

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

Выполнение контрольных работ

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

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

Санкт-Петербург
2025

Утверждено
на заседании кафедры ПТЭ
27.01.2025 г., протокол № 5

Рецензент В. Г. Злобин

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 указаниях представлен порядок выполнения и оформления контрольных работ. Приведены исходные данные для выполнения работ по вариантам, методики расчетов и справочная информация.

Методические указания предназначены для магистров заочной формы 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 17.03.2025 г. Рег. № 5075/25
Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	5
2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ СИМПЛЕКС-МЕТОД	6
2.1. Построение матрицы планирования эксперимента	6
2.2. Рабочий листок. Определение варьируемых параметров	7
2.3. Исходные данные к контрольной работе	10
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	12

ВВЕДЕНИЕ

В практике эксплуатации технологического оборудования часто возникают ситуации, когда необходимо определить, какие параметры технологического процесса и насколько сильно они влияют на выбранную целевую функцию (производительность, КПД, приведенные затраты и др.). Из множества выбранных параметров значимыми оказываются в большинстве случаев не более двух, трех. С ограничением параметров эффективнее работать при нахождении влияния их взаимодействия на функцию цели.

Одной из основных задач, возникающих при эксплуатации, является настройка технологического процесса на оптимальный режим. С этой целью используются методы экспериментальной оптимизации, такие как симплекс-метод и метод наискорейшего спуска. Использование этих методов позволяет эффективно при малых временных и капитальных затратах получить максимальное (или минимальное), значение целевой функции. Рассмотрим пример одной из ситуаций. При разработке технологии измельчения исходного продукта циркониевого электрокорунда была поставлена задача в промышленном эксперименте так подобрать параметры измельчения, чтобы получить после отсева измельченного продукта зерно с заданной прочностью при максимальном выходе. Первые попытки решить эту задачу методом случайного перебора параметров не дали положительных результатов. В последующем исследовании применили симплекс-метод планирования эксперимента. При использовании этого метода при постановке 4-х опытов эта задача была успешно решена.

Контрольная работа выполняется по мере изучения теоретического материала. Задание для контрольной работы и методика расчетов представлены в настоящих методических указаниях. Исходные данные для выполнения контрольной работы приводятся в соответствующей таблице. Номер варианта выбирается по последней цифре номера зачетной книжки (индивидуального шифра) студента. Работы, выполненные не по установленному варианту, рассматриваться не будут, они возвращаются студенту без проверки. Размерности исходных данных и вычисленных величин обязательно приводятся в соответствие с международной системой единиц измерения СИ.

Контрольные работы оформляются в печатном виде, на титульном листе обязательно указываются: ФИО студента, шифр, кафедра, наименование изучаемой дисциплины и номер варианта контрольного задания.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В промышленном производстве, лабораторной практике возникает проблема настройки технологического процесса на оптимальный режим или математическое описание некоторой области технологии путем эксперимента. Обеспечение решения таких задач требует выполнения ряда условий. К таким условиям относятся:

- выбор целевой функции;
- выбор варьируемых параметров, влияющих на численное значение целевой функции;
- план эксперимента, при реализации которого можно аналитически описать область существования этой функции в пределах принятых ограничений, либо достигнуть ее оптимального значения при минимальном количестве опытов и затрат времени.

Целевая функция. В качестве целевой функции может выступать технико-экономический критерий, термодинамический критерий, например, КПД, производительность процесса, расход пара и др.

Выбор варьируемых параметров. Выбор варьируемых параметров и диапазон (шаг) является одним из творческих этапов исследования. Он зависит от опыта исследователя, степени проработки проблемы. При разработке новых процессов трудно определить все варьируемые параметры, влияющие на целевую функцию. Здесь могут помочь специальные методы планирования эксперимента. По этим методам мысленно задается большое количество факторов. Путем варьирования этих факторов на двух уровнях выделяются значимые и незначимые параметры. Обычно выбор значимых параметров сокращается до 3-5.

Варьируемые параметры (факторы) задаются в кодированных координатах. Чтобы перейти от кодированных координат к натуральным значениям, и наоборот, пользуются следующими соотношениями:

$$x_j = \frac{\widetilde{x}_j - \widetilde{x}_j^0}{\Delta \widetilde{x}_j} \quad (1)$$

$$\text{и } \widetilde{x}_j = \widetilde{x}_j^0 + \Delta \widetilde{x}_j \cdot x_j, \quad (2)$$

где $\widetilde{x}_j^0$ – значение фактора с номером j на нулевом уровне в натуральной системе координат. За нулевой уровень принимают численное значение параметра, близкое (по априорной оценке исследователя) к ожидаемому значению.

$\Delta \widetilde{x}_j$ – шаг варьирования J -го фактора. Шагом варьирования переменных называют отклонение параметра от нулевого уровня.

План эксперимента. План эксперимента – алгоритм, по которому проводится эксперимент. Он задается таблицей (матрицей) из кодированных выбранных факторов. Перевод от кодированных значений факторов в натуральные значения производится по формулам (1) и (2).

2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ СИМПЛЕКС-МЕТОД

Этот метод относится к методам экспериментальной оптимизации. Он широко используется в производственной и лабораторной практике. Выбор этого метода планирования эксперимента определяется отсутствием требований к необходимости постановки большого количества опытов (план ненасыщенный) для составления исходной матрицы, а также при определении движения к оптимуму, что весьма важно при большом количестве варьируемых переменных. Кроме того, ошибка в определении целевой функции в этом методе не уводит далеко от стационарной области – потребуется сделать лишь несколько добавочных шагов.

2.1. Построение матрицы планирования эксперимента

Методика по определению целевой функции состоит в следующем.

1. Составляют матрицу планирования эксперимента. Для исследований примем почти целочисленную матрицу (табл. 1).

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента

-1	+1	+1	+1	+1
+1	-1	+1	+1	+1
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
+1	+1	+1	+1	-1
δ_κ	δ_κ	δ_κ	δ_κ	δ_κ

$$\delta_\kappa = 1 - \frac{2}{n}(\sqrt{n+1} + 1), \quad (3)$$

где n – число варьируемых переменных.

2. Производят расчет координат начального симплекса по методике, рассмотренной выше, и определяют целевую функцию для каждого опыта.

3. Отбрасывают точки плана с наименьшим численным значением целевой функции и строят новый симплекс. Координаты новой точки симплекса x^* рассчитывают из уравнения (в векторной записи):

$$x^* = \frac{2}{n} \left(x^1 + x^2 + \dots x^{j+1} + x^{j-1} + \dots x^{n+1} \right) - x^j = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n+1} x^i - \left[\frac{2}{n} + 1 \right] \cdot x^j, \quad (4)$$

где j – номер вершины исходного симплекса с наименьшим значением целевой функции.

Для $\hat{y}^*$ (прогнозируемое значение целевой функции в новой точке):

$$\hat{y}^* = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n+1} \hat{y}^i - \left[\frac{2}{n} + 1 \right] \cdot \hat{y}^j. \quad (5)$$

4. Проводят эксперимент в новой точке x^* и получают соответствующее значение $\widetilde{y}^*$ целевой величины.

5. Последовательное перемещение симплекса, в процессе которого на каждом шаге происходит отбрасывание вершины симплекса с наихудшим значением целевой величины и реализация опыта в новой вершине. При этом направление перемещения центра симплекса колеблется около направления градиента.

6. Если при перемещении симплекса на протяжении $n + 1$ шагов та или иная вершина сохраняет свое положение, то симплекс совершает оборот вокруг этой вершины. Это означает что, в данной точке находится оптимум целевой функции, либо значение целевой функции в этой вершине определено неверно. Чтобы уточнить, какая ситуация имеет место, в этой точке вновь проводится эксперимент и в дальнейшем работают с новым значением целевой величины.

7. Если оказывается, что целевая величина в новой вершине симплекса меньше, чем в остальных вершинах, в соответствии с логикой движения следует возвратиться к предыдущему симплексу. Чтобы предотвратить «заикливание», в качестве отбрасываемой выбирают вершину с наименьшей (после наихудшей вершины симплекса) величиной целевой функции.

8. Если новая вершина выходит за пределы допустимой области планирования, следует поступать как в п. 7.

9. При достижении области оптимума размер симплекса уменьшают (как правило, на $\frac{1}{4}$ часть начальной величины).

10. Оптимум считается достигнутым, если одна и та же точка входит в последовательные симплексы N раз, где

$$N = 1,65 \cdot n + 0,005 \cdot n^2; \quad (6)$$
$$2 \leq n \leq 30 .$$

Выражение получено эмпирически. Другое достижение оптимума может быть получено из выражения:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} \frac{(\widetilde{y}^i - \widetilde{y}_m)^2}{n}} \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где ε – малая величина;

$\widetilde{y}_m$ – среднее значение целевых величин в вершинах симплекса.

2.2. Рабочий листок. Определение варьируемых параметров

В нашем случае в качестве целевой функции выбран максимальный эксергетический КПД ЭТК.

Вычисление параметров в результате каждого опыта удобно вести с помощью рабочего листка. Рабочий листок стандартизирован для числа факторов от 2 до 7. При необходимости его можно расширить. При меньшем

числе факторов используется часть листка. Вычисления ведут с помощью полоски бумаги, закрывающей строку, соответствующей отбрасываемой вершине. Тогда все оставшиеся числа в столбце надо сложить в строке (1). Освоение работы с рабочим листком рассмотрим на примере. В рассматриваемом примере наихудшая вершина № 1, следовательно, закрывается первая строка. Вычисления ведут для натуральных координат. Средний отклик используется для оценки близости к оптимуму.

Пример

В многочисленных задачах обработки металлов резанием постоянно возникает проблема выбора оптимальных режимов. Объектом исследования являлся процесс сверления сверлами диаметром 0,5 мм на станке. Обрабатываемый материал – сталь 45. Отклик (целевая функция) – стойкость сверла в минутах. Варьировались два фактора: число оборотов в минутах x_1 и подача в мм за оборот x_2 . Из технологических соображений были выбраны следующие нулевые уровни и шаги варьирования факторов:

$\widetilde{x}_1^0 = 3050$, $\Delta\widetilde{x}_1 = 1000$, $\widetilde{x}_2^0 = 00036$, $\Delta\widetilde{x}_2 = 0,0006$. Затем был выбран исходный симплекс, матрица представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица эксперимента

№ опыта	x_1	x_2	$\widetilde{x}_1$	$\widetilde{x}_2$
1	-1	-1	2050	0,003
2	+1	-1	4050	0,003
3	0	+0,73	3050	0,004

Построенное соответствие дает переход из кодированной системы координат в натуральную. Результаты опытов в выбранном режиме записывают в специальную таблицу 3, которая служит рабочим листком для вычисления координат отраженной точки.

Таблица 3 – Рабочий листок ПСМ (пример)

Координаты точек симплекса	№ опыта	$\widetilde{x}_1$	$\widetilde{x}_2$				
	1	1\2050	-1 0,003				13,7
	2	1\4050	-1 0,003				21,5
	3	1\3050	0,73 0,004				32,6
	4						
	5						
	6						
	7						
	8						

Окончание табл. 3

	№ опыта	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$				
Сумма оставленных координат (1)		7100	0,007				
Удвоенное среднее (2)=2·(1)/г		7100	0,007				
Координаты отбрасываемой вершины (3)		2050	0,003				
Координаты новой точки (2) - (3)		5050	0,004				
				Сумма откликов			67,8
				Средний отклик			22,6

Натуральные координаты нового симплекса (№ 2) и результаты опытов выглядят следующим образом:

№ опыта	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	у
2	4050	0,003	21,5
3	3050	0,004	32,6
4	5050	0,004	25,9

Поступая аналогично можно найти максимальный эксергетический КПД ЭТК. Достижение оптимума определяется по формулам (6) или (7).

2.3. Исходные данные к контрольной работе

Варьируемые факторы	№ задания (варианты)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. Производительность энерготехнологического комплекса (ЭТК) по раствору $\widetilde{x}_1^0$ в натуральных координатах на нулевом уровне, кг/с.	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Шаг варьирования расхода раствора, кг/с $\Delta\widetilde{x}_1$.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Минимальное значение расхода раствора в первичной матрице, кг/с, $\widetilde{x}_1^{min} = \widetilde{x}_1^0 - \Delta\widetilde{x}_1$.	49	53	57	61	65	69	71	77	81	85	89	93	97	101	105
Максимальное значение расхода раствора в первичной матрице, кг/с, $\widetilde{x}_1^{max} = \widetilde{x}_1^0 + \Delta\widetilde{x}_1$.	51	57	63	69	75	81	87	93	99	105	111	117	123	129	135
2. Реакционная температура на нулевом уровне в натуральных координатах, $\widetilde{x}_1^0$, °С.	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
Шаг варьирования температуры раствора, $\Delta\widetilde{x}_2$, град.	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75

Минимальное значение температуры раствора в первичной матрице, кг/с, $\widetilde{x}_2^{min} = \widetilde{x}_2^0 - \Delta\widetilde{x}_2$.	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215
Максимальное значение температуры раствора в первичной матрице, кг/с, $\widetilde{x}_2^{max} = \widetilde{x}_2^0 + \Delta\widetilde{x}_2$.	155	170	185	200	215	230	245	260	275	290	305	320	335	350	365
3. Время реакции на нулевом уровне в натуральных координатах, $\widetilde{x}_3^0$, с.	8000	7600	7200	6800	6400	6000	5600	5200	4800	4400	4000	3600	3200	2800	2400
Шаг варьирования времени реакции, $\Delta\widetilde{x}_3$, с.	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
Минимальное значение времени реакции в первичной матрице, с, $\widetilde{x}_3^{min} = \widetilde{x}_3^0 + \Delta\widetilde{x}_3$.	7900	7505	7110	6715	6320	5925	5530	5135	4740	4345	3950	3555	3160	2765	2370
Максимальное значение времени в первичной матрице, с, $\widetilde{x}_3^{max} = \widetilde{x}_3^0 + \Delta\widetilde{x}_3$.	8100	7695	7290	6885	6480	6075	5670	5265	4860	4455	4050	3645	3240	2835	2430
Эксергетический КПД энерготехнологического комплекса, %	70	72	73	75	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87

В качестве варьируемых переменных приняты: производительность ЭТК по раствору, кг/с, реакционная температура $^{\circ}\text{C}$, время реакции $\tau, ^{\circ}\text{C}$ с соответствующими шагами варьирования параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. – 2-е изд., доп. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 95 с.