

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**

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИНЖЕНЕРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫПАРНЫХ БАТАРЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

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
2024

Утверждено
на заседании кафедры ПТЭ
31.01.2024 г., протокол № 4

Рецензент С. Н. Смородин

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Теория и практика инженерного исследования» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». В методических указаниях приводится методика построения математической модели действующей выпарной батареи на основе метода ротатабельного центрального композиционного планирования и алгоритм поиска критерия оптимальности работы оборудования. Приводится пример исследования в пакете специализированных программ.

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, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 04.03.2024 г. Рег. № 5143/24

**Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.**

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТАВЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ.....	6
1.1. Выбор параметров, влияющих на критерий оптимальности.....	6
1.2. Выбор плана эксперимента.....	6
1.3. Пакеты программ, используемые в исследовании.....	8
1.4. Автоматизированный проектный тепловой расчет выпарных батарей.....	9
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕБЕСТОИМОСТИ ВЫПАРЕННОЙ ВОДЫ.....	23
2.1. Порядок теплового расчета выпарных батарей. Материальный и тепловой балансы.....	23
2.2. Исследование регрессионного уравнения и построение графических зависимостей.....	28
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	36

ВВЕДЕНИЕ

Одной из серьезных задач, возникающих при эксплуатации теплотехнического оборудования, является настройка технологического процесса на оптимальный режим.

В настоящих методических указаниях излагается методика анализа технологического процесса с целью определения критерия оптимальности на примере производства Архангельского ЦБК.

Поверочный тепловой расчет производится по специальной программе TestBloks. В результате поверочного расчета получают важные экономические показатели, такие как:

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

Далее на основе заданных исходных данных и матрицы кодированных значений производятся исследования по поиску критерия оптимальности работы выпарной батареи.

На основании матрицы кодированных значений, используя формулы перевода из кодированных значений в натуральные, получают значения для нулевых уровней и шагов для переменных x_1 , x_2 и x_3 . На основании строится план проведения эксперимента или матрица натуральных значений варьируемых переменных. Используя программу Excel, а именно программный редактор вычисления критерия оптимальности, получают значения данной матрицы себестоимости выпаренной воды.

Затем полученные значения используются для получения коэффициентов регрессионного уравнения в специальной программе «Ротатабельный план». Полученное уравнение применяется для построения графиков при различных зависимостях температурного напора, скорости и количества ступеней, что позволяет оценить эффективность выпарной установки при различных значениях варьируемых переменных. Графики показывают, что при различных сравнениях параметров можно графически определить стоимость выпаривания (критерий оптимальности), которая является минимальной, а также диапазоны, при которых значения критерий оптимальности будут варьироваться в небольших пределах.

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. Составление критерия оптимальности.

2. Определение оптимальных параметров себестоимости выпаренной воды.
3. Исследование регрессионного уравнения и построение графических зависимостей.
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.

Для оформления отчет с результатами исследования необходимо использовать методические рекомендации «Оформление текстовой части курсовой работы и курсового проекта. Краткая выписка из ГОСТ 7.32-2017 “Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления” » [1].

1. СОСТАВЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

$$\frac{c}{W} = \frac{\left[\frac{p_m}{Q_p^H} \cdot \left(\frac{\Pi_i + N_{\text{цн}}}{\eta} \right) + (p_f \cdot F + p_{\text{цн}} \cdot n) \cdot \frac{A_0}{\tau \cdot 3600} \right]}{\sum W},$$

где C – стоимость выпаривания, руб/кг;

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

P_m – 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, шт.;

p_f – стоимость и изготовление 1 м² поверхности, руб/м² (принимаем);

$p_{\text{цн}}$ – стоимость циркуляционного насоса, руб (принимаем);

A_0 – коэффициент амортизационных отчислений (принимаем);

τ – число часов работы в год.

1.1. Выбор параметров, влияющих на критерий оптимальности

Параметрами, влияющими на себестоимость выпаривания, являются:

- общий температурный напор – разность температур между греющим паром 1-го корпуса и вторичным паром в последнем корпусе по ходу пара, °С;
- число ступеней выпаривания, которое влияет на расход пара и общую поверхность теплообмена выпарных аппаратов;
- скорость пленки, м/с.

1.2. Выбор плана эксперимента

Для нахождения критерия оптимальности воспользуемся ротатбельным центральным композиционным планом второго порядка в кодированных значениях для трех переменных.

Данный метод позволяет исследовать регрессионное уравнение аналитическими методами на оптимум целевой функции. При таком подходе требуется гораздо меньшее число опытов, чем при решении данной задачи с помощью симплекс-метода.

Матрица центрального композиционного плана состоит из ядра плана, звездных точек и центра плана. В качестве ядра плана может быть использован полный $2 \cdot n$ факторный план. Величина плеча α для ротатбельного плана второго порядка вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{2 \cdot n}{4},$$

где n – число варьируемых переменных.

Составляется матрица планирования эксперимента для трех переменных в кодированных значениях. Выбираем нулевой уровень для каждой переменной и шаг для каждой переменной и определяем звездные точки.

	Номер опыта	Переменные			Стоимость выпаренной воды
		X1	X2	X3	
Ядро плана	1	-1	-1	-1	0,101
	2	+1	-1	-1	0,088
	3	-1	+1	-1	0,071
	4	+1	+1	-1	0,045
	5	-1	-1	+1	0,151
	6	+1	-1	+1	0,119
	7	-1	+1	+1	0,19
	8	+1	+1	+1	0,113
	Номер опыта	Переменные			Стоимость выпаренной воды
		X1	X2	X3	
Звездные точки	9	-1,682	0	0	0,099
	10	+1,682	0	0	0,06
	11	0	-1,682	0	0,121
	12	0	+1,682	0	0,07
	13	0	0	-1,682	0,071
	14	0	0	+1,682	0,252
Центр плана	15	0	0	0	0,078

При этом приняты следующие варьируемые переменные:

$$x_1^0 = 130 \text{ град}, x_{1\text{шаг}} = 20 \text{ град}, x_1^{-1} = 110 \text{ град}, x_1^{+1} = 150 \text{ град},$$

$$x_2^0 = 8 \text{ ступ}, x_{2\text{шаг}} = 2 \text{ ступ}, x_2^{-1} = 6 \text{ ступ}, x_2^{+1} = 10 \text{ ступ},$$

$$x_2^{-1,682} = 5 \text{ ступ}, x_2^{+1,682} = 11 \text{ ступ},$$

$$x_3^0 = 2 \text{ м/с}, x_{3\text{шаг}} = 0,5 \text{ м/с}, x_3^{-1} = 1,5 \text{ м/с}, x_3^{+1} = 2,5 \text{ м/с},$$

$$x_3^{-1,682} = 1,16 \text{ м/с}, x_3^{+1,682} = 2,84 \text{ м/с}.$$

1.3. Пакеты программ, используемые в исследовании

Все расчеты производятся в программе Excel в следующей последовательности:

1. Тепловой расчет выпарных батарей. Определение поверхностей нагрева в каждом из опытов и распределение потоков по корпусам выпарных аппаратов.

2. Материальный и тепловой балансы. На этом этапе производятся расчеты:

- материальный и тепловой балансы выпарных батарей;
- циркуляционный расход на трубу при скорости стекания пленки;
- расход раствора на одну трубу;
- количество трубок в каждом аппарате;
- напор для одной трубки;
- полезная работа, развиваемая насосом;
- действительная мощность, потребляемая насосом;
- удельные эксергетические потери;
- критерий оптимальности.

3. Получение и исследование математической модели в виде полинома второй степени и построение графических зависимостей по влиянию параметров выпарной батареи на себестоимость выпаривания.

Составление графических зависимостей стоимости выпаренной воды от варьируемых параметров и их взаимодействий, определяется аналитический минимум себестоимости.

Вывод регрессионного уравнения в специальной программе. Исследование данного уравнения на основе построения графиков влияния варьируемых параметров и их взаимодействия на функцию цели (себестоимость выпаренной воды):

- общего температурного напора при различном числе ступеней выпаривания и нулевом значении скорости пленки;
- общего температурного напора при различной скорости пленки и нулевом значении числа ступеней выпаривания;
- числа ступеней выпаривания при различном общем температурном напоре и нулевом значении скорости пленки;
- числа ступеней выпаривания при различной скорости пленки и нулевом значении общего температурного напора;
- скорости пленки при различном числе ступеней выпаривания и нулевом значении общего температурного напора;
- скорости пленки при различном общем температурном напоре и нулевом значении числа ступеней выпаривания.

1.4. Автоматизированный проектный тепловой расчет выпарных батарей

Имеющаяся на момент начала написания данных методических указаний методика предполагает использование пакета прикладных программ для автоматизированного расчета. В ходе работы авторами были предложены мероприятия по совершенствованию данной методики расчета.

Рассмотрим усовершенствование методики на примере проектного теплового расчета для первого опыта (6 ступеней выпаривания, температурный напор 110 °С, скорость пленки 1,5 м/с).

Исходные данные:

- Конфигурация по ходу раствора – 4К-5К-6К-1П-2П-3К-1К-2К;
- Расход раствора на батарею $S_0 = 94,444$ кг/с;
- Концентрация слабого раствора $B_0 = 19,6$ %;
- Концентрация крепкого раствора $B_k = 47,3$ %;
- Температура исходного раствора $T_0 = 366$ K = 93 °С;
- Температура греющего пара $T_1 = 438$ K = 165 °С;
- Температура пара вакуумного корпуса $T_6 = 328$ K = 55 °С;

За основу был принят файл «Таблица». Был автоматизирован расчет концентраций, требовалось ввести концентрацию слабого и крепкого растворов и количество корпусов.

Концентрации крепкого раствора на выходе из каждого корпуса по ходу раствора

$c_n^p = c_{и} + n^p \times \frac{c_k - c_{и}}{N}$						
1 корпус	2 корпус	3 корпус	4 корпус	5 корпус	6 корпус	
24,216	28,330	33,450	38,060	42,683	47,300	

Для определения полезных температурных напоров в первом приближении предварительно задается коэффициент теплопередачи $K_n = 2000$ Вт/м² · град. По программе «Депрессия сульфат» определяются физико-химические температурные депрессии для соответствующих корпусов (для первого приближения по концентрации раствора).

Введём конц сухого вещества	33,45 %
Повышение точки кипения θ_n :	3,093483
$\theta = \theta_n \cdot \eta$, где $\eta = 0,0162 \cdot T^2 / r$	
введите T:	156,2 , тогда $\eta =$
введите r:	2094,5
$\theta =$	4,407597

1 корпус	2 корпус	3 корпус	4 корпус	5 корпус	6 корпус
7,46	9,29	5,83	2,16	3,18	4,41

Гидростатическими депрессиями для выпарных аппаратов с падающей пленкой и принудительной циркуляцией пренебрегаем. Гидравлические депрессии принимаем по одному градусу на корпус, в вакуумном корпусе гидравлическая депрессия равна нулю.

Находим сумму всех температурных депрессий.

$\Sigma = 37,33$

В усовершенствованной программе этот расчет также автоматизирован.

Далее программа автоматически рассчитывает значения полезных температурных напоров.

Полезные тепературные напоры по корпусам выпарных аппаратов	
$\Delta t_{пол}^{баш} = t_1 - t_N - \sum_1^N (\delta T + \theta + \vartheta) = 72,67$	
$\Delta t_n = \frac{\Delta t_{пол}^{баш}}{K_n} \cdot \frac{1}{\sum_1^N \frac{1}{K_n}} = 12,111667$	

В результате получаем таблицу для первого приближения:

Обозн	Размер	1 корпус		2 корпус		3 корпус		4 корпус		5 корпус		6 корпус	
t_n / r_n - темпер.	К/кДЖ/к	165,0		144,42		122,02		103,08		87,81		71,52	
$\rho_{\text{пар}}^-$	г	2762,9	2065,7	2739,6	2131,5	2709,5	2197,2	2681,2	2249,1	2656,7	2288,9	2629,4	2330,0
Δt_n -	град	12,11		12,11		12,11		12,11		12,11		12,11	
T_n -	К	152,88		132,31		109,91		90,97		75,70		59,41	
$\theta_{\text{греб}}^-$	град	7,46		9,29		5,83		2,16		3,18		4,41	
$s \Delta h_n$ -	град	0		0		0		0		0		0	
\tilde{t}_n / i_n - темпер.	К/кДЖ/к	145,42		123,02		104,08		88,81		72,52		55,0	
$\rho_{\text{пар}}^-$	г	2740,7	2128,3	2710,9	2194,4	2682,7	2246,4	2658,3	2286,4	2631,1	2327,6	2600,7	2370,5
Δi -	град	1		1		1		1		1		0	
$C_{\text{концентра}}^-$	%	42,683		47,300		38,060		24,216		28,830		33,450	
		5		6		4		1		2		3	

Также автоматизирован процесс нахождения и интерполяции энтальпий и скрытых теплот парообразования как для значений температуры греющего пара, так и для вторичного пара, что значительно сокращает время расчета.

Греющий пар						
1	Значение температуры:	165,00	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	близ больш	166,1	2764,1	2062,1	ЭНТАЛЬПИЯ	2762,942105
	близ меньш	164,96	2762,9	2065,8	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2065,670175
2	Значение температуры:	144,42	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	близ больш	144,52	2739,7	2131,2	ЭНТАЛЬПИЯ	2739,566667
	близ меньш	143,62	2738,5	2133,8	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2131,488889
3	Значение температуры:	122,02	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	близ больш	123,27	2711,3	2193,7	ЭНТАЛЬПИЯ	2709,538255
	близ меньш	121,78	2709,2	2197,9	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2197,22349
4	Значение температуры:	103,08	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	близ больш	104,81	2683,8	2244,4	ЭНТАЛЬПИЯ	2681,159839
	близ меньш	102,32	2680	2251,2	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2249,124498
5	Значение температуры:	87,81	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	близ больш	88,02	2657	2288,4	ЭНТАЛЬПИЯ	2656,655072
	близ меньш	85,95	2653,6	2293,7	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2288,937681
6	Значение температуры:	71,52	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	близ больш	72,03	2630,3	2328,8	ЭНТАЛЬПИЯ	2629,395745
	близ меньш	70,62	2627,8	2332,2	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2330,029787

Вторичный пар						
1	Значение температуры:	145,42	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	ближ больш	146,25	2741,8	2125,8	ЭНТАЛЬПИЯ	2740,738372
	ближ меньш	145,39	2740,7	2128,4	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2128,309302
2	Значение температуры:	123,02	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	ближ больш	123,27	2711,3	2193,7	ЭНТАЛЬПИЯ	2710,947851
	ближ меньш	121,78	2709,2	2197,9	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2194,404698
3	Значение температуры:	104,08	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	ближ больш	104,81	2683,8	2244,4	ЭНТАЛЬПИЯ	2882,885944
	ближ меньш	102,32	2680	2251,2	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2248,393574
4	Значение температуры:	88,81	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	ближ больш	89,96	2660,2	2283,4	ЭНТАЛЬПИЯ	2858,303093
	ближ меньш	88,02	2657	2288,4	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2288,383918
5	Значение температуры:	72,52	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	ближ больш	73,37	2632,5	2325,4	ЭНТАЛЬПИЯ	2831,104478
	ближ меньш	72,03	2630,3	2328,8	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2327,558718
6	Значение температуры:	55,00	энтальпия	образование	ИСКОМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	
	ближ больш	55,34	2601,3	2369,7	ЭНТАЛЬПИЯ	2800,891045
	ближ меньш	54	2598,9	2372,9	ПАРООБРАЗОВАНИЕ	2370,511194

Далее необходимо первоначально задать поверхности теплообмена кипятильников в каждом корпусе. Из практики работы выпарных станций количество выпаренной воды с одного квадратного метра можно предварительно оценить величиной 16 кг/м²·ч.

Таким образом, поверхность теплообмена рассчитывается следующим образом:

$$F_n = \frac{W \cdot 3600}{16 \cdot N} = \frac{W \cdot 225}{N} = \frac{225 \cdot 55,3}{6} \approx 2074 \text{ м}^2,$$

где W – количество выпаренной воды кг/с;

N – количество корпусов выпарной установки.

Полученные параметры пара и раствора вносятся в программу «Тепловой расчет» на основе данных конфигурации выпарной установки и данных из составленной таблицы для каждого корпуса выпарного аппарата и подогревателя.

Производится расчет с получением данных для первого приближения.

Расход пара, кг/с

- Нагреватель №1 **2.738**
- Нагреватель №2 **1.822**
- Выпариватель №1 **10.715**
- Выпариватель №2 **12.277**
- Выпариватель №3 **10.689**
- Выпариватель №4 **9.008**
- Выпариватель №5 **8.351**
- Выпариватель №6 **10.269**

Тепловые потоки, кВт

- Выпариватель №1 **32415.490**
- Выпариватель №2 **22654.654**
- Выпариватель №3 **26735.249**
- Выпариватель №4 **19757.987**
- Выпариватель №5 **14216.896**
- Выпариватель №6 **19274.201**

Коэффициенты теплопередачи, кВт/(м² град)

- Выпариватель №1 **1.290**
- Выпариватель №2 **0.902**
- Выпариватель №3 **1.064**
- Выпариватель №4 **0.787**
- Выпариватель №5 **0.566**
- Выпариватель №6 **0.767**

Невязка по программе составляет 2,5 %, следовательно, необходимо изменить расход пара и провести расчет заново.

Общее количество выпаренной воды: **$W_{об} = 56.749$ кг/с**

Удельный расход пара на батарею **$d = 0.279$**

Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:

$W'_{об} = 55.309$ кг/с

Расхождение **$\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 2.5$ %.**

Путем изменения расхода греющего пара со значения 15,806 кг/с до значения 15,629 кг/с добиваемся невязки, равной нулю.

Общее количество выпаренной воды: **$W_{об} = 55.311$ кг/с**

Удельный расход пара на батарею **$d = 0.283$**

Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:

$W'_{об} = 55.309$ кг/с

Расхождение **$\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 0.0$ %.**

<u>Расход пара, кг/с</u>	
• Нагреватель №1	2.770
• Нагреватель №2	1.843
• Выпариватель №1	10.459
• Выпариватель №2	12.075
• Выпариватель №3	10.475
• Выпариватель №4	8.778
• Выпариватель №5	8.100
• Выпариватель №6	10.038
<u>Тепловые потоки, кВт</u>	
• Выпариватель №1	32052.492
• Выпариватель №2	22111.735
• Выпариватель №3	26294.586
• Выпариватель №4	19234.035
• Выпариватель №5	13622.883
• Выпариватель №6	18696.362
<u>Коэффициенты теплопередачи, кВт/(м² град)</u>	
• Выпариватель №1	1.275
• Выпариватель №2	0.880
• Выпариватель №3	1.047
• Выпариватель №4	0.766
• Выпариватель №5	0.542
• Выпариватель №6	0.744

После чего, в случае включения в схему подогревателей смешения, как и в предлагаемой схеме, невязка рассчитывается по программе «Расчет невязки». Для этого в программу вставляются данные по сумме расходов пара на подогревателе и общий расход выпаренной воды.

Чтобы определить какая невязка будет в расчете,			
		<u>необходимо указать:</u>	кол-во выпарен. воды 55,309 кг/с
		<u>расход пара</u>	
		на подогреватели	4,613 кг/с
$\alpha = \frac{W_{\text{к}}}{W_{\text{под}}^{\delta=0}} =$	11,99		
тогда невязка будет равна:			
$\delta = (\alpha + 1)^{-1} =$	0,077	или	7,7 %

Полученное значение невязки в программе «Тепловой расчет» обеспечивается корректировкой расхода греющего пара со значения 15,629 кг/с до значения 16,200 кг/с.

Общее количество выпаренной воды: $W_{об} = 59.951$ кг/с
 Удельный расход пара на батарею $d = 0.270$
 Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:
 $W'_{об} = 55.309$ кг/с
 Расхождение $\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 7.7$ %.

Расчет приближения считается окончанным с достижением необходимой невязки.

Расчет коэффициента теплопередачи также автоматизирован и интегрирован в программу теплового расчета в Microsoft Excel. Таким образом, параметры греющего и вторичного пара, необходимые для определения коэффициентов теплопередач, автоматически переносятся в левое поле таблицы расчета КТП из таблицы для теплового расчета, что, в свою очередь, также значительно сокращает время расчета.

№ корпуса в выпарной батарее	Греющий пар			Кипящий раствор	Вторичный пар		
	Температура, К	Энергия фазового пер., кДж/кг	Энтальпия, кДж/кг	Температура, К	Температура, К	Энерг. фазового пер., кДж/кг	Энтальпия, кДж/кг
1	438	2065,7	2762,9421	425,88	418,42	2128,3093	2740,7
2	417,42	2131,5	2739,6	405,31	396,02	2194,4047	2710,9
3	395,02	2197,2	2709,5	382,91	377,08	2246,3936	2682,7
4	376,08	2249,1	2681,2	363,97	361,81	2286,3639	2658,3
5	360,81	2288,9	2656,7	348,7	345,52	2327,5567	2631,1
6	344,52	2330,0	2629,4	332,41	328	2370,5119	2600,7

После чего в правой части таблицы получаем коэффициенты теплопередачи по корпусам:

№ корпуса в выпарной батарее	Коэффициент теплопередачи.	Коэффициент теплопередачи. С учетом ф
1	2043	1839
2	2079	1871
3	2062	1856
4	2052	1847
5	1895	1705
6	1485	1336

Эти коэффициенты сравниваются с коэффициентами из программы «Тепловой расчет» (тест-блок). Устанавливается их несоответствие и, как следствие, необходимость расчета второго приближения.

Второе приближение начинается с изменения поверхностей теплообмена каждого корпуса в программе «Тепловой расчет» для совпадения равных значений коэффициентов теплопередач со значениями, полученными в усовершенствованной программе «Расчет КТП».

Полученные поверхности теплообмена:

- 1 корпус: $S_1 = 1491 \text{ м}^2$;
- 2 корпус: $S_2 = 1053 \text{ м}^2$;
- 3 корпус: $S_3 = 1233 \text{ м}^2$;
- 4 корпус: $S_4 = 935,5 \text{ м}^2$;
- 5 корпус: $S_5 = 752,5 \text{ м}^2$;
- 6 корпус: $S_6 = 1270,5 \text{ м}^2$.

Коэффициенты теплопередачи, кВт/(м² град)

- Выпариватель №1 **1.839**
- Выпариватель №2 **1.871**
- Выпариватель №3 **1.856**
- Выпариватель №4 **1.847**
- Выпариватель №5 **1.705**
- Выпариватель №6 **1.336**

Далее необходимо вычислить концентрации по корпусам выпарных аппаратов. В усовершенствованной программе для этого достаточно внести значения исходной концентрации раствора, его расхода, количества выпаренной воды по корпусам выпарных аппаратов, на подогреватели смешения. После внесения необходимых данных концентрации будут рассчитаны автоматически.

$b_n = \frac{b_{н}}{\alpha}; \text{ где}$ $\alpha = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n w_{в}}{S_0} + 2 * \frac{\sum_n w_{под}}{S_0}$	b_1	21,79742119	α_1	0,899188937
	b_2	24,35180425	α_2	0,804868493
	b_3	28,3780837	α_3	0,690673838
	b_4	29,40544868	α_4	0,666543137
	b_5	35,82963766	α_5	0,547033163
	b_6	47,54218204	α_6	0,412265469

Далее необходимо вычислить температурные депрессии. Для этого в усовершенствованной программе предусмотрены дополнительные листы для нахождения депрессий для каждого из корпусов.

Введём конц сухого вещества	35,82964	%
Повышение точки кипения θ_n :	3,592072	
	$\theta = \theta_n \cdot \eta$, где $\eta = 0,0162 \cdot T^2 / r$	
введите T:	418,57	, тогда $\eta =$ 3,640445
введите r:	2128,3	
$\theta =$	13,07674	

Для нахождения депрессий вводятся концентрация, полученная в данном приближении, и температура вторичного пара, полученная в предыдущем приближении.

Полный полезный температурный напор рассчитывается автоматически.

$$\Delta t_{\text{пол}}^{\text{Бат}} = t_1 - t_N - \sum_1^N (\delta T + \theta + \vartheta)$$

50,22

Температурные напоры по корпусам выпарных аппаратов также рассчитываются автоматически, требуется лишь ввести значения КТП из предыдущего приближения.

Таким образом, таблица для второго приближения заполнена.

Результаты второго приближения:

Обозн	Размер	1 корпус		2 корпус		3 корпус		4 корпус		5 корпус		6 корпус	
t_n / r_n темп. Горячий	К/кДЖ	165,0		143,11		112,64		96,78		84,60		71,08	
	/кг	2762,9	2065,7	2737,9	2135,4	2695,8	2223,3	2671,2	2265,7	2651,4	2297,2	2628,6	2331,1
Δt_n -	град	7,82		7,68		7,75		7,78		8,43		10,76	
T_n -	К	157,19		135,43		104,89		89,00		76,16		60,32	
θ_n темп	град	13,08		21,79		7,11		3,40		4,08		5,32	
$c \Delta h_n$ -	град	0		0		0		0		0		0	
\tilde{t}_n / i_n темп.	К/кДЖ	144,11		113,64		97,78		85,60		72,08		55,0	
	/кг	2739,2	2132,4	2697,3	2220,5	2672,8	2263,1	2653,0	2294,6	2630,4	2328,7	2600,7	2370,5
Δi -	град	1		1		1		1		1		0	
c концентра	%	35,830		47,542		29,405		21,797		24,352		28,378	

Следующим шагом необходимо подставить данные из таблицы в программу «Тепловой расчет».

В результате чего получено значение невязки, равное 8,4 %.

Общее количество выпаренной воды: $W_{об} = 60.349$ кг/с
 Удельный расход пара на батарею $d = 0.268$
 Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:
 $W'_{об} = 55.309$ кг/с
 Расхождение $\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 8.4$ %.

Для достижения невязки, равной нулю, изменяется расход греющего пара с 16,200 кг/с до 15,644 кг/с.

Общее количество выпаренной воды: $W_{об} = 55.304$ кг/с
 Удельный расход пара на батарею $d = 0.283$
 Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:
 $W'_{об} = 55.309$ кг/с
 Расхождение $\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 0.0$ %.

Далее снова рассчитывается невязка по программе «Расчет невязки».

Чтобы определить какая невязка будет в расчете,			
		необходимо указать:	кол-во выпарен. воды 55,309 кг/с
			расход пара
		на подогреватели	3,683 кг/с
$\alpha = \frac{W_k}{W_{под}^{\delta=0}} =$	15,02		
тогда невязка будет равна:			
$\delta = (\alpha + 1)^{-1} =$	0,062	или	6,2 %

Для достижения полученной невязки в программе «Тепловой расчет» происходит корректировка расхода пара до значения 16,050 кг/с.

Общее количество выпаренной воды: $W_{об} = 58.988$ кг/с
 Удельный расход пара на батарею $d = 0.272$
 Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:
 $W'_{об} = 55.309$ кг/с
 Расхождение $\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 6.2$ %.

Расход пара, кг/с

- Нагреватель №1 **2.190**
- Нагреватель №2 **1.383**
- Выпариватель №1 **10.323**
- Выпариватель №2 **12.058**
- Выпариватель №3 **10.471**
- Выпариватель №4 **9.601**
- Выпариватель №5 **9.139**
- Выпариватель №6 **10.969**

Тепловые потоки, кВт

- Выпариватель №1 **32915.894**
- Выпариватель №2 **21864.720**
- Выпариватель №3 **26566.115**
- Выпариватель №4 **20399.523**
- Выпариватель №5 **16864.908**
- Выпариватель №6 **21104.291**

Коэффициенты теплопередачи, кВт/(м² град)

- Выпариватель №1 **2.823**
- Выпариватель №2 **2.704**
- Выпариватель №3 **2.780**
- Выпариватель №4 **2.803**
- Выпариватель №5 **2.659**
- Выпариватель №6 **1.544**

Также в ходе расчета были автоматически получены значения коэффициентов теплопередачи для второго приближения:

№ корпуса в выпарной батарее	Коэффициент теплопередачи.	Коэффициент теплопередачи. С учетом ф
1	2160	1944
2	2201	1981
3	2195	1975
4	2165	1948
5	1963	1767
6	1496	1347

На этом расчет приближения считается окончанным.

Значения КТП из первого, второго приближений и программы «Тепловой расчет» не совпали, следовательно, необходимо произвести расчет третьего приближения.

Каждое последующее приближение производится аналогично второму до тех пор, пока не будет достигнуто совпадение КТП.

Результаты третьего приближения:

Обозн	Размер	1 корпус		2 корпус		3 корпус		4 корпус		5 корпус		6 корпус	
t_n / r_n темпл. Головки	К/кДЖ /кг	165,0		142,89		113,43		97,45		85,32		71,65	
		2762,9	2065,7	2737,6	2136,1	2697,0	2221,1	2672,3	2264,0	2652,6	2295,3	2629,6	2329,7
Δt_n -	град	7,78		7,64		7,66		7,77		8,56		11,23	
T_n -	К	157,21		135,25		105,76		89,69		76,76		60,41	
θ_n -	град	13,32		20,83		7,31		3,36		4,11		5,41	
$c \Delta h_n$ -	град	0		0		0		0		0		0	
\tilde{i}_n / i_n темпл.	К/кДЖ /кг	143,89		114,43		98,45		86,32		72,65		55,0	
		2738,9	2133,0	2698,4	2218,4	2673,9	2261,3	2654,2	2292,7	2631,3	2327,2	2600,7	2370,5
Δi -	град	1		1		1		1		1		0	
c - концентра	%	36,234		47,429		30,143		21,818		24,452		28,595	

№ корпуса в выпарной батарее	Коэффициент теплопередачи.	Коэффициент теплопередачи. С учетом ϕ
1	2161	1945
2	2203	1983
3	2195	1976
4	2163	1947
5	1959	1763
6	1491	1342

Расход пара, кг/с

- Нагреватель №1 **2.266**
- Нагреватель №2 **1.384**
- Выпариватель №1 **10.427**
- Выпариватель №2 **12.173**
- Выпариватель №3 **10.556**
- Выпариватель №4 **9.570**
- Выпариватель №5 **9.048**
- Выпариватель №6 **10.943**

Тепловые потоки, кВт

- Выпариватель №1 **32973.317**
- Выпариватель №2 **22092.017**
- Выпариватель №3 **26791.080**
- Выпариватель №4 **20571.768**
- Выпариватель №5 **16605.611**
- Выпариватель №6 **20881.343**

Коэффициенты теплопередачи, кВт/(м² град)

- Выпариватель №1 **1.955**
- Выпариватель №2 **2.012**
- Выпариватель №3 **2.012**
- Выпариватель №4 **1.970**
- Выпариватель №5 **1.714**
- Выпариватель №6 **1.276**

Расход греющего пара равен 16,078 кг/с.

Общее количество выпаренной воды: $W_{об} = 59.066$ кг/с
 Удельный расход пара на батарею $d = 0.272$
 Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:
 $W'_{об} = 55.309$ кг/с
 Расхождение $\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 6.4$ %.

Значения КТП из второго, третьего приближений и программы «Тепловой расчет» не совпали, следовательно, необходимо произвести расчет четвертого приближения.

Результаты четвертого приближения:

Обозн	Размер	1 корпус		2 корпус		3 корпус		4 корпус		5 корпус		6 корпус	
t_n / r_n темп. Греющего	К/кДЖ /кг	165,0		142,97		113,44		97,51		85,36		71,67	
		2762,9	2065,7	2737,7	2135,8	2697,0	2221,1	2672,4	2263,8	2652,6	2295,2	2629,7	2329,7
Δt_n -	град	7,78		7,63		7,66		7,78		8,59		11,28	
T_n -	К	157,22		135,34		105,78		89,73		76,77		60,39	
$\theta_{\text{сдв}} -$	град	13,25		20,90		7,27		3,37		4,11		5,39	
$c \Delta h_n$	град	0		0		0		0		0		0	
\tilde{t}_n / i_n темп.	К/кДЖ /кг	143,97		114,44		98,51		86,36		72,67		55,0	
		2739,0	2132,8	2698,4	2218,3	2674,0	2261,2	2654,3	2292,7	2631,3	2327,2	2600,7	2370,5
Δi -	град	1		1		1		1		1		0	
$c_{\text{концентра}}$	%	36,154		47,431		30,037		21,810		24,413		28,530	

№ корпуса в выпарной батарее	Коэффициент теплопередачи.	Коэффициент теплопередачи. С учетом ф
1	2161	1945
2	2203	1982
3	2195	1976
4	2163	1946
5	1958	1762
6	1491	1342

<u>Расход пара, кг/с</u>	
• Нагреватель №1	2.275
• Нагреватель №2	1.387
• Выпариватель №1	10.410
• Выпариватель №2	12.156
• Выпариватель №3	10.541
• Выпариватель №4	9.547
• Выпариватель №5	9.023
• Выпариватель №6	10.921
<u>Тепловые потоки, кВт</u>	
• Выпариватель №1	32961.012
• Выпариватель №2	22053.585
• Выпариватель №3	26754.638
• Выпариватель №4	20531.066
• Выпариватель №5	16535.435
• Выпариватель №6	20822.031
<u>Коэффициенты теплопередачи, кВт/(м² град)</u>	
• Выпариватель №1	1.945
• Выпариватель №2	1.982
• Выпариватель №3	1.975
• Выпариватель №4	1.946
• Выпариватель №5	1.762
• Выпариватель №6	1.342

Расход греющего пара равен 16,072 кг/с.

Общее количество выпаренной воды: **$W_{об} = 58.936$ кг/с**
Удельный расход пара на батарею **$d = 0.273$**
Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора:
 $W'_{об} = 55.309$ кг/с
Расхождение **$\delta = |1 - W'_{об} / W_{об}| = 6.2$ %.**

Значения КТП совпали, на этом проектный тепловой расчет окончен.
Аналогичные расчеты были произведены для оставшихся 14 опытов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕБЕСТОИМОСТИ ВЫПАРЕННОЙ ВОДЫ

В результате расчета определяется критерий оптимальности выпарных батарей многоступенчатой выпарной установки в ходе проведения опытов. По полученным значениям критерия оптимальности строятся графики параметров (температурный напор, число ступеней выпаривания, скорость пленки) от их взаимодействия на себестоимость выпаренной воды.

Исходные данные:

1. Концентрация раствора:
на входе: $B_0 = 19,6 \%$,
на выходе: $B_N = 47,3 \%$.
2. Расход раствора: $S_0 = 94,444$ кг/с.
3. Теплоемкость воды: $C_g = 4,20$ кДж/кг·град.
4. Теплоемкость раствора: $C_0 = 3,94$ кДж/кг·град.
5. Температура исходного раствора: $T_N = 366$ К.
6. Гидравлическая депрессия: $\delta = 1,0$ град.
7. Температура пара из батареи: $t_{a_N} = 328$ К.
8. Общий температурный напор (задается): Δt град.
9. Температура пара на батарею: $t_{a_0} = (t_{a_N} + \Delta t)$ К.
10. Недогрев в ТО: $dt = 5$ град.
11. Минимальный нагрев в ТО: $dT_0 = 4$ град.
12. КТП в ВА: $K_n = 1,0$ кВт/м²·град.

2.1. Порядок теплового расчета выпарных батарей Материальный и тепловой балансы

1. Ввод исходных данных, согласно плану эксперимента:
 - 1) концентрация раствора на входе в аппарат;
 - 2) концентрация раствора на выходе из аппарата;
 - 3) расход раствора;
 - 4) общий температурный напор в строку ячейки температуры пара на батарею;

концентрации раствора, %		расход раствора, кг/с	т/емкость воды, кДж/кг/град	т/емкость раствора, кДж/кг/град	температура раствора	гидравлическая депрессия, град	температура пара на батарее	температура пара из батареи	недогрев в ТО	минимальный нагрев в ТО	КТП в единичном ТО, кВт/м2/град	КТП в ВА, кВт/м2/град
B_0	B_N	S_0	C_B	C_0	T_N	Δi	τ_0	t_N	dt		K^T	K_n
B_0	B_N	S_0	C_B	C_0	T_N	d_i	t_{a0}	t_{aN}	dt	d_{T0}	K_T	K_n
19,6	47,3	94,444	4,2	3,94	366	1	438	328	5	4	0	1
						93		165				1
												1
												1
												1
												1

2. Нахождение оптимального решения концентрации раствора на выходе выпарного аппарата.

1) В листе «расчет» необходимо выбрать ячейку для нахождения оптимального решения.

2) Выбрать на строке меню вкладку «Данные» и нажать команду «Поиск решения»:

состояние ТО	Теплообменники							выпарные аппараты										справочные данные			
	наимен	доля пара на	нагрев	заданный	недогрев	поверхн	выходна	расход греющего	темпер.	приблиз.	расход выпар.	расход воды	конц р-	Депресс	темпер	энтальп	удельное	уд.расхо	расход поверхн.		
	ование	ТО	в	нагрев в	в	ость	темпер.	пара	р-ра	энт. пара	W _n	S _n	B _n	θ ^t	T _n	i _{n-1}	q _{n-1}	d	G _{n-1}	F _n	
вкл/выкл	№ст.	Y _{n-1}	ΔT _n	задΔT _n	Δt _{n-1}	F _n	T _n	g _{n-1}	t _n	l _n	W _n	S _n	B _n	θ ^t	T _n	i _{n-1}	q _{n-1}	d	G _{n-1}	F _n	
	0						433			433	11,833	94,444	19,6	1,8238	438						
вкл	1	0,2823	18,565	18,565	5,#####	414,44	8,4926	422,5	2739,6528	9,9836	84,46	21,917	2,066	419,44	2761,2	2068,2			3,3402		
вкл	2	0,2908	16,576	16,576	5,#####	397,86	7,0801	406,16	2718,4687	9,3341	75,126	24,64	2,3039	402,86	2739,4	2124,3			2,9035		
вкл	3	0,297	16,185	16,185	5,#####	381,67	6,5621	390,28	2697,7385	8,4806	66,646	27,775	2,6043	386,67	2718,2	2172,7			2,772		
вкл	4	0,31	15,674	15,674	5,#####	366	5,8515	375,22	2675,3092	7,4522	59,193	31,272	2,9644	371,26	2695,9	2218,5			2,6291		
выкл	5	0	0	0	5,2552	#####	366	7,4522	356,39	2645,3401	9,1669	50,027	37,002	3,6359	351,75	2673,3	2260,6		0		
выкл	6	0	0	0	-14,25	#####	366	9,1669	333,05	2604,8013	10,891	39,135	47,3	5,0536	328	2642,6	2311,9		0		
														47,3	328			0,2139		1133,3	

а) в строке «Оптимизировать целевую функцию» ввести номер ячейки, в которой стоит концентрация раствора в последней ступени и значение которой должно соответствовать значению в исходных данных;

б) выбрать в пункте «До» «Минимум»;

в) нажать кнопку «найти решение»;

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

3. Нахождение оптимального решения для температуры конденсата на выходе выпарной батареи:

а) в листе «Расчет» выбрать ячейку для нахождения оптимального решения;

б) выбрать на строке меню вкладку «Данные» и нажать команду «Поиск решения»;

состояние ТО	Теплообменники							выпарные аппараты										справочные данные	
	наимен. ование	доля пара на ТО	нагрев заданный	нагрев в	поверхн. ость	выходная темпер.	расход греющего пара	темпер. р-ра	приблиз. энт. пара	расход воды	расход р-ра	конц. ра	темпер. Депрессия	темпер. пара	энтальп. пара	удельное тепло пара	расход уд. пара	расход поверхн. пара на кипятильн. ТО	
																			№ст.
вкл/выкл	0					433		433		11,833	94,444	19,6	1,8238	438					
вкл	1	0,2823	18,565	18,565	5'#####	414,44	8,4926	422,5	2739,6528	9,9836	84,46	21,917	2,066	419,44	2761,2	2068,2	3,3402		
вкл	2	0,2908	16,576	16,576	5'#####	397,86	7,0801	406,16	2718,4687	9,3341	75,126	24,64	2,3039	402,86	2739,4	2124,3	2,9035		
вкл	3	0,297	16,185	16,185	5'#####	381,67	6,5621	390,28	2697,7385	8,4806	66,646	27,775	2,6043	386,67	2718,2	2172,7	2,772		
вкл	4	0,31	15,674	15,674	5'#####	366	5,8515	375,22	2675,3092	7,4522	59,193	31,272	2,9644	371,26	2695,9	2218,5	2,6291		
выкл	5	0	0	0	5,2552'#####	366	7,4522	356,39	2645,3401	9,1669	50,027	37,002	3,6359	351,75	2673,3	2260,6	0		
выкл	6	0	0	0	-14,25'#####	366	9,1669	333,05	2604,8013	10,891	39,135	47,3	5,0536	328	2642,6	2311,9	0		
																		0,2139	1133,3

в) в строке «Оптимизировать целевую функцию» ввести номер ячейки, в которой стоит концентрация раствора в последней и значение которой должно соответствовать значению в исходных данных;

г) выбрать в пункте «До» «Минимум»;

д) нажать кнопку «найти решение»;

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

4. Составление материального баланса и проверка его уравновешивания.

																	$G_{раств}$	94,44
1	Материальный баланс																D_n	8,493
	$G_{раств} + D_n =$																$W_{пара}$	10,89
	$= W_{пара} + (G_{раств} - \sum W) + (\sum W - W) + D_{конд}$																$\sum W$	55,31
																	W	10,89
	102,94 =	102,937															$D_{конд}$	8,493

5. Составление теплового баланса и проверка его уравновешивания.

2	Тепловой баланс																C_p	3,94
	$G_{раств} \cdot c_p \cdot t_p + D_n \cdot h_n =$																t_p	93
	$= W_{пара} \cdot h + (G_{раств} - \sum W) \cdot c_p \cdot t_p + c_e (\sum W - W) \cdot t_{конд} + D_k \cdot 4,19 \cdot t_{эн}$																h_n	2740
																	h	2643
																	C_v	4,2
																	$t_{конд}$	47,53
																	$t_{гн}$	165
	57873 =	57873	47,53	-температура конденсата														

6. Нахождение оптимального значения температуры конденсата, таким образом, чтобы тепловой баланс уравновесился.

1) Выбрать ячейку со значением температуры конденсата;

2) Выбрать на строке меню вкладку «Данные» и нажать команду «Поиск решения»:

26																			
27																			
28																			
29																			

3 циркуляционный расход на трубу при скорости стекания пленки (по графику) 0,1

1 при $W=1,5$ м/с

а) в строке «Оптимизировать целевую функцию» ввести номер ячейки, в которой находится значение правой части теплового баланса;

б) в строке «До:» отметить «Значения» и ввести в строку значение левой части теплового баланса, к которой будет приравняться правую часть;

2.2. Исследование регрессионного уравнения и построение графических зависимостей

1. Ввод начальных данных.

В самом начале необходимо перейти внизу экрана на Лист, который называется «1 точка».

Начальные значения параметров	Y1
X1	0,071
130	0,063
	0,042
Шаг для переменной	0,0338
X1	0,139
20	0,104
	0,16
	0,1037
	0,063
	0,05
	0,091
	0,063
	0,052
	0,231
	0,059

1.1. Ввести нулевой уровень параметра **X1** в ячейку (A3), **X2** в ячейку (B3), **X3** в ячейку (C3).

1.2. Ввести шаг для каждого параметра: для **X1** в ячейку (A7), для **X2** ячейку (B7), для **X3** ячейку (C7).

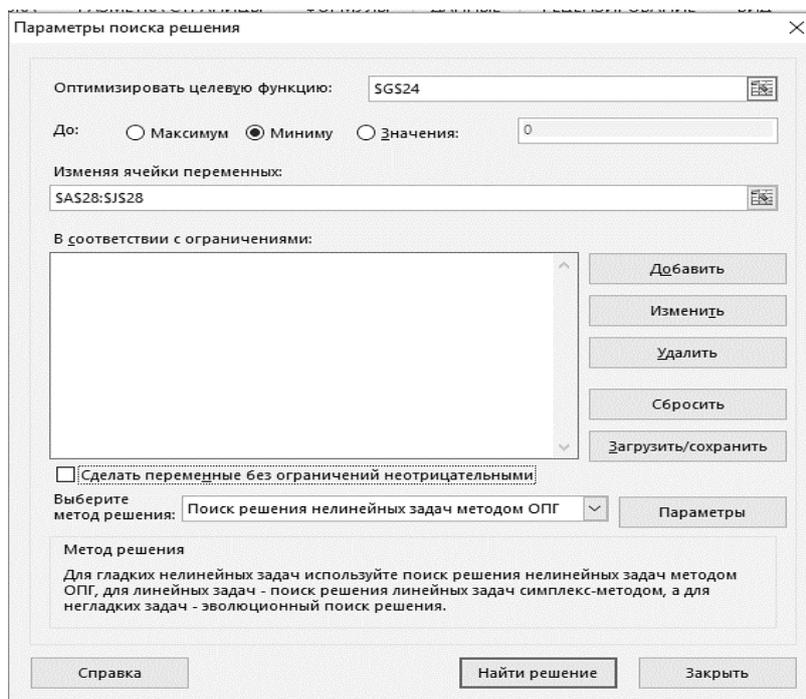
Начальные значения параметров		
X1	X2	X3
130	8	2
Шаг для переменной		
X1	X2	X3
20	2	0,5

1.3. Ввести Y экспериментальные. Величины Y1 в диапазон ячеек (D2:D21).

2. Проверка наличия пакета «Поиск решения».

3. Нахождение коэффициентов уравнения регрессии. В главном меню из набора опций ДАННЫЕ выбрать пункт «Поиск решения».

В открывшемся окне «Параметры поиска решения» вводятся:



- Оптимизировать целевую функцию: Ввести ячейку (\$G\$24).
- До: Минимума.
- Изменяя ячейки переменных: Вписать диапазон ячеек (\$A\$28:\$J\$28).
- Сделать переменные без ограничений не отрицательными.
- Выбрать метод решения: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ.

4. Проверка адекватности модели.

Начиная с ячейки (A35) необходимо найти таблицу: «Проверка адекватности модели».

Проверка адекватности модели	
F _{крит} при уровне значимости $\alpha = 0,05$	F _{крит} при уровне значимости $\alpha = 0,01$
5,05	10,97
F _{расч}	F _{расч}
0,4898	0,4898

Необходимо найти в таблице тот уровень значимости ($\alpha = 1 - P$), который задан в данной эксперименте. Если F_{расч} (ячейка) зеленого цвета – модель адекватна, если красного – неадекватна и следует изменить структуру уравнения регрессии или проанализировать экспериментальные данные.

5. Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии.

Начиная с ячейки (A42), необходимо найти таблицу: «Таблица значимости коэффициентов уравнения регрессии».

Таблица значимости коэффициентов уравнения регрессии							
tbi(значимые)	деления Стьюдента при уровне значимости (заданной вероятности) P = 1 - α :						tbi(значимые)
	P = 99%	P = 95%	P = 90%	P = 80%	P = 50%	P = 20%	
	4,0321	2,5706	2,0150	1,4759	0,7267	0,2672	
b0	1,0240	1,0240	1,0240	1,0240	1,0240	1,0240	b0
b1	1,4533	1,4533	1,4533	1,4533	1,4533	1,4533	b1
b2	0,9503	0,9503	0,9503	0,9503	0,9503	0,9503	b2
b3	6,7176	6,7176	6,7176	6,7176	6,7176	6,7176	b3
b11	2,3659	2,3659	2,3659	2,3659	2,3659	2,3659	b11
b22	3,5081	3,5081	3,5081	3,5081	3,5081	3,5081	b22
b33	7,1020	7,1020	7,1020	7,1020	7,1020	7,1020	b33
b12	0,3156	0,3156	0,3156	0,3156	0,3156	0,3156	b12
b13	1,1023	1,1023	1,1023	1,1023	1,1023	1,1023	b13
b23	1,1581	1,1581	1,1581	1,1581	1,1581	1,1581	b23

Находим в таблице ту вероятность надежности или уровень значимости ($\alpha = 1 - P$), который задан в данном эксперименте. Те коэффициенты, которые зеленого цвета – значимые, красного – не значимые.

Если есть не значимые коэффициенты, то опираясь на формулу:

$$b_0 + (b_1 \cdot x_1) + (b_2 \cdot x_2) + (b_3 \cdot x_3) + (b_{11} \cdot x_1 \cdot x_1) + (b_{22} \cdot x_2 \cdot x_2) + (b_{33} \cdot x_3 \cdot x_3) + (b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2) + (b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3) + (b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3)$$

Необходимо удалить из формулы в ячейке (E2) незначимые коэффициенты для уравнения регрессии.

СУММ						
=(\$D\$32*N3)+(SE\$32*L3*L3)+(S\$32*M3*M3)+(G\$32*N3*N3)						
опыт 1 [Режим совместимости] * РОТАТАБЕЛЬНЫЙ ПЛАН В КОТОРОМ ВСЕ ПОЛУЧИЛОСЬ *						
	A	B	C	D	E	F
1	Начальные значения параметров			Y1	Y расчётные значения ур-ния регрессии (значимые)	
2	X1	X2	X3	0,071	=(\$D\$32*N3	
3	130	8	2	0,063	0,049	
4				0,042	0,049	
5	Шаг для переменной			0,034	0,049	
6	X1	X2	X3	0,139	0,136	
7	20	2	0,5	0,104	0,136	
8				0,160	0,136	
9				0,104	0,136	
10				0,063	0,052	
11				0,050	0,052	
12				0,091	0,073	
13				0,063	0,073	
14				0,052	0,064	
15				0,231	0,211	
16				0,059	0,000	

Далее необходимо растянуть полученную формулу по всему диапазону ячеек (E2:E21).

После удаления незначимых коэффициентов уравнение примет вид:

$$\frac{C}{W} = 0,04 \cdot X_3 + 0,02 \cdot X_1^2 + 0,03 \cdot X_2^2 + 0,05 \cdot X_3^2.$$

6. Расчет значимых коэффициентов уравнения.

В главном меню из набора опций ДАННЫЕ выбрать пункт «Поиск решения».

В открывшемся окне «Параметры поиска решения» вводятся:

- Оптимизировать целевую функцию: Ввести ячейку (\$G\$25).
- До: Минимума.
- Изменяя ячейки переменных: Вписать диапазон ячеек(\$A\$32:\$J\$32).
- Сделать переменные без ограничений не отрицательными.

– Выбор метода решения: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ.

7. Нахождение аналитических минимумов.

Аналитический минимум для **X1** находится в ячейке (**A59**), для **X2** находится в ячейке (**B59**), для **X3** находится в ячейке (**C59**).

Аналитические минимумы		
X1	X2	X3
0,021247216	0,033768545	0,14075666

8. Полный вид уравнения регрессии.

Начиная с ячейки (**A61**), необходимо найти таблицу: «**Полный вид уравнения регрессии**».

В ней находится полный вид уравнений регрессии со значимыми коэффициентами по каждому опыту.

При исследовании математической модели были построены следующие графики.

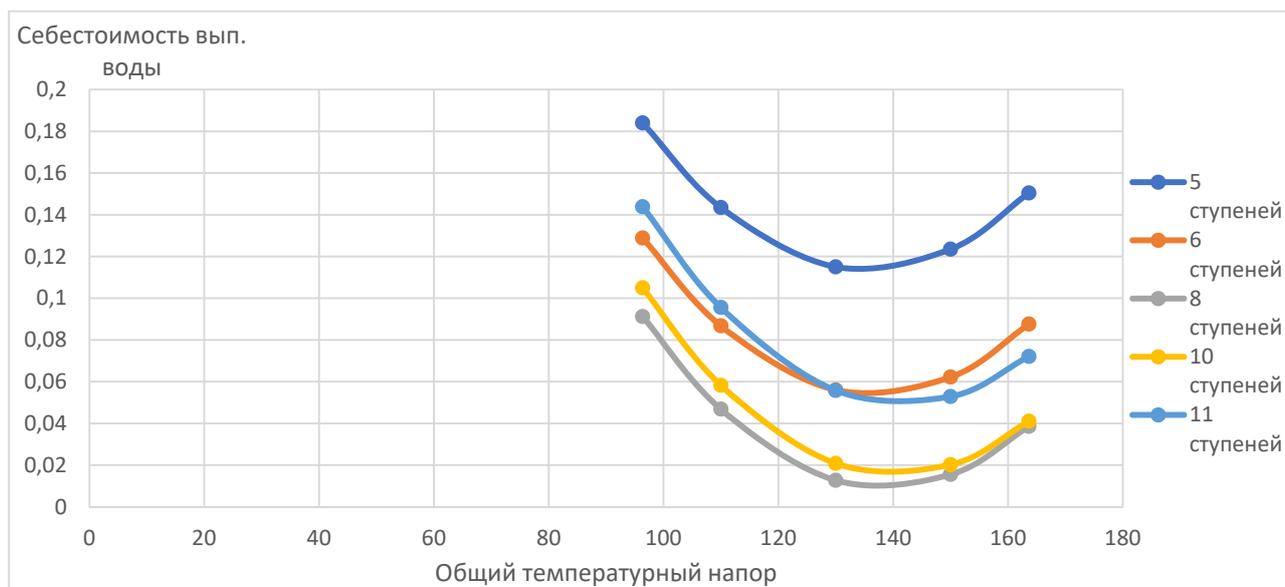


Рисунок 1 – Зависимость стоимости выпаривания от общего температурного напора при различном числе ступеней выпаривания при нулевом значении скорости пленки

Исследование зависимости (рис. 1) себестоимости выпаривания от общего температурного напора при различном числе ступеней выпаривания отчетливо показывает, что минимум себестоимости достигается в диапазоне ступеней выпаривания от 8 до 10 и общем температурном напоре от 130 °C до 150 °C.

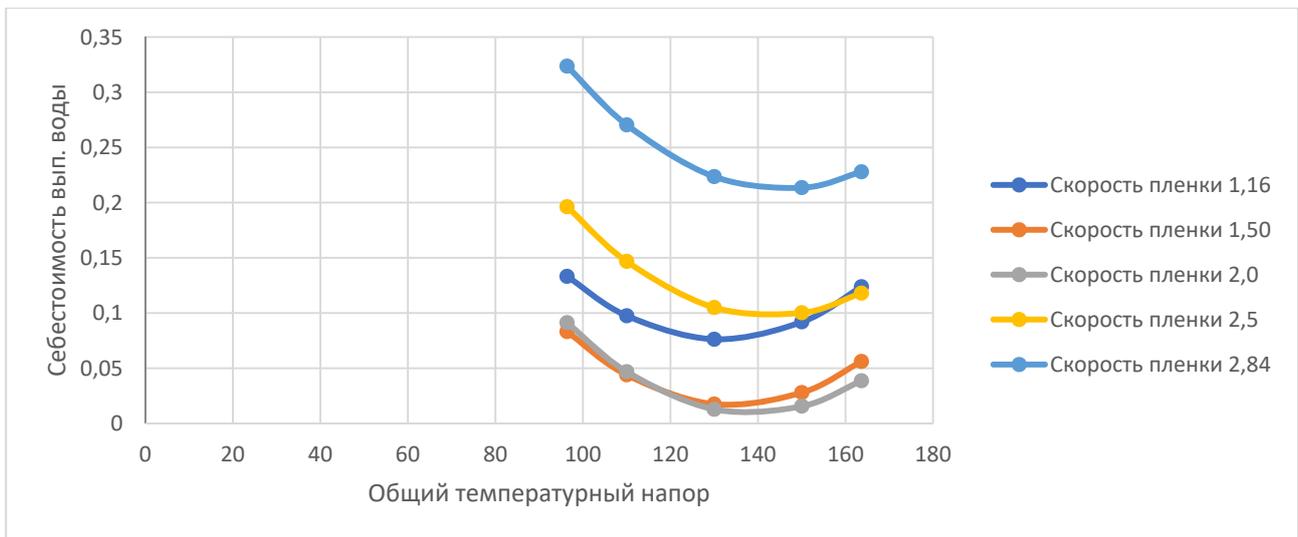


Рисунок 2 – Зависимость стоимости выпаривания от общего температурного напора при различной скорости пленки и нулевом значении числа ступеней выпаривания

При исследовании зависимости (рис. 2) себестоимости выпаривания от общего температурного напора при различной скорости пленки было установлено, что критерий оптимальности имеет наименьшее значение в диапазоне скоростей от 1,5 до 2 м/с и температурного напора от 130 °С до 150 °С, данный диапазон варьируемых переменных можно считать наилучшим.

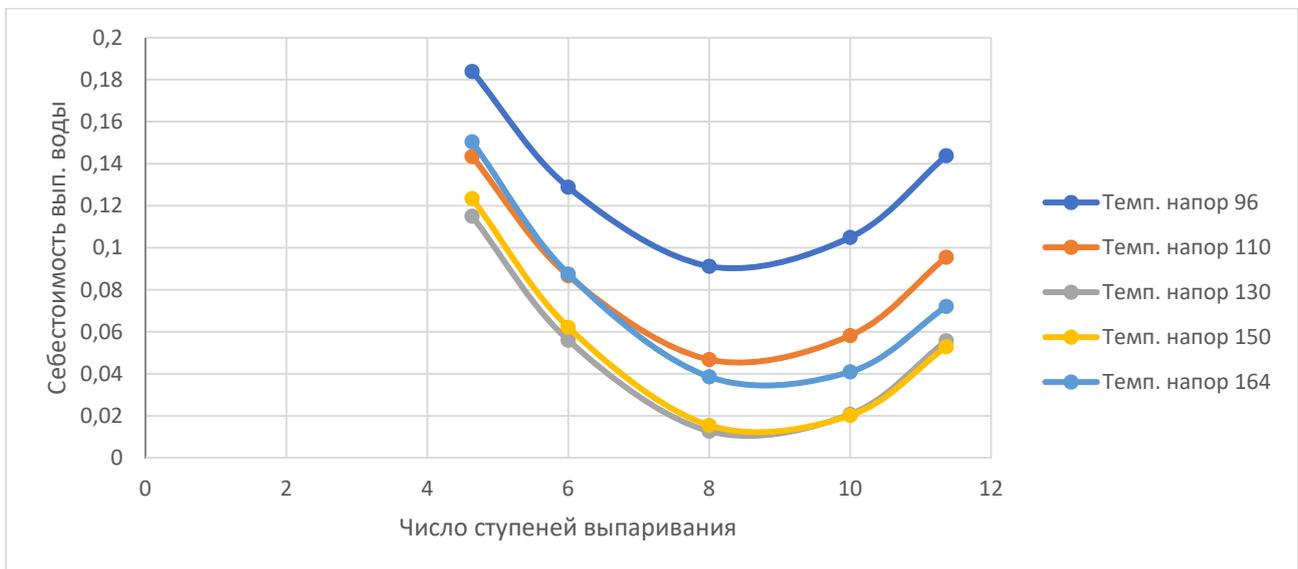


Рисунок 3 – Зависимость стоимости выпаривания от числа ступеней выпаривания при различном общем температурном напоре и нулевом значении скорости пленки

Исследование зависимости (рис. 3) себестоимости выпаривания от числа ступеней выпаривания при различном общем температурном напоре установило,

что критерий оптимальности имеет наименьшее значение при температурном напоре от 130 °С до 150 °С и числе ступеней выпаривания от 8 до 10.

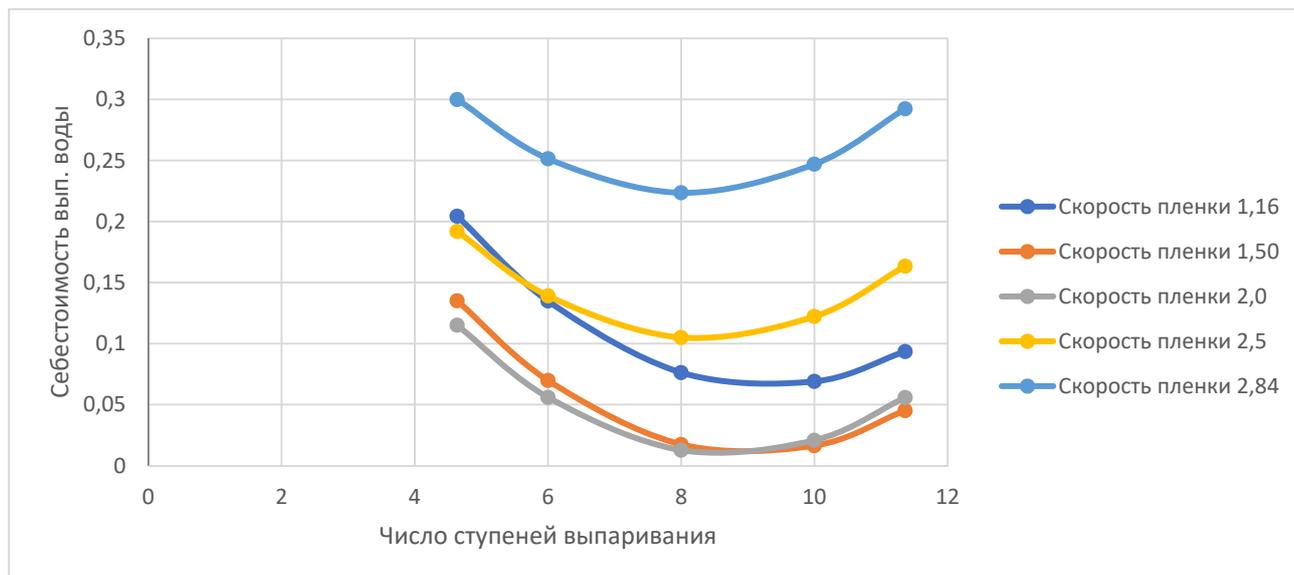


Рисунок 4 – Зависимость стоимости выпаривания от числа ступеней выпаривания при различной скорости пленки при нулевом значении общего температурного напора

Исследование зависимости (рис. 4) себестоимости выпаривания от числа ступеней выпаривания при различной скорости показывает, что критерий оптимальности имеет наименьшее значение при скорости пленки от 1,5 до 2 м/с и числе ступеней выпаривания от 8 до 10.

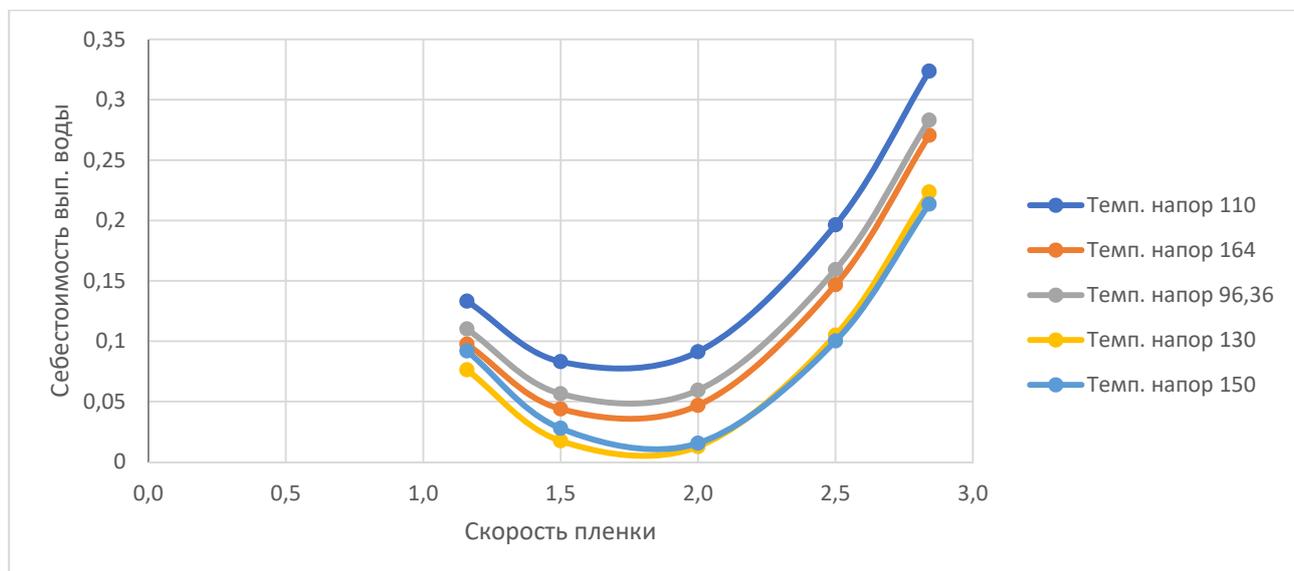


Рисунок 5 – Зависимость стоимости выпаривания от скорости пленки при различном общем температурном напоре и нулевом значении числа ступеней выпаривания

Исследование зависимости (рис. 5) себестоимости выпаривания от скорости пленки при различном общем температурном напоре показало, что оптимальная скорость пленки лежит в пределах от 1,5 до 2,0 м/с при температурном напоре от 130 °С до 150 °С.

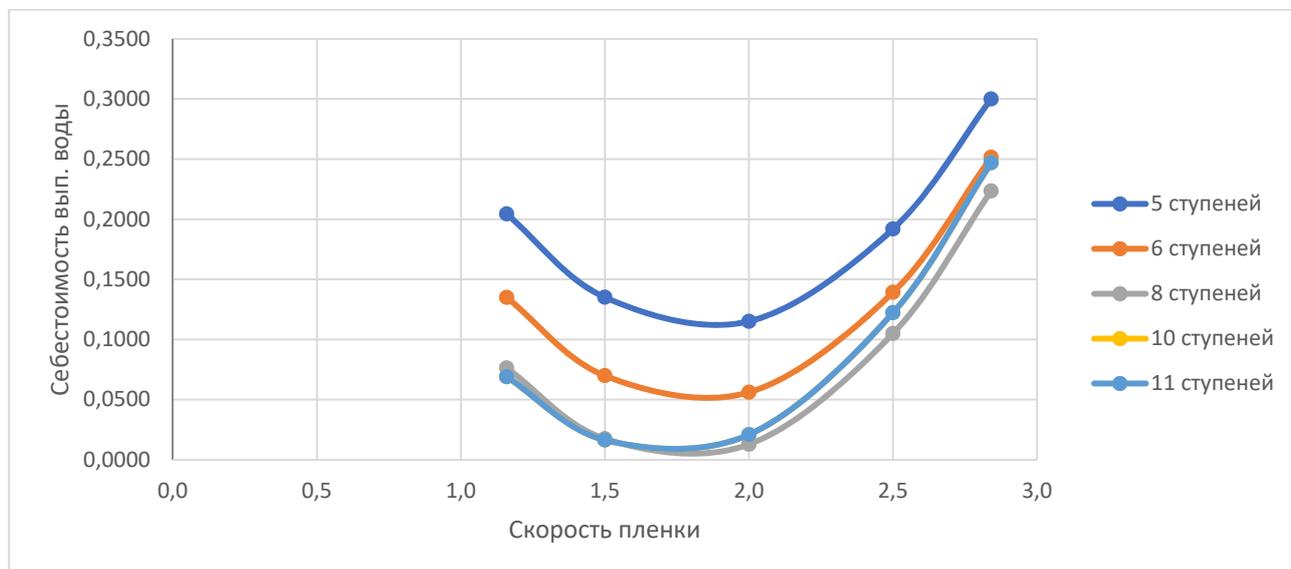


Рисунок 6 – Зависимость стоимости выпаривания от скорости пленки при различном числе ступеней выпаривания и нулевом значении общего температурного напора

Исследование зависимости (рис. 6) себестоимости выпаривания от скорости пленки при различном числе ступеней выпаривания показывает, что оптимальная скорость пленки составит от 1,5 до 2,0 м/с при числе ступеней выпаривания от 8 до 10.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Планирование экстремальных экспериментов.
2. Планирование эксперимента второго порядка.
3. Расчет оценок коэффициентов уравнения регрессии.
4. Отсевание с помощью планов полнофакторного и дробнофакторного эксперимента.
5. Составление матрицы планирования эксперимента.
6. Построение факторного эксперимента. Вычисление оценки градиента.
7. Оценка влияния технологического процесса на средства измерения.
8. Актуальность подходов и средства для постановки теплотехнических экспериментов.
9. Цель постановки эксперимента.
10. Преимущества и недостатки экспериментального изучения объекта.
11. Методы эмпирического исследования.
12. Виды экспериментов. Способ обработки результатов экспериментальных данных.
13. Основные условия проведения эксперимента.
14. Формулы перехода от кодированных значений в натуральные и обратно.
15. Принцип построения плана Плакетта-Бермана. Расчет эффектов отдельных факторов.
16. Метод планирования экспериментальной оптимизации (последовательный симплекс метод – ПСМ).
17. Ротатабельный композиционный план (РКП).
18. Методика проведения опытов и обработка результатов.

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/ сост.: М. Д. Баранова, А. Ю. Котова; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петерб. гос. ун-т пром. технологии и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 20с. – URL: <http://nizrp.narod.ru/recomedation.pdf>. – Текст : электронный.
2. Казаков, В. Г. Планирование экспериментальных исследований и статистическая обработка данных. Основы научных исследований в промышленной теплоэнергетике: учебное пособие / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, Е. Н. Громова; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петерб. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – 2-е изд., доп. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021.– 95 с. – Текст : непосредственный.
3. Казаков, В. Г., Луканин, П. В., Смирнова, О. С. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок: учебное пособие / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, О. С. Смирнова. – СПб.: СПбГТУРП, 2013. – 96 с. – Текст : непосредственный.
4. Непенин, Н. Н. Технология целлюлозы. Т. 1. / Н. Н. Непенин. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 571 с. – Текст : непосредственный.
5. Казаков, В. Г. Выпаривание растворов целлюлозного производства / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. – СПб: издательско-полиграфическая ассоциация, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-91155-149-0. – EDN KRXQVL. – Текст : непосредственный.
6. Суслов, В. А. Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производства: учеб. пособие для вузов / В. А. Суслов. – СПб.: СПб ГТУРП, 2004. –156 с. – Текст : непосредственный.
7. Бойков, Л. М., Нечаев, Н. С. Теплотехника целлюлозно-бумажного производства. Теплоэнергетические и теплотехнологические установки / Л. М. Бойков, Н. С. Нечаев. – СПб.: СПб ГУПТД ВШТЭ, 2017. – 383 с. – Текст : непосредственный.
8. Проектирование выпарных установок ЦБП: учебное пособие / В. Л. Мовсеян, В. А. Суслов, В. А. Ганичев, А. Ф. Мурзич; Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности. – Ленинград: ЛТА, 1987. – 83 с. – Текст : непосредственный.