

**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**

# **ТЕПЛОМАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЫПАРКИ И ВЫПАРНЫЕ УСТАНОВКИ**

## **ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ**

### **Выполнение курсовой работы**

Методические указания для студентов всех форм обучения  
по направлению подготовки  
13.04.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составители:  
В. Г. Казаков  
Е. Н. Громова

Санкт-Петербург  
2023

Утверждено  
на заседании кафедры ПТЭ  
14.02.2023 г., протокол № 5

Рецензент А. Н. Евдокимов

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». В методических указаниях приводится методика поверочного расчета, а также пример расчета действующей выпарной батареи, произведенный в программе «Тепловой расчет», методика эксергетического анализа и алгоритм определения критерия оптимальности.

Методические указания предназначены для магистров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве методических указаний.

Режим доступа: [http://publish.sutd.ru/tp\\_get\\_file.php?id=202016](http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016), по паролю.

- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 27.09.2023 г. Рег. № 5127/22

**Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД**

**198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.**

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ РАБОТЫ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫПАРНОЙ БАТАРЕИ.....	7
2. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫПАРНОЙ БАТАРЕИ.....	18
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ.....	19
4. РАСЧЕТ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОГРАММЕ ПО АЛГОРИТМУ ИОНИНА.....	23
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	29
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	30

## ВВЕДЕНИЕ

Выпаривание – сложный технологический процесс частичного либо полного удаления жидкого растворителя в виде пара из водных растворов твердых веществ.

Выпаривание применяют для повышения концентрации растворов нелетучих веществ, выделения из растворов чистого растворителя (дистилляция) и кристаллизации растворенных веществ.

Для нагревания выпариваемых растворов до кипения используют топочные газы, электро-обогрев и высокотемпературные теплоносители, но наибольшее применение находит водяной пар, характеризующийся высокой удельной теплотой конденсации и высоким коэффициентом теплоотдачи.

В целлюлозно-бумажной промышленности при сульфатном способе производства целлюлозы из отработанных щелоков выпариванием удаляется избыток влаги для эффективного сжигания последних в сордорегенерационных агрегатах.

По теплотехническим признакам выпарные станции ЦБП относятся к рекуперативным многостадийным вакуум-выпарным установкам с элементами адиабатного и контактного концентрирования и, как правило, работают по 5–6-ступенчатой противоточной или смешанной схеме питания корпусов раствором с использованием одного или нескольких источников подвода теплоты.

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 установках, укомплектованных аппаратами 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 выпарной установки и наименьших эксплуатационных затрат.

В химической промышленности в основном применяют непрерывно действующие выпарные установки с высокой производительностью за счет большой поверхности нагрева (до 2500 м<sup>2</sup> в единичном аппарате).

Наибольшее применение в химической технологии нашли выпарные аппараты поверхностного типа, особенно вертикальные трубчатые выпарные аппараты с паровым обогревом непрерывного действия.

В зависимости от режима движения кипящей жидкости в выпарных аппаратах их разделяют на аппараты со свободной, естественной и

принудительной циркуляцией, пленочные выпарные аппараты, к которым относятся и аппараты роторного типа.

В настоящее время при переработке технологической щепы на целлюлозу затрачивается большое количество энергии в форме тепла пара, топлива, электроэнергии.

В структуре себестоимости целлюлозы 50 % затрат составляет исходное сырье и примерно 40 % – энергозатраты. В себестоимости переработки технологической щепы статья энергозатрат составляет более 80 %. Стоимость древесины и энергетических затрат непрерывно растет. Заводы по выпуску целлюлозы уже сейчас работают на уровне рентабельности, а некоторые – с отрицательной рентабельностью. Существующее положение отягощается негативными тенденциями снижения спроса на потребительском рынке. На процессы снижения стоимости древесины и энергии мы влиять не можем – они регулируются рынком.

Для решения этой проблемы необходимо проведение комплекса термодинамических исследований. На основе этих исследований формулируются требования к технологической схеме, обеспечивающие высокий термодинамический КПД системы при снижении количества, взаимодействующих материальных и тепловых потоков, а, следовательно, и низкий расход топлива.

#### **Цели и задачи курсовой работы:**

- разработка и совершенствование методов оптимизации тепловых процессов в выпарных установках;
- поиск технических решений, позволяющих снизить себестоимость выпаривания воды.

#### **Требования к выполнению и представлению результатов курсовой работы**

Работа выполняется индивидуально с использованием основной и дополнительной учебной литературы в соответствии с индивидуальным заданием, выдаваемым преподавателем.

Курсовая работа включает следующие разделы:

1. Тепловой поверочный расчет выпарной батареи.
2. Эксергетический анализ работы выпарной батареи.
3. Определение критерия оптимальности.
4. Выводы.
5. Перечень используемой литературы.

В задании на курсовую работу приводятся следующие исходные данные:

- Объект исследования;
- Конфигурация хода раствора;
- Расход раствора на батарею;
- Концентрация слабого раствора;
- Концентрация крепкого раствора;
- Температура исходного раствора;

- Температура вторичного пара из последнего корпуса,  
а также температуры греющего пара, поверхности теплообмена и средние концентрации раствора по корпусам выпарной батареи.

Расчеты могут выполняться как вручную, так и автоматически с помощью программы TestBlocks и «Расчет КТП» в программе Microsoft Excel.

В методических указаниях приводится методика поверочного расчета, а также пример расчета действующей выпарной батареи Архангельского ЦБК, произведенный в программе «Тепловой расчет», методика эксергетического анализа и алгоритм определения критерия оптимальности.

# 1. АНАЛИЗ РАБОТЫ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫПАРНОЙ БАТАРЕИ

Основным элементом при анализе действующих выпарных батарей является выбор метода поверочного расчета. Поверочный расчет позволяет получить информацию о распределении выпаренной воды, определить коэффициенты теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов, подогревателей и, таким образом, проанализировать работу всей батареи и отдельных теплоиспользующих элементов.

## Методика поверочного расчета

Расчет ведется с помощью программы «тест-блок». Для расчета по этой программе необходимо ввести исходные данные.

**1. Конфигурация связей по ходу раствора и пара в выпарные аппараты и подогреватели (рекомендуется составить схему выпаривания в выпарной установке).**

1.1. Конфигурация связей по ходу раствора в выпарные аппараты и подогреватели.

Например: 4к – 5к – 6к – 4п – 3п – 3к – 2п – 2к – 1п – 1к – с/и.

В этом примере рассматривается схема выпарной батареи с 6 ступенями выпаривания и 4 подогревателями (рис. 1). Схема состоит из двух ветвей: низкотемпературной (4–6 ступеней выпаривания) и высокотемпературной (1–3 ступени выпаривания). Низкотемпературная ветвь соответствует прямоточной схеме выпаривания, высокотемпературная – противоточной схеме выпаривания.

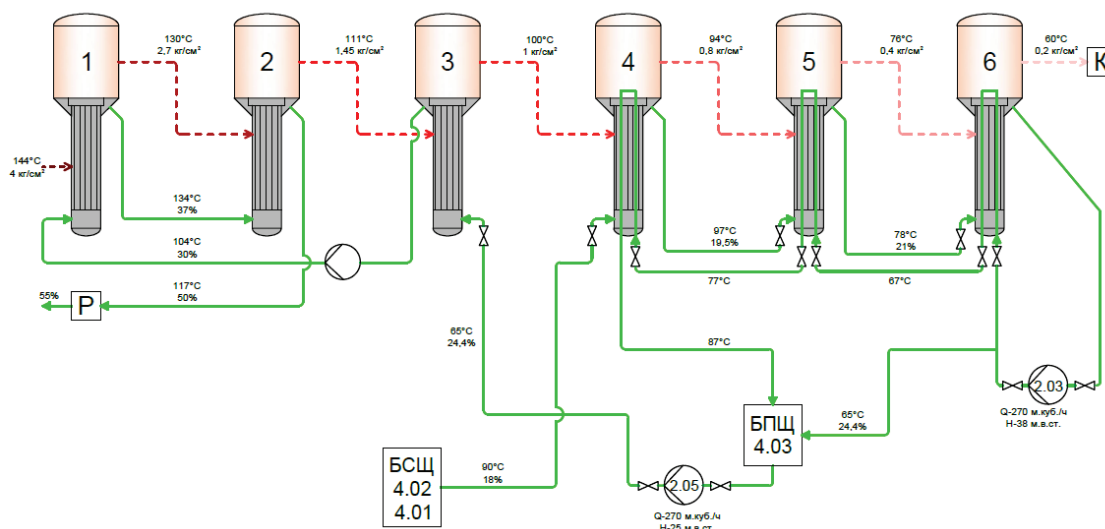


Рисунок 1 – Аппаратурно-технологическая схема выпаривания

Аббревиатура соответствует ходу раствора по корпусам и подогревателям выпарной батареи. Другими словами, раствор поступает в 4 корпус (в программе извне), затем 5 и 6 корпуса. Далее раствор проходит через 4 подогреватель, 3 подогреватель и поступает в 3 корпус выпарного аппарата. Из 3 ступени

выпаривания раствор проходит 2 подогреватель, 2 корпус, 1 подогреватель, 1 корпус и через самоиспаритель отводится из выпарной батареи.

1.2. Конфигурация связей по ходу пара в выпарные аппараты и подогреватели.

Пар по корпусам выпарных аппаратов всегда движется последовательно от 1 корпуса выпарного аппарата до последнего (в рассматриваемом примере 6) корпуса выпарного аппарата.

Пар по подогревателям. Вторичный пар из 4 корпуса поступает в 5 корпус и частично в 4 подогреватель. Пар из 3 корпуса поступает в 4 корпус и частично в 3 подогреватель. Пар из второго корпуса поступает в 3 корпус и частично во 2 подогреватель. Пар из первого корпуса поступает во 2 корпус и частично в 1 подогреватель. В первый корпус выпарного аппарата поступает греющий пар с ТЭЦ (в программе извне). Недогрев раствора до температуры пара в подогревателях принять 5 градусов. Таким образом, если известна температура пара, направляемого на подогреватель, то для вычисления температуры раствора на выходе из подогревателя необходимо от температуры пара вычесть 5 градусов.

## 2. Составление таблицы основных режимных параметров

### 2.1. За основу примем файл «Таблица»

Обозначение	Размерность	1 корпус	2 корпус	3 корпус	4 корпус	5 корпус	6 корпус
$t_n / r_n$ - темп. Греющего пара / скрытая теплота парообразования (по программе «2-у»)	К/кДЖ/кг	144,0	131,0	111,0	100,0	93,0	78,5
$\Delta t_n$ - полезный температурный напор в корпусе	град	5,6	11,0	4,1	3,1	9,4	9,2
$T_n$ - темп. кипения раствора в корпусе	К	138,6	120,0	106,9	96,9	83,6	69,3
$\theta_n$ - темп. депрессия	град	5,6	7,0	2,9	0,9	1,1	1,3
$c \Delta h_n$ - гидростатическая депрессия	град	1	1	3	2	3	8
$\bar{t}_n / \bar{i}_n$ - темп. вторичного пара, энтальпия / сгр. Теплота парообразования	К/кДЖ/кг	132,0	112,0	101,0	94,0	79,5	60,0
		2722	2696	2680	2666	2644	2610
$\Delta i$ - гидравлическая депрессия	град	1	1	1	1	1	1
$C_i$ - концентрация на выходе	%	40,00	47,10	32,30	20,00	22,50	25,00

2.2. Для поверочного расчета должны быть известны температуры греющего пара по корпусам выпарных аппаратов и вторичного пара в последнем (вакуумном корпусе выпарного аппарата). Кроме того, должны быть известны поверхности теплообмена по корпусам выпарных аппаратов и подогревателей (в случае использования рекуперативных подогревателей раствора). Вносим в файл «Таблица» таблицу.

2.3. Концентрации черного щелока по корпусам выпарных аппаратов. При ограничении данных по величинам концентраций на выходе из каждого



корпуса недостающие величины экстраполировать. Внести в файл «Таблица» с учетом конфигурации потоков черного щелока.

2.4. По температурам греющего и вторичного паров определить энтальпию и скрытую теплоту парообразования из файла «Таблица термодинамических свойств». Вносим полученные данные в файл «Таблица».

2.5. Температурные депрессии.

2.5.1. Гидравлическая температурная депрессия. Принимается по 1 градусу на корпус выпарного аппарата, в последнем корпусе принимается равной нулю.

2.5.2. Физико-химическая температурная депрессия вычисляется по программе из файла «Депрессия сульфат». Определяется на основе концентрации раствора в соответствующем корпусе выпарного аппарата и скрытой теплоты парообразования вторичного пара в соответствующем корпусе выпарного аппарата.

2.5.3. Гидростатическая депрессия. Вычисляется для выпарных аппаратов с естественной циркуляцией и аппаратов с восходящей пленкой. Находим по программе из файла «Расчет гидростатической депрессии».

Параметры раствора и пара по корпусам выпарных аппаратов и подогревателей вносим в программу «Тепловой расчет». При подстановке параметров для подогревателей выбираем тип подогревателя (смешения или поверхностный).

Производим расчет путем нажатия кнопки расчет.

Пример внесения исходных данных в программу «Тепловой расчет»

## Параметры расчета

Общие	
Расход раствора на батарею S0, кг/с	200
Расход греющего пара D0, кг/с	32,827
Температура исходного раствора T0, С	90
Теплоемкость воды Св, кДж/кг.град	4,19
Теплоемкость раствора С0, кДж/кг.град	3,94
Энтальпия греющего пара L0, кДж/кг	2737
<b>- Конфигурация</b>	
Число выпаривателей	6
Число нагревателей	0
+Самоиспаритель	<input type="checkbox"/>
<b>- Дополнительно</b>	
Концентрация слабого раствора В1, %	19,5
Концентрация крепкого раствора В2, %	54
<b>- Единицы измерения</b>	
Температура в градусах	Цельсия (С)
Тепло в	килоджоулях (кДж)
Расход в килограмм за	секунду (кг/с)
<b>- Коэффициент идентификации</b>	
+Вариация	<input type="checkbox"/>
Текущее значение	0,99

## Параметры расчета

Выпариватель №1	
Поверхность теплообмена, м2	5406
Температура кипения раствора t, К	138
Температура конденсата (тау), К	146
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2706
Источник раствора	Выпариватель №2
Источник пара	Из вне

## Параметры расчета

Выпариватель №2	
Поверхность теплообмена, м2	4399
Температура кипения раствора t, К	116
Температура конденсата (тау), К	128
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2682
Источник раствора	Выпариватель №3
Источник пара	Выпариватель №1

Параметры расчета	
Выпариватель №3	
Поверхность теплообмена, м2	3498
Температура кипения раствора t, К	101
Температура конденсата (тау), К	110
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2661
Источник раствора	Выпариватель №6
Источник пара	Выпариватель №2

Параметры расчета	
Выпариватель №4	
Поверхность теплообмена, м2	3710
Температура кипения раствора t, К	81
Температура конденсата (тау), К	96
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2640
Источник раствора	Из вне
Источник пара	Выпариватель №3

Параметры расчета	
Выпариватель №5	
Поверхность теплообмена, м2	3922
Температура кипения раствора t, К	74
Температура конденсата (тау), К	80
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2621
Источник раствора	Выпариватель №4
Источник пара	Выпариватель №4

Параметры расчета	
Выпариватель №6	
Поверхность теплообмена, м2	4293
Температура кипения раствора t, К	62
Температура конденсата (тау), К	72
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2600
Источник раствора	Выпариватель №5
Источник пара	Выпариватель №5

### ***3. Определение невязки между расходами выпаренной воды по концентрациям и по тепловому балансу***

Путем изменения текущего значения коэффициента идентификации при его вариации в программе «Тепловой расчет» добиваемся значения невязки

между общим расходом выпаренной воды по концентрациям и по тепловым балансам равной нулю. Если это не удастся выполнить, возможна некоторая корректировка дополнительно изменением расхода раствора или пара (лучше расходом раствора). При включении в схему рекуперативных подогревателей или без них, при выполнении условия невязки равной нулю расчет считается законченным.

При включении в схему подогревателей смешения невязку рассчитываем по программе «Расчет невязки». Для этого как и в предыдущем случае, добиваемся получения невязки равной нулю.

Затем в программу «Расчет невязки» подставляем данные по сумме расходов пара на подогреватели и общий расход выпаренной воды по концентрациям. Полученную невязку обеспечиваем корректировкой расхода пара или раствора. С достижением расчетной невязки расчет закончен.

В результате расчета получаем следующие данные:

- 3.1. Расходы пара на подогреватели.
- 3.2. Расходы пара по корпусам выпарных аппаратов.
- 3.3. Тепловые потоки по корпусам выпарных аппаратов.
- 3.4. Коэффициенты теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов и подогревателей.
- 3.5. Общий расход выпаренной воды в выпарной батарее по концентрациям и тепловым балансам.
- 3.6. Удельный расход греющего пара (по выпаренной воде, определенной из теплового баланса).

## **ПРИМЕР ПОВЕРОЧНОГО ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА ВЫПАРНОЙ БАТАРЕИ**

Объект – ОАО «Архангельский ЦБК»

Конфигурация хода раствора: 4-5-6-3-1-2

Расход раствора на батарею:  $S_0 = 94,444$  кг/с.

Концентрация слабого раствора:  $V_0 = 19,6$  %.

Концентрация крепкого раствора:  $V_N = 47,3$  %.

Температура исходного раствора:  $T = 366$  К.

Температура вторичного пара из последнего корпуса:  $T_N = 333$  К.

Теплоемкость воды:  $C_B = 4,20$  кДж/(кг · °С).

Теплоемкость раствора:  $C_0 = 3,94$  кДж/(кг · °С).

Гидравлическая депрессия:  $\delta = 1$  град.

Недогрев в теплообменнике:  $\delta = 5$  град.

Таблица 1 – Исходные данные для поверочного расчета

Номера корпусов выварных аппаратов	1	2	3	4	5	6
Температура греющего пара, °С	145,1	132,9	112,7	101,0	94,0	74,8
Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	2700	2730	2900	2600	2900	2900
Средняя концентрация, %	-	47,3	-	19,6	-	-

**1. Определение физико-химических величин по корпусам выварных аппаратов.**

Цель: определение физико-химической температурной депрессии и гидростатической температурной депрессии по корпусам выварных аппаратов. Расчёт начинается с последнего корпуса.

**2. Определение концентрации раствора по корпусам выварных аппаратов.** Выполнение экстраполяции по экспериментальным данным выварных аппаратов:

Таблица 2 – Концентрации раствора по корпусам выварных аппаратов

1	2	3	4	5	6
40,00	47,30	33,00	19,60	23,00	26,00

**3. Определение плотности раствора по корпусам выварных аппаратов (по программе):**

$$\rho_6 = \rho_6(c_6, t_6^{\text{вп}}) = 1139 \text{ кг/м}^3,$$

где  $c_i$  и  $t_i^{\text{вп}}$  – концентрация раствора по температуре вторичного пара и температура вторичного пара, соответственно.

Введите температуру и концентрацию:	Т	%
	60	26
Ваша плотность:	1139	

**4. Определение гидростатической депрессии по подпрограмме.**

Вычисляем давление вторичного пара по температуре вторичного пара (в файле «Таблица термодинамических свойств»):

$$P_6^{\text{вп}} = P_6^{\text{вп}}(t_6^{\text{вп}})$$

p, бар	t, °C
0,19	58,98
0,2	60,09

После интерполяции получаем:  $P_6 = 0,1991$  бар

5. Определение гидростатической депрессии  $\Delta_1$ - по подпрограмме.

Для 6 корпуса			
при t	60	по табл. P	0,1991 бар
плотности	1139		
Изменение P	683,4 или		0,06834
P=	0,26744	*10^4	
при данном давл. Находим t-ру			66,5
депрессия			6,50

$$\Delta_6 = 6,50 \text{ град.}$$

6. Определение физико-химической температурной депрессии (по подпрограмме или таблицам).

Введём конц сухого вещества :	26 %
Повышение точки кипения $\theta_n$ :	1,7742
$\theta = \theta_n \cdot \eta$ , где $\eta = 0,0162 \cdot T^2 / r$	
введите T:	60 , тогда $\eta = 0,766907$
введите r:	2342,4
$\theta =$	1,360646

$$\theta_6 = \theta_6(c_6, t_6^{вп}) r_6 = 1,36 \text{ град.}$$

7. Определение температуры вторичного пара с учетом величины гидростатической депрессии:

$$t_6^{вп1} = t_6^{вп} + \Delta_6 = 60 + 6,5 = 66,5^\circ\text{C}$$

8. Определение энтальпии вторичного пара по температуре вторичного пара (по таблице или по подпрограмме):

$$i_6^{вп} = i_6^{вп}(t_6^{вп})$$

p, бар	t, °C	v', м <sup>3</sup> /кг	v'', м <sup>3</sup> /кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	Г, кДж/кг	s', кДж/(кг*К)	s'', кДж/(кг*К)
0,19	58,98	0,0010166	8,0288	246,83	2607,7	2360,9	0,8182	7,9269
0,2	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092

После интерполяции получаем:

$$i_6^{\text{БП}} = 2609,4 \text{ кДж/кг}$$

9. Определение теплоты фазового перехода по температуре вторичного пара с учетом гидростатической депрессии:

$$r_6^{\text{БП}} = r_6^{\text{БП}}(t_6^{\text{БП}})$$

p, бар	t, °C	v', м <sup>3</sup> /кг	v'', м <sup>3</sup> /кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	Г, кДж/кг	s', кДж/(кг*К)	s'', кДж/(кг*К)
0,26	65,87	0,0010204	5,9819	275,68	2619,7	2344	0,9041	7,8186
0,27	66,72	0,0010209	5,7739	279,24	2621,1	2341,9	0,9146	7,8057

После интерполяции получаем:

$$r_6^{\text{БП}} = 2342,4 \text{ кДж/кг.}$$

Результаты поверочного расчета выпарной батареи АО «Архангельский ЦБК»

Таблица 3 – Результаты поверочного расчета выпарной батареи АО «Архангельский ЦБК»

Обозначение	Размерность	1 корпус		2 корпус		3 корпус		4 корпус		5 корпус		6 корпус	
$t_n / r_n$ - темп. Грешающего пара/ скрытая теплота парообразования (по программе «2-у»)	К/кДж/кг	145,1		132,9		112,7		101,0		94,0		74,80	
		2740,3	2129,3	2724,6	2165,9	2695,8	2223,1	2677,8	2254,6	2666,7	2273	2634,9	2321,8
$\Delta t_n$ - полезный температурный напор в корпусе	град	4,75		10,72		4,98		3,06		13,26		6,95	
$T_n$ - темп. кипения раствора в корпусе	К	140,35		122,18		107,72		97,94		80,74		67,85	
$\theta_n$ - темп. депрессия	град	5,65		7,11		3,04		0,90		1,14		1,35	
$s \Delta h_n$ - гидростатическая депрессия	град	0,8		1,37		2,68		2,04		3,8		6,5	
$\bar{t}_n / \bar{i}_n$ - темп. вторичного пара, энтальпия/ср. Теплота парообразования	К/кДж/кг	133,9		113,7		102,0		95,0		75,8		60,0	
		2726	2160,7	2697,4	2216,6	2679,5	2244,8	2668,4	2265,0	2636,6	2310,0	2609,4	2342,4
$\Delta i$ - гидравлическая депрессия	град	1		1		1		1		1		0	
$C_i$ - концентрация на выходе	%	40,00		47,30		33,00		19,60		23,00		26,00	

## Результаты теплового расчета

Параметры расчета	
Общие	
Расход раствора на батарею S0, кг/с	94,444
Расход греющего пара D0, кг/с	15,806
Температура исходного раствора T0, С	93
Теплоемкость воды Св, кДж/кг.град	4,19
Теплоемкость раствора С0, кДж/кг.град	3,94
Энтальпия греющего пара L0, кДж/кг	2740,3
<b>- Конфигурация</b>	
Число выпаривателей	6
Число нагревателей	0
+Самоиспаритель	<input type="checkbox"/>
<b>- Дополнительно</b>	
Концентрация слабого раствора В1, %	19,6
Концентрация крепкого раствора В2, %	47,3
<b>- Единицы измерения</b>	
Температура в градусах	Цельсия (С)
Тепло в	килоджоулях (кДж)
Расход в килограмм за	секунду (кг/с)
<b>- Коэффициент идентификации</b>	
+Вариация	<input type="checkbox"/>
Текущее значение	0,96
Выпариватель №1	
Поверхность теплообмена, м2	2700
Температура кипения раствора t, К	140,35
Температура конденсата (tau), К	145,1
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2726
Источник раствора	Выпариватель №3
Источник пара	Из вне
Выпариватель №2	
Поверхность теплообмена, м2	2730
Температура кипения раствора t, К	122,18
Температура конденсата (tau), К	132,9
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2697,4
Источник раствора	Выпариватель №1
Источник пара	Выпариватель №1
Выпариватель №3	
Поверхность теплообмена, м2	2900
Температура кипения раствора t, К	107,72
Температура конденсата (tau), К	112,7
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2679,5
Источник раствора	Выпариватель №6
Источник пара	Выпариватель №2



Выпариватель №4	
Поверхность теплообмена, м2	2600
Температура кипения раствора t, К	97,94
Температура конденсата (тау), К	101
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2668,4
Источник раствора	Из вне
Источник пара	Выпариватель №3

Выпариватель №5	
Поверхность теплообмена, м2	2900
Температура кипения раствора t, К	80,74
Температура конденсата (тау), К	94
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2636,6
Источник раствора	Выпариватель №4
Источник пара	Выпариватель №4

Выпариватель №6	
Поверхность теплообмена, м2	2900
Температура кипения раствора t, К	67,85
Температура конденсата (тау), К	74,8
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2609,4
Источник раствора	Выпариватель №5
Источник пара	Выпариватель №5

#### Расход пара, кг/с

- Выпариватель №1 **11.467**
- Выпариватель №2 **12.529**
- Выпариватель №3 **7.164**
- Выпариватель №4 **6.058**
- Выпариватель №5 **8.351**
- Выпариватель №6 **9.738**

#### Тепловые потоки, кВт

- Выпариватель №1 **32375.949**
- Выпариватель №2 **23877.878**
- Выпариватель №3 **26764.823**
- Выпариватель №4 **15517.836**
- Выпариватель №5 **13228.443**
- Выпариватель №6 **18623.958**

#### Коэффициенты теплопередачи, кВт/(м<sup>2</sup> град)

- Выпариватель №1 **2.524**
- Выпариватель №2 **0.816**
- Выпариватель №3 **1.853**
- Выпариватель №4 **1.950**
- Выпариватель №5 **0.344**
- Выпариватель №6 **0.924**

Общее количество выпаренной воды:  $W_{об} = 55.307 \text{ кг/с}$   
 Удельный расход пара на батарею  $d = 0.286$   
 Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:  
 $W'_{об} = 55.309 \text{ кг/с}$   
 Расхождение  $\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 0.0 \%$ .

В результате поверочного расчета определяются показатели работы выпарной батареи, такие как:

- расход пара для каждого корпуса;
- тепловые потоки для каждого корпуса;
- коэффициенты теплопередачи для каждого корпуса;
- общее количество выпаренной воды по тепловым потокам и по концентрациям;
- удельный расход пара на батарею.

## 2. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫПАРНОЙ БАТАРЕИ

Используя данные, полученные в результате теплового поверочного расчета выпарной батареи, производится эксергетический анализ каждого корпуса, определяется его удельный вклад в общий КПД выпарной батареи.

- Эксергетический КПД

Для 1-го корпуса:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\Delta e_{\text{воспр}}}{\Delta e_{\text{затр}}} \cdot \varphi = \frac{Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_x}{T_{\text{вт.п.}}^1}\right)}{Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_x}{T_{\text{гр.п.}}^1}\right)} \cdot \varphi = \frac{32376 \cdot \left(1 - \frac{280}{406,9}\right)}{32376 \cdot \left(1 - \frac{280}{418,1}\right)} \cdot 0,96 = 0,90;$$

$Q$  – тепловые потоки, кВт;

$T_x = 280 \text{ К}$  - температура холодильника (окружающей среды);

$T_{\text{вт.п.}}^1$  - температура вторичного пара, К;

$T_{\text{гр.п.}}^1$  - температура греющего пара, К;

$\varphi = 0,96$  - коэффициент идентификации.

2-го корпуса:  $\eta_{\text{экс}}^{\text{факт}} = 0,84,$

3-го корпуса:  $\eta_{\text{экс}}^{\text{факт}} = 0,86,$

4-го корпуса:  $\eta_{\text{экс}}^{\text{факт}} = 0,88,$

5-го корпуса:  $\eta_{\text{экс}}^{\text{факт}} = 0,75,$

6-го корпуса:  $\eta_{\text{экс}}^{\text{факт}} = 0,71.$

Доля затраченной эксергии в n-ом корпусе выпарной установки к общей затраченной эксергии в выпарной батарее:

Для 1-го корпуса:

$$\gamma = \frac{\Delta e_{\text{затр}}}{\sum \Delta e_{\text{затр}}} \cdot 100\% = \frac{10,512}{35816} \cdot 100\% = 29,4 \%$$

2-го корпуса:  $\gamma=20,4\%$ ;

3-го корпуса:  $\gamma=20,3\%$ ;

4-го корпуса:  $\gamma=10,9\%$ ;

5-го корпуса:  $\gamma=8,8\%$ ;

6-го корпуса:  $\gamma=10,3\%$ .

Произведение эксергетического КПД каждого корпуса на долю затраченной эксергии к общей затраченной эксергии в выпарной батарее:

Для 1-го корпуса:

$$\gamma \cdot \eta = 0,90 \cdot 29,4 = 26,3;$$

2-го корпуса: 17,1;

3-го корпуса: 17,5;

4-го корпуса: 9,5;

5-го корпуса: 6,6;

6-го корпуса: 7,3.

Эксергетический КПД всей выпарной батареи составил 84,2 %. Коэффициенты теплопередачи во втором, пятом и шестом корпусах имеют низкие значения, что говорит о необходимости глубокого анализа выпарной установки. Наибольшее влияние на эксергетический КПД всей выпарной батареи определяется тепловым процессом в первом и третьем корпусах. Распределение тепловых потоков и эксергий по батарее очень неравномерное, КПД в отдельных корпусах достигают весьма низких значений, все это говорит о необходимости оптимизации параметров и модернизации выпарной батареи.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

#### 1. Материальный баланс

$$G_{\text{раств}} + D_n = W_{\text{пара}} + (G_{\text{раств}} - \sum W) + (\sum W - W) + D_{\text{конд}};$$

$$73,2 + 7,764 = 8,674 + (73,2 - 47,334) + (47,334 - 8,674) + 7,764;$$

$$80,964 = 80,964;$$

где  $G_{\text{раств}}$  - расход раствора, кг/с;

$D_n$  - расход греющего пара на батарею, кг/с;

$W_{\text{пара}}$  - расход вторичного пара, кг/с;

$\sum W$  - суммарное количество выпаренной воды, кг/кг;

$W$  - расход конденсата суммарных вторичных паров на выходе из батареи, кг/с;  
 $D_{конд}$  - расход конденсата греющего пара ( $D_n = D_{конд}$ ), кг/с.

## 2. Тепловой баланс

$$G_{раств} \cdot c_p \cdot t_p + D_n \cdot h_n = W_{пара} \cdot h + (G_{раств} - \sum W) \cdot c_p \cdot t_p + c_g \cdot (\sum W - W) \cdot t_{конд} + D_{конд} \cdot 4,19 \cdot t_{гн};$$

$$73,2 \cdot 3,94 \cdot 90 + 7,764 \cdot 2739,347 = 8,674 \cdot 2640,792 + (73,2 - 47,334) \times$$

$$\times 3,94 \cdot 90 + 4,19 \cdot (47,334 - 8,674) \cdot 60,139 + 7,764 \cdot 4,19 \cdot 165;$$

$$47225 = 47225;$$

где  $c_p$  - теплоемкость раствора, кДж/(кг·К);

$t_p$  - температура исходного раствора, °С;

$h_n$  - энтальпия греющего пара на батарею, кДж/кг;

$h$  - энтальпия пара на выходе из батареи, кДж/кг;

$c_g$  - теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

$t_{конд}$  - температура конденсата, °С;

$t_{гн}$  - температура греющего пара, °С.

Из теплового баланса находим температуру конденсата  $t_{конд} = 60,139$  °С.

## 3. Циркуляционный расход на трубу

0,1 кг/с при скорости 1,5 м/с.

## 4. Расход раствора на одну трубу:

$$Q = \frac{0,1}{1147} \cdot 10^6 = 87,2, \text{ см}^3/\text{с} = 0,872 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где 0,1 - расход раствора на одну трубу;

1147 - плотность раствора, кг/м<sup>3</sup>;

$1 \cdot 10^6$  - переводной коэффициент из м<sup>3</sup>/с в см<sup>3</sup>/с.

## 5. Количество трубок в аппарате

$$F = \pi \cdot d \cdot l \cdot n \rightarrow n = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{1035,15}{3,14 \cdot 0,05 \cdot 12} = 549, \text{ шт},$$

где  $F$  - суммарная поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$d$  - диаметр одной трубки, м;

$l$  - длина трубки, м.

## 6. Напор для одной трубки

$$H = \frac{Q}{\mu^2 \cdot F^2 \cdot 2 \cdot g} = \frac{87,2}{0,632^2 \cdot 12^2 \cdot 2 \cdot 981} = 9,761 \text{ см.вод.ст} = 97,61 \text{ кгс/м}^2,$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода;

$g$  - ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>;  
 $F$  - сечение входного отверстия насадки, см<sup>2</sup>.

### 7. Полезная работа, развиваемая насосом

$$L = Q \cdot H \cdot n = 0,872 \cdot 10^{-4} \cdot 97,61 \cdot 549 \cdot 0,36 = 1,68, \text{ кВт},$$

где  $Q$  - объемный расход раствора на одну трубу, м<sup>3</sup>/с;  
 0,36 - переводной коэффициент, учитывающий перевод кг/с в кВт и расход раствора в час.

### 8. Действительная мощность, потребляемая насосом

$$N_{\text{Д}} = \frac{L}{\eta} = \frac{1,68}{0,8} = 2,1, \text{ кВт},$$

где  $\eta$  - КПД насоса (принимаем).

### 9. Удельные эксергетические потери

$$\Pi_i = T_x \cdot (\sum_{\text{ВЫХ}} G_i \cdot S_i - \sum_{\text{ВХ}} G_i \cdot S_i) + e_0,$$

$$e_0 = (h - h_{\text{конд}}) \cdot \left(1 - \frac{T_x}{T_{\text{пара}}}\right) \cdot W_{\text{пара}} = (2640,8 - 231) \cdot \left(1 - \frac{280}{328}\right) \cdot 8,67 =$$

$$= 3059 \text{ кДж/с},$$

где  $h_{\text{конд}}$  - энтальпия конденсата, °С;

$T_{\text{пара}}$  - температура пара на выходе из батареи, °С;

$T_x$  - температура окружающей среды, °С;

$G_i, S_i$  - расход и соответствующая ему энтропия  $i$ -го потока на выходе и входе в узел взаимодействия, кг/с, кДж/(кг·К);

Вход:

- Пар:  $S_{\text{пар}} = 6,7071 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  при  $t = 165 \text{ °С}$ ;

- Раствор:  $S_{\text{раств}} = \frac{S_{\text{воды}}}{c_p} \cdot c_p = (1,1926/4,19) \cdot 3,94 = 1,1214, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$S_{\text{воды}} = 1,1926 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  при  $t = 90 \text{ °С}$ ;

Выход:

- Вторичный пар:  $S_{\text{пар}} = 7,9922 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  при  $t = 55 \text{ °С}$ ;

- Крепкий раствор:  $S_{\text{раств}} = \frac{S_{\text{воды}}}{c_p} \cdot c_p = (0,8399/4,19) \cdot 3,94 = 0,7879, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$S_{\text{воды}} = 0,8399 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  при  $t = 60,7 \text{ °С}$ ;

- Конденсат греющего пара:  $S_k = 1,9922 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  при  $t = 165 \text{ °С}$ ;

- Конденсат суммарных вторичных паров:

$S_{\text{квт}} = 0,827 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  при  $t = 60,1 \text{ °С}$ ;

$$\Pi_i = T_x \cdot (\sum_{\text{ВЫХ}} G_i \cdot S_i - \sum_{\text{ВХ}} G_i \cdot S_i) + e_0 = 280 \cdot \left( (\sum_{\text{ВЫХ}} G_{\text{пар}} \cdot S_{\text{пар}} + G_{\text{раств}} \cdot S_{\text{раств}} + G_{\text{конд1}} \cdot S_{\text{конд1}} + G_{\text{конд2}} \cdot S_{\text{конд2}}) - (\sum_{\text{ВХ}} G_{\text{пар}} \cdot S_{\text{пар}} + G_{\text{раств}} \cdot S_{\text{раств}}) \right) - e_0 = 280 \cdot ((8,647 \cdot 7,9922 + 25,866 \cdot 0,7897 + 7,567 \cdot 1,9922 + 47,334 \cdot 0,8327) - (7,764 \cdot 6,7071 + 73,2 \cdot 1,1214)) + 3059 = 5883, \text{ кДж/с}$$

### 10. Критерий оптимальности

$$\frac{C}{W} = \left[ \frac{P_T}{Q_p^H} \cdot \left( \frac{\Pi_i + N_{\text{цн}}}{\eta} \right) + (P_f \cdot F + P_{\text{цн}} \cdot n) \cdot \frac{A_0}{\tau \cdot 3600} \right] / \sum W =$$

$$= \frac{\left[ \frac{5}{19274} \cdot \left( \frac{5883 + 12,62}{0,4} \right) + (16000 \cdot 1035,15 + 1000000 \cdot 6) \cdot \frac{0,15}{8760 \cdot 3600} \right]}{47,338} = 0,083 \text{ руб/кг}$$

где  $C$  - стоимость выпаривания, руб/кг;

$\sum W$  - суммарное количество выпаренной воды, кг/кг;

$P_T$  - стоимость топлива, руб/кг;

$Q_p^H$  - низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$N_{\text{цн}} = N_D \cdot n$  - общая удельная мощность циркуляционных насосов, кВт;

$n$  - количество циркуляционных насосов;

$P_f$  - стоимость и изготовление 1  $m^2$  поверхности, руб./ $m^2$  (принимаем);

$P_{\text{цн}}$  - стоимость циркуляционного насоса, руб. (принимаем);

$A_0$  - коэффициент амортизационных отчислений (принимаем);

$\tau$  - число часов работы в год.

### 11. Исследование регрессивного уравнения

$$\frac{C}{W} = 0,0112 - 0,00899 \cdot x_1 - 0,0111 \cdot x_2 + 0,0348 \cdot x_3 + 0,0175 \cdot x_1^2 - 0,00225 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0075 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0235 \cdot x_2^2 + 0,00825 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0412x_3^2.$$

Далее необходимо получить аналитический минимум путем решения системы уравнений, составленных путем  $\frac{\partial C}{\partial X_1} = 0$ ;  $\frac{\partial C}{\partial X_2} = 0$ ;  $\frac{\partial C}{\partial X_3} = 0$ .

Вычислим частные производные по  $X_1, X_2, X_3$  в условиях регрессионного уравнения и приравняем их к нулю.

Получим систему уравнений с тремя неизвестными:

$$\frac{\partial C}{\partial x_1} = 0 \Rightarrow -0,00899 + 2 \cdot 0,0175 \cdot x_1 - 0,00225 \cdot x_2 - 0,0075 \cdot x_3 = 0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_2} = 0 \Rightarrow -0,0111 - 0,00225 \cdot x_1 + 2 \cdot 0,0235 \cdot x_2 + 0,00825 \cdot x_3 = 0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_3} = 0 \Rightarrow 0,0348 - 0,0075 \cdot x_1 + 0,00825 \cdot x_2 + 2 \cdot 0,0412 \cdot x_3 = 0.$$

Решив эти уравнения относительно  $x_1, x_2, x_3$ , получим:

$$x_1 = 0,796; x_2 = 0,761; x_3 = -0,329.$$

С учетом формулы перевода из кодированных значений в натуральные, значений для нулевых уровней и шагов для переменных  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  получим:

$$x_1 = x_{01} + \hat{x}_1 \cdot \Delta x_1;$$

$$x_2 = x_{02} + \hat{x}_2 \cdot \Delta x_2;$$

$$x_3 = x_{03} + \hat{x}_3 \cdot \Delta x_3,$$

где  $x_1, x_2, x_3$  - натуральные значения переменных;  $x_{01}, x_{02}, x_{03}$  - нулевые уровни переменных;  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$  - кодированные значения переменных,  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  - шаги варьирования переменных.

#### 4. РАСЧЕТ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОГРАММЕ ПО АЛГОРИТМУ ИОНИНА

1. Вводим исходные данные согласно плану эксперимента:

- 1) концентрацию на входе в аппарат;
- 2) концентрацию раствора на выходе;
- 3) расход раствора;
- 4) общий температурный напор в строку ячейки температуры пара на батарею.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	B <sub>0</sub>	B <sub>N</sub>	S <sub>0</sub>	c <sub>v</sub>	c <sub>0</sub>	T <sub>N</sub>	Δi	τ <sub>0</sub>	τ <sub>N</sub>	dt		K <sup>T</sup>	K <sub>n</sub>	
3	B <sub>0</sub>	B <sub>N</sub>	S <sub>0</sub>	св	с <sub>0</sub>	T <sub>N</sub>	d <sub>i</sub>	ta <sub>0</sub>	ta <sub>N</sub>	dt	dT <sub>0</sub>	КТ	Кп	
4	20	75	338,88	4,2	3,94	363	1,5	438	328	5	4	0,6	1	
5														1
6						90		165						1
7														1

2. Находим оптимальное решение концентрации раствора на выходе выпарного аппарата:

- 1) в листе «расчет» выбираем ячейку для нахождения оптимального решения;
- 2) выбираем на строке меню вкладку «Данные» и нажимаем команду «поиск решения»;

Excel interface with 'Поиск решения' (Solve) button highlighted in red and numbered '2'.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Теплообменники										выпарные аппараты										справочные данные					
2	состояние TO	наименование	доля пара на TO	нагрев	заданный нагрев	недогрев	поверхность	выходная температура	расход греющего пара	темпер. пара	приблиз. энт. пара	расход выпар. воды	расход пара	конц. пара	темпер. Депрессия	темпер. пара	энтальпия пара	удельное тепло пара	уд.расход пара	расход пара на кипятиль	поверхн. TO	поверхн. ника				
3	вкл/выкл	№ст.	$Y_{n-1}$	$\Delta T_n$	$\Delta T_{n-1}$	$F_n^T$	$T_n$	$q_{n-1}$	$t_n$	$r_n$	$W_n$	$S_n$	$B_n$	$\theta^s$	$T_n$	$t_{n-1}$	$q_{n-1}$	$d$	$G_{n-1}$	$F_n$						
4			0				433		433		55,743	338,9	20	1,884	438											
5	вкл	1	0,1951	16,845	16,845	5	3281	416,16	44,869	424,99	2742,012	48,289	290,6	23,32	2,3345	421,16	2761,2	2068,2		10,875						
6	вкл	2	0,2061	15,795	15,795	5	3172	400,36	38,338	409,76	2722,202	45,195	245,4	27,62	2,9044	405,36	2741,5	2119,2		9,9516						
7	вкл	3	0,2181	15,99	15,99	5	3192	384,37	35,337	394,63	2703,007	40,991	204,4	33,16	3,7613	389,37	2721,5	2165,5		9,8588						
8	вкл	4	0,2386	16,195	16,195	5	3214	368,18	31,211	379,7	2680,273	35,858	168,5	40,21	5,0198	373,18	2699,7	2211		9,7799						
9	вкл	5	0,0854	5,1752	5,1753	5	1581	363	32,794	362,81	2652,339	37,059	131,5	51,55	7,4339	353,87	2676,2	2255,4		3,0637						
10	выкл	6	0	0	0		-9,129	0	37,059	341,89	2613,586	41,12	90,37	75	13,888	328	2646,1	2306,4		0						
11																			0,2243		7132,5					
12		станд отклон									7E-06			1												

3) в появившемся окне «Параметры поиска решения»:

- а) в строке «Оптимизировать целевую функцию» вводим номер ячейки, в которой стоит концентрация раствора в последней ступени (p.s. ячейка выделена голубым цветом) и значение которой должно соответствовать значению в исходных данных (p.s. ячейка выделена желтым цветом (предыдущий пункт 1));
- б) выбираем в пункте «До» «Минимум»;
- в) нажимаем кнопку «найти решение».

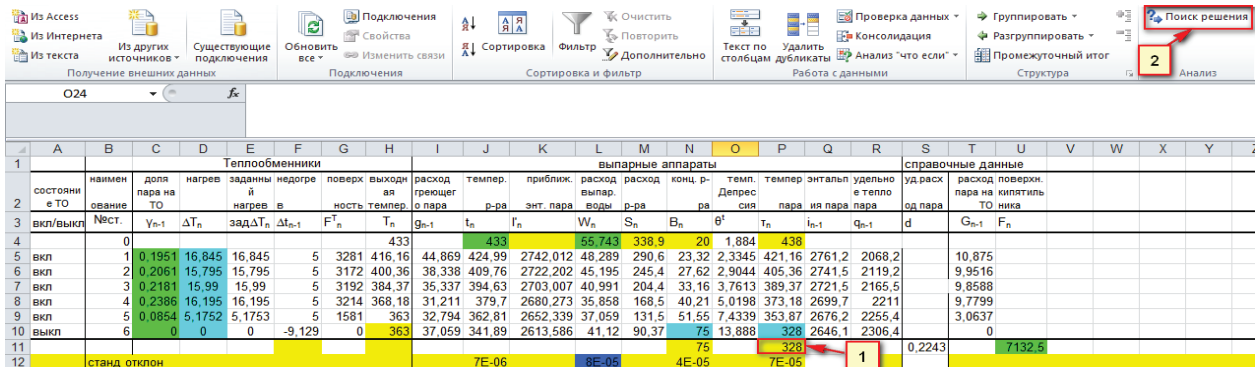
4) в появившемся окне «Результаты поиска решения» нажимаем ОК, при условии, что решение найдено.



3. Находим оптимальное решение для температуры пара на выходе выпарного аппарата:

1) в листе «расчет» выбираем ячейку для нахождения оптимального решения;

2) выбираем на строке меню вкладку «Данные» и нажимаем команду «поиск решения»;

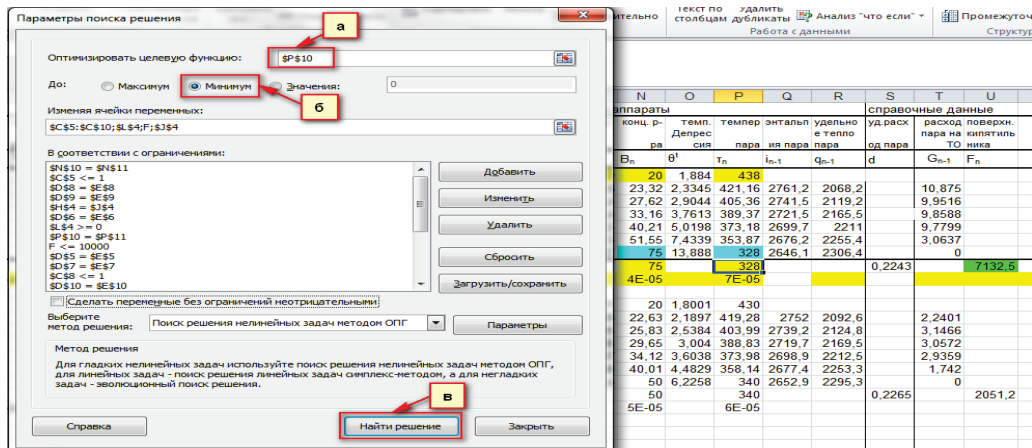


3) в появившемся окне «Параметры поиска решения»:

а) в строке «Оптимизировать целевую функцию» вводим номер ячейки, в которой стоит концентрация раствора в последней ступени (p.s. ячейка выделена голубым цветом) и значение которой должно соответствовать значению в исходных данных (p.s. ячейка выделена желтым цветом (предыдущий пункт 1));

б) выбираем в пункте «До» «Минимум»;

в) нажимаем кнопку «найти решение».



4) в появившемся окне «Результаты поиска решения» нажимаем ОК, при условии, что решение найдено.





8. Определяем расход раствора на одну трубу.

31	4	Расход раствора на одну трубу $\dot{u}(Q)$ , в см <sup>3</sup> /с			
32					
33		$\dot{u}=Q=0,1/1147*1000000$			
34					
35		87,184 см <sup>3</sup> /с= 8,72E-05 м <sup>3</sup> /с			
36					

9. Определяем количество трубок в аппарате:

1) вводим значения диаметра и длины трубы.

36							
37	5	Количество трубок в каждом аппарате:					
38							
39		$n=F/\pi*d*l$					
40		n= 3786 шт					
41							

1	
F	7132,5 м <sup>2</sup>
d	0,05 м
l	12 м

10. Определяем напор для одной трубки.

41							
42	6	Тогда напор для одной трубки составит					
43							
44		$H = \dot{u}^2 / (\mu^2 \cdot F^2 \cdot 2g)$					
45							
46		H= 9,761 см.вод.ст или 97,61 кгс/м <sup>2</sup>					
47							

11. Определяем полезную работу, развиваемую насосом.

47							
48	7	Полезная работа, развиваемая насосом					
49							
50		$L = Q \cdot H \cdot n$					
51		L= 11,60 кВт					
52							

12. Определяем действительную мощность, потребляемую насосом:

1) вводим значение КПД насоса, например 0,8.

52							
53	8	Действительная мощность потребляемая насосом					
54							
55		$N_d=L/\eta$					
56		$N_g=$ 14,5 кВт					
57							

1	
$\eta$	0,8

13. Определяем удельные эксергетические потери:

1) вводим значение температуры холодильника (окружающая среда)

$T_x=280$  К (принимаем);



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Непенин, Н. Н. Технология целлюлозы, Т.1. [Текст] / Н. Н. Непенин. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 571 с.
2. Казаков, В. Г. Выпаривание растворов целлюлозного производства [Текст] / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. – СПб: Издательско-полиграфическая ассоциация, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-91155-149-0. – EDN KRXQVL
3. Суслов, В. А. Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производства [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. А. Суслов. – СПб.: СПб ГТУРП, 2004. – 156 с.
4. Бойков, Л. М., Нечаев, Н. С. Теплотехника целлюлозно-бумажного производства. Теплоэнергетические и теплотехнологические установки [Текст] / Л. М. Бойков, Н. С. Нечаев. – СПб.: СПб ГУПТД ВШТЭ, 2017. – 383 с. – ISBN 978-5-91646-101-5.
5. Громова, Е. Н. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Ч. 1: учебное пособие [Текст] / Е. Н. Громова; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петербург. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 88 с.
6. Проектирование выпарных установок ЦБП: учебное пособие [Текст] / В. Л. Мовсесян, В. А. Суслов, В. А. Ганичев, А. Ф. Мурзич; Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности. – Ленинград: ЛТА, 1987. – 83 с.