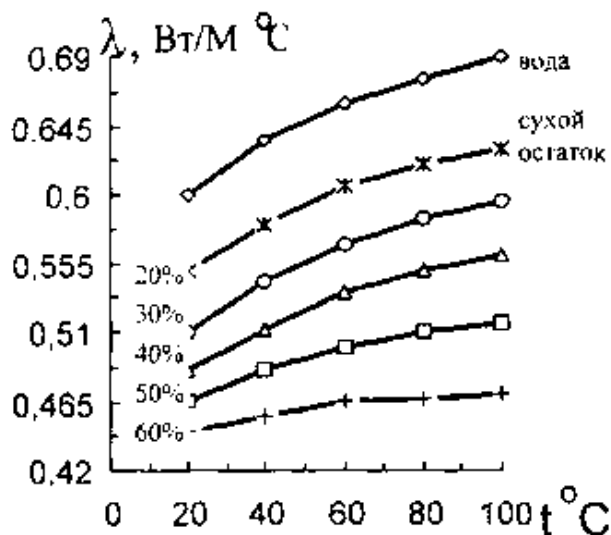


Рисунок 8 – Теплопроводность сульфатного щелока

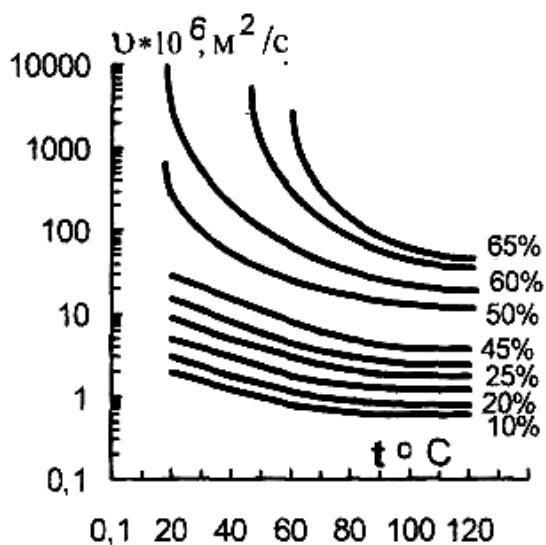


Рисунок 9 – Зависимость кинетической вязкости сульфатных щелоков от содержания сухой массы и температуры

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

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

| t | T | p | v^* | v'' | h^* | h'' | r | s^* | s'' | $s''-s^*$ |
|------|--------|----------------------|------------|---------|----------|--------|--------|---------|--------|-----------|
| 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 |

| t | T | p | σ' | σ'' | h' | h'' | r | s' | s'' | $s''-s'$ |
|------|--------|---------------------|-----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 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 |

| t | T | p | v^* | v'' | h^* | h'' | r | s^* | s'' | $s''-s^*$ |
|-----|--------|----------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| 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 |

| t | T | p | v' | v'' | R' | R'' | r | s' | s'' | $s''-s'$ |
|-----|--------|------------------------|-----------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 144 | 417,15 | 4,0418·10 ⁵ | 0,0010843 | 0,45792 | 606,3 | 2739,0 | 2132,7 | 1,7803 | 6,8931 | 5,1128 |
| 145 | 418,15 | 4,1550·10 ⁵ | 0,0010853 | 0,44618 | 610,6 | 2740,3 | 2129,7 | 1,7906 | 6,8838 | 5,0932 |
| 146 | 419,15 | 4,2707·10 ⁵ | 0,0010864 | 0,43480 | 614,9 | 2741,5 | 2126,6 | 1,8008 | 6,8746 | 5,0738 |
| 147 | 420,15 | 4,3890·10 ⁵ | 0,0010875 | 0,42376 | 619,2 | 2742,7 | 2123,5 | 1,8110 | 6,8654 | 5,0544 |
| 148 | 421,15 | 4,5099·10 ⁵ | 0,0010886 | 0,41306 | 623,5 | 2743,9 | 2120,4 | 1,8213 | 6,8563 | 5,0350 |
| 149 | 422,15 | 4,6334·10 ⁵ | 0,0010897 | 0,40269 | 627,8 | 2745,1 | 2117,3 | 1,8315 | 6,8472 | 5,0157 |
| 150 | 423,15 | 4,7597·10 ⁵ | 0,0010908 | 0,39261 | 632,2 | 2746,3 | 2114,1 | 1,8416 | 6,8381 | 4,9965 |
| 151 | 424,15 | 4,8887·10 ⁵ | 0,0010919 | 0,38284 | 636,5 | 2747,5 | 2111,0 | 1,8518 | 6,8291 | 4,9773 |
| 152 | 425,15 | 5,0205·10 ⁵ | 0,0010930 | 0,37337 | 640,8 | 2748,7 | 2107,9 | 1,8619 | 6,8201 | 4,9582 |
| 153 | 426,15 | 5,1552·10 ⁵ | 0,0010941 | 0,36416 | 645,1 | 2749,8 | 2104,7 | 1,8721 | 6,8112 | 4,9391 |
| 154 | 427,15 | 5,2926·10 ⁵ | 0,0010953 | 0,35524 | 649,5 | 2751,0 | 2101,5 | 1,8822 | 6,8023 | 4,9201 |
| 155 | 428,15 | 5,4331·10 ⁵ | 0,0010964 | 0,34666 | 653,8 | 2752,1 | 2098,3 | 1,8923 | 6,7934 | 4,9011 |
| 156 | 429,15 | 5,5764·10 ⁵ | 0,0010976 | 0,33815 | 658,1 | 2753,3 | 2095,2 | 1,9023 | 6,7846 | 4,8823 |
| 157 | 430,15 | 5,7228·10 ⁵ | 0,0010987 | 0,32998 | 662,4 | 2754,4 | 2092,0 | 1,9124 | 6,7759 | 4,8635 |
| 158 | 431,15 | 5,8722·10 ⁵ | 0,0010999 | 0,32205 | 666,8 | 2755,5 | 2088,7 | 1,9224 | 6,7671 | 4,8447 |
| 159 | 432,15 | 6,0248·10 ⁵ | 0,0011010 | 0,31434 | 671,1 | 2756,6 | 2085,5 | 1,9325 | 6,7584 | 4,8259 |
| 160 | 433,15 | 6,1804·10 ⁵ | 0,0011022 | 0,30685 | 675,5 | 2757,7 | 2082,2 | 1,9425 | 6,7498 | 4,8073 |
| 161 | 434,15 | 6,3393·10 ⁵ | 0,0011034 | 0,29957 | 679,8 | 2758,8 | 2079,0 | 1,9525 | 6,7412 | 4,7887 |
| 162 | 435,15 | 6,5014·10 ⁵ | 0,0011046 | 0,29250 | 684,2 | 2759,8 | 2075,6 | 1,9624 | 6,7326 | 4,7702 |
| 163 | 436,15 | 6,6668·10 ⁵ | 0,0011058 | 0,28563 | 688,5 | 2760,9 | 2072,4 | 1,9724 | 6,7240 | 4,7516 |
| 164 | 437,15 | 6,8355·10 ⁵ | 0,0011070 | 0,27896 | 692,9 | 2761,9 | 2069,0 | 1,9823 | 6,7155 | 4,7332 |
| 165 | 438,15 | 7,0075·10 ⁵ | 0,0011082 | 0,27246 | 697,3 | 2763,0 | 2065,7 | 1,9922 | 6,7070 | 4,7148 |
| 166 | 439,15 | 7,1830·10 ⁵ | 0,0011095 | 0,26615 | 701,6 | 2764,0 | 2062,4 | 2,0022 | 6,6986 | 4,6964 |
| 167 | 440,15 | 7,3620·10 ⁵ | 0,0011107 | 0,26001 | 706,0 | 2765,0 | 2059,0 | 2,0120 | 6,6902 | 4,6782 |
| 168 | 441,15 | 7,5445·10 ⁵ | 0,0011119 | 0,25404 | 710,4 | 2766,0 | 2055,6 | 2,0219 | 6,6818 | 4,6599 |
| 169 | 442,15 | 7,7305·10 ⁵ | 0,0011132 | 0,24824 | 714,7 | 2767,0 | 2052,3 | 2,0318 | 6,6735 | 4,6417 |
| 170 | 443,15 | 7,9202·10 ⁵ | 0,0011145 | 0,24259 | 719,1 | 2768,0 | 2048,9 | 2,0416 | 6,6652 | 4,6236 |
| 171 | 444,15 | 8,1136·10 ⁵ | 0,0011157 | 0,23710 | 723,5 | 2768,9 | 2045,4 | 2,0515 | 6,6569 | 4,6054 |
| 172 | 445,15 | 8,3106·10 ⁵ | 0,0011170 | 0,23176 | 727,9 | 2769,9 | 2042,0 | 2,0613 | 6,6486 | 4,5873 |
| 173 | 446,15 | 8,5114·10 ⁵ | 0,0011183 | 0,22655 | 732,3 | 2770,8 | 2038,5 | 2,0711 | 6,6404 | 4,5693 |
| 174 | 447,15 | 8,7161·10 ⁵ | 0,0011196 | 0,22149 | 736,7 | 2771,8 | 2035,1 | 2,0809 | 6,6322 | 4,5513 |
| 175 | 448,15 | 8,9246·10 ⁵ | 0,0011209 | 0,21656 | 741,1 | 2772,7 | 2031,6 | 2,0906 | 6,6241 | 4,5335 |
| 176 | 449,15 | 9,1370·10 ⁵ | 0,0011222 | 0,21177 | 745,5 | 2773,6 | 2028,1 | 2,1004 | 6,6160 | 4,5156 |
| 177 | 450,15 | 9,3534·10 ⁵ | 0,0011235 | 0,20710 | 749,9 | 2774,5 | 2024,6 | 2,1101 | 6,6079 | 4,4978 |
| 178 | 451,15 | 9,5739·10 ⁵ | 0,0011248 | 0,20255 | 754,3 | 2775,3 | 2021,0 | 2,1199 | 6,5998 | 4,4799 |
| 179 | 452,15 | 9,7984·10 ⁵ | 0,0011262 | 0,19812 | 758,7 | 2776,2 | 2017,5 | 2,1296 | 6,5918 | 4,4622 |
| 180 | 453,15 | 1,0027·10 ⁶ | 0,0011275 | 0,19381 | 763,1 | 2777,1 | 2014,0 | 2,1393 | 6,5838 | 4,4445 |
| 181 | 454,15 | 1,0260·10 ⁶ | 0,0011289 | 0,18960 | 767,5 | 2777,9 | 2010,4 | 2,1490 | 6,5758 | 4,4268 |
| 182 | 455,15 | 1,0497·10 ⁶ | 0,0011302 | 0,18551 | 772,0 | 2778,7 | 2006,7 | 2,1586 | 6,5678 | 4,4092 |
| 183 | 456,15 | 1,0738·10 ⁶ | 0,0011316 | 0,18153 | 776,4 | 2779,6 | 2003,2 | 2,1683 | 6,5599 | 4,3916 |
| 184 | 457,15 | 1,0984·10 ⁶ | 0,0011330 | 0,17764 | 780,8 | 2780,4 | 1999,6 | 2,1780 | 6,5520 | 4,3740 |
| 185 | 458,15 | 1,1234·10 ⁶ | 0,0011344 | 0,17385 | 785,3 | 2781,2 | 1995,9 | 2,1876 | 6,5441 | 4,3565 |
| 186 | 459,15 | 1,1488·10 ⁶ | 0,0011358 | 0,17017 | 789,7 | 2781,9 | 1992,2 | 2,1972 | 6,5363 | 4,3391 |
| 187 | 460,15 | 1,1748·10 ⁶ | 0,0011372 | 0,16656 | 794,2 | 2782,7 | 1988,5 | 2,2068 | 6,5285 | 4,3217 |
| 188 | 461,15 | 1,2011·10 ⁶ | 0,0011386 | 0,16306 | 798,6 | 2783,5 | 1984,9 | 2,2164 | 6,5207 | 4,3043 |
| 189 | 462,15 | 1,2279·10 ⁶ | 0,0011401 | 0,15964 | 803,1 | 2784,2 | 1981,1 | 2,2260 | 6,5129 | 4,2869 |
| 190 | 463,15 | 1,2552·10 ⁶ | 0,0011415 | 0,15631 | 807,5 | 2784,9 | 1977,4 | 2,2356 | 6,5052 | 4,2696 |
| 191 | 464,15 | 1,2830·10 ⁶ | 0,0011430 | 0,15305 | 812,0 | 2785,6 | 1973,6 | 2,2451 | 6,4974 | 4,2523 |
| 192 | 465,15 | 1,3112·10 ⁶ | 0,0011444 | 0,14988 | 816,5 | 2786,3 | 1969,8 | 2,2547 | 6,4897 | 4,2350 |
| 193 | 466,15 | 1,3400·10 ⁶ | 0,0011459 | 0,14678 | 820,9 | 2787,0 | 1966,1 | 2,2642 | 6,4820 | 4,2178 |
| 194 | 467,15 | 1,3692·10 ⁶ | 0,0011474 | 0,14376 | 825,4 | 2787,7 | 1962,3 | 2,2738 | 6,4744 | 4,2006 |
| 195 | 468,15 | 1,3989·10 ⁶ | 0,0011489 | 0,14082 | 829,9 | 2788,3 | 1958,4 | 2,2833 | 6,4667 | 4,1834 |
| 196 | 469,15 | 1,4291·10 ⁶ | 0,0011504 | 0,13795 | 834,4 | 2789,0 | 1954,6 | 2,2928 | 6,4591 | 4,1663 |
| 197 | 470,15 | 1,4598·10 ⁶ | 0,0011519 | 0,13515 | 838,9 | 2789,6 | 1950,7 | 2,3023 | 6,4516 | 4,1493 |
| 198 | 471,15 | 1,4910·10 ⁶ | 0,0011534 | 0,13242 | 843,4 | 2790,2 | 1946,8 | 2,3117 | 6,4440 | 4,1323 |
| 199 | 472,15 | 1,5228·10 ⁶ | 0,0011549 | 0,12974 | 847,9 | 2790,8 | 1942,9 | 2,3212 | 6,4364 | 4,1152 |
| 200 | 473,15 | 1,5551·10 ⁶ | 0,0011565 | 0,12714 | 852,4 | 2791,4 | 1939,0 | 2,3307 | 6,4289 | 4,0982 |
| 201 | 474,15 | 1,5879·10 ⁶ | 0,0011580 | 0,12459 | 856,9 | 2792,0 | 1935,1 | 2,3401 | 6,4214 | 4,0813 |
| 202 | 475,15 | 1,6212·10 ⁶ | 0,0011596 | 0,12211 | 861,4 | 2792,5 | 1931,1 | 2,3496 | 6,4139 | 4,0643 |
| 203 | 476,15 | 1,6551·10 ⁶ | 0,0011612 | 0,11968 | 865,9 | 2793,1 | 1927,2 | 2,3590 | 6,4064 | 4,0474 |