

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы научных исследований и техника эксперимента»
для студентов направления подготовки 28.03.02
«Наноинженерия» (профиль «Инженерные нанотехнологии
в приборостроении») очной формы обучения

Воронеж 2018

УДК 001.89(07)
ББК 72я7

Составитель канд. техн. наук, доц. Г.И. Липатов

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы научных исследований и техника эксперимента» для студентов направления подготовки 28.03.02 «Наноинженерия» (профиль «Инженерные нанотехнологии в приборостроении») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Г.И. Липатов. Воронеж, 2018. 38 с.

В методических указаниях изложены необходимые теоретические сведения, содержание, варианты заданий и методика выполнения лабораторных работ «Математическая обработка экспериментальных данных», «Математические методы планирования эксперимента», «Оформление результатов НИР». Тематика лабораторных работ подобрана так, что дает практические навыки в планировании, обработке результатов и представлении экспериментальных исследований. Предназначены для студентов 1 курса, изучающих дисциплину «Основы научных исследований и техника эксперимента».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ ОНИ.pdf.

Ил. 7. Библиогр.: 26 назв.

УДК 001.89(07)
ББК 72я7

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н.Н. Кошелева

Издаётся по решению учебно-методического совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018

Лабораторная работа № 1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Цель работы: обучение студентов методике обработки результатов исследования.

1. Цель и задачи математической обработки экспериментальных данных. Виды ошибок

Грамотная обработка экспериментальных данных нередко дает возможность подтвердить реально существующие закономерности, зафиксированные в ходе эксперимента.

Обработка экспериментальных данных необходима:

- для оценки истинного значения измеряемой величины показателя;
- для оценки точности измерения величины показателя;
- для оценки сопоставления точности двух методов анализа или способов производства;
- для установления корреляционной и функциональной зависимостей.

Обработка экспериментальных данных проводится с использованием методов математической статистики.

Экспериментальные данные получают путем проведения *измерения величин показателей*. Никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Его результат всегда содержит *некоторую ошибку*. Следовательно, ошибки являются обязательным спутником любых измерений, и они числового *вносят ограничения в достоверность значения определяемой величины*. Определение ошибки измерения, погрешности метода анализа позволяет установить *правильность, точность и пригодность* анализа.

В экспериментальных исследованиях величину измеряемого показателя *оценивают прямыми и преимущественно косвенными методами*, в которых погрешность всегда выше, чем в прямых. Это связано с тем, что при косвенных методах необходимо проводить большее число аналитических операций, каждая из которых имеет свою погрешность.

В наибольшей степени на общую погрешность анализа влияют ошибки, имеющие место при отборе средней пробы, взвешивании, замере жидких продуктов и реактивов, извлечении какого-либо

компонента из исследуемого материала и т. д.

Виды ошибок измерения исследуемых величин.

Ошибки в эксперименте различаются:

по *характеру причин* — промахи, систематические и случайные,

по *способу вычисления* — абсолютные (например, средняя квадратичная ошибка) и относительные (например, коэффициент вариации).

В зависимости от способа вычисления для оценки случайных ошибок используют *среднеарифметическую, среднеквадратичную и соответствующую доверительную ошибку*.

В зависимости от характера оцениваемой величины ошибка может быть отнесена к единичному измерению, среднему нескольких параллельных определений, к серии однотипных измерений или к методу анализа в целом (ошибка метода).

Промахи (или *грубые ошибки*). В эксперименте такие ошибки появляются из-за небрежности или некомпетентности исследователя, невнимательности его в работе или плохого знания метода анализа. Для выявления таких ошибок необходимо повторить измерения. *Грубая ошибка должна быть обязательно исключена из экспериментальных данных.*

Систематические ошибки. Такие ошибки вызываются известными, постоянными причинами, их можно установить при детальном рассмотрении процедуры анализа. *Каждая систематическая ошибка анализа однозначна и постоянна по величине.* Ошибки могут быть вызваны конструктивными недостатками измерительной аппаратуры, неправильной подготовкой проб к анализу. Такие ошибки могут появиться из-за направленного изменения во времени влияния на процесс какого-либо неучтенного фактора (например, повышение температуры и влажности окружающего воздуха в течение времени, необходимого для проведения всех запланированных опытов эксперимента). Такие ошибки также должны быть *обнаружены и не допускаться далее в эксперименте.*

Случайные ошибки. В отличие от систематических ошибок они *не имеют видимой причины*. Они являются неопределенными по своей природе и величине. В появлении каждой случайной ошибки *не наблюдается какой-либо закономерности*. Общая случайная ошибка *непостоянна ни по величине, ни по знаку и не может быть исключена опытным путем*, но её можно вычислить с



Рис. 1. Причина появления случайной ошибки величин измерений в эксперименте

использованием методов математической статистики.

Возможность появления случайной ошибки видна на рис. 1.

Разность $X - \bar{X} = \Delta X$ является истинной абсолютной ошибкой, она является также случайной ошибкой (при условии исключения промахов и систематических ошибок).

В идеале выборочная совокупность в эксперименте, конечно, должна быть близка к генеральной совокупности. На практике она значительно отличается от неё. Принято считать, что *при количестве измерений 30 и более* выборочные данные максимально приближены к генеральным.

Округление данных эксперимента. При обработке результатов анализа необходимо все цифры математически обработать, *отбросить незначащие цифры — округлить данные анализа.*

В большинстве исследований (для решения практических задач) измерения и вычисления ведут с предельной относительной ошибкой порядка 1—5 %. В точных аналитических исследованиях ошибка возможна не более 0,5 %.

Ошибку измерения необходимо знать для того, чтобы правильно выбрать точность измерения. Например, если *относительная погрешность метода составляет 1 %*, то при взвешивании пробы в количестве 1 г можно ограничиться точностью 0,01, так как следующая цифра будет находиться за пределами точности метода.

Ошибка не должна содержать более двух значащих цифр. Среднее значение должно иметь такое же число десятичных знаков, как и ошибка. Например. *Содержание компонента в сплаве 72,564 %, а вычисленная ошибка 0,4542 %. Результат следует записать: 72,56+0,45.*

При анализе и расчете данных исследований могут получаться числа, имеющие четыре или даже пять знаков. Их следует округлять. Большие и малые числа удобно записывать в виде произведения числа на 10 в степени, обозначающей порядок величины. Так, например, $171=1,71 \cdot 10^2$; $17100=1,71 \cdot 10^4$; $0,0000171=1,71 \cdot 10^{-5}$.

Такой способ позволяет также фиксировать число значащих (верных) цифр. Если в числе 6280000 две значащие цифры, то следует записать так: $6,3 \cdot 10^6$, три — $6,28 \cdot 10^6$, четыре — $6,280 \cdot 10^6$. Число 0,000491 записывается $4,9 \cdot 10^{-4}$, если в нем две значащие цифры, и $4,91 \cdot 10^{-4}$, если три значащие цифры.

2. Расчет статистических величин

Математическая обработка результатов исследования включает расчет, как минимум, следующих статистических величин:

- средняя арифметическая — \bar{x} ;
- среднеквадратичное отклонение единичного результата —

$$s = \sqrt{s^2};$$

- стандартное отклонение среднеарифметической или ошибка средней арифметической из всех повторностей — $s\{\bar{x}\}$;

- достоверность средней арифметической — t ;
- доверительная ошибка оценки измеряемой величины — ξ .

Кроме того, при изучении исследователем влияния каких-либо факторов на параметр технологического процесса необходимо также устанавливать корреляционную и функциональную зависимость между ними.

Расчет вышеуказанных статистических величин ведется по следующим формулам.

Средняя арифметическая

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где x_i — значение единичного измерения величины; n — число повторностей измерений.

Среднеквадратичное отклонение

$$s = \sqrt{s^2},$$

где s^2 — дисперсия, равная

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

следовательно,

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

Величина s всегда положительная. Чем больше значение этой величины, тем больше изменчивость признака исследуемого объекта. Выражается величина s в тех же единицах измерения, что и средняя арифметическая. Величину s определяют с точностью на один десятичный знак больше точности, принятой в отношении средней арифметической.

Стандартное отклонение или среднеквадратичная ошибка оценки ошибка средней арифметической

$$s\{\bar{x}\} = s / \sqrt{n} \text{ при } n > 30;$$

$$s\{\bar{x}\} = s / \sqrt{n-1} \text{ при } n < 30.$$

Стандартное отклонение (ошибка средней арифметической) является именованной величиной и выражается так же, как и средняя арифметическая, для которой она вычислена. Величину средней и её ошибку принято записывать так: $\bar{x} + s\{\bar{x}\}$.

Чем меньше величина ошибки средней арифметической, следовательно, тем меньше расхождение между значениями параметра в выборочной и генеральной совокупности.

Ошибку средней арифметической можно выразить в относительных величинах — в процентах (%). В этом случае её называют *показателем точности средней арифметической* или *коэффициентом вариации* (v) и вычисляют по формуле

$$v = s\{\bar{x}\} / \bar{x} \cdot 100, \%$$

Чем меньше величина v , тем достовернее, надежнее полученная средняя арифметическая измеряемой величины показателя.

Доверительная ошибка и доверительный интервал. Для оценки точности проведенных исследований большое значение имеет доверительный интервал. Исследования считаются *достоверными*,

если результаты эксперимента *не выходят за пределы доверительного интервала*.

Этот интервал показывает, в каких пределах колеблется точная величина исследуемого показателя в сравнении с генеральным средним, т. е. истинные величины значения искомой величины X находятся в пределах $(\bar{X} \pm \Delta X)$:

$$\bar{X} - \Delta X \leq X \leq \bar{X} + \Delta X,$$

где \bar{X} — генеральное среднее значение; ΔX — доверительная ошибка.

Эти величины рассчитывают только после того, как в серии опытов останутся лишь достоверные результаты.

Истинное значение измеряемой величины с заданной доверительной вероятностью P должно лежать в пределах доверительного интервала $\bar{X} \pm \Delta X$.

Для определения доверительного интервала используется критерий Стьюдента $t(P; f)$:

$$t(P; f) = \left| \frac{\bar{x} - \bar{X}}{s} \right| \sqrt{n}.$$

Критерий $t(P; f)$ берется из таблиц в зависимости от заданной доверительной вероятности P или уровня значимости $\alpha=1-P$ и числа степеней свободы $f=n-1$ (см. табл. 1). Для выбора доверительной вероятности можно воспользоваться эмпирическим правилом:

в особо ответственных случаях $P=0,99$;

при обработке аналитических данных $P=0,95$;

при обработке данных технологического эксперимента $P=0,9$.

Доверительный интервал, в котором допустимо принятие гипотезы о равенстве генеральной средней \bar{X} величине \bar{x} с вероятностью $P=1-\alpha$, соответствует выполнению условия

$$P \left\{ \bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \bar{X} \leq \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n}} \right\} = 1 - \alpha.$$

Анализ однородности средних значений. В научно-исследовательской работе часто возникает необходимость сравнения эффективности методов исследования, способов производства или технологических процессов, различающихся либо какими-то условиями

(температура, давление, содержание в смеси какого-нибудь компонента, его концентрация и т. д.), либо аппаратным оформлением процесса.

Для обеспечения возможности такого сравнения по полученным результатам двух серий опытов измерений для изучаемых методов, способов или аппаратов рассчитывают среднее значение параметра (или выхода) каждой серии \bar{x}_A и \bar{x}_B . Если есть различия в значении параметра, то их средние отличаются друг от друга на величину:

$$\Delta\bar{x} = |\bar{x}_A - \bar{x}_B|.$$

Для достоверной оценки вывода следует для каждого метода или способа рассчитать доверительную ошибку, то есть ΔX_1 и ΔX_2 .

Если ΔX_1 будет меньше ΔX_2 , то можно с заданной вероятностью P говорить о большей отличительности, существенности значения, то есть эффективности первого метода исследования, способа или аппарата.

3. Установление корреляционной и функциональной зависимостей

Корреляционная зависимость. В задачу статистического анализа входит также выявление величины корреляционной связи и установление типа её.

Одним из основных коэффициентов, измеряющих связь между варьирующими признаками X и Y , является коэффициент корре-

Таблица 1
Значение критерия достоверности по Стьюденту

Число степеней свободы (f)	Уровень значимости (α) Уровень вероятности (P)		
	$\alpha=0,1$ $P=0,90$	$\alpha=0,05$ $P=0,95$	$\alpha=0,01$ $P=0,99$
1	6,31	12,71	63,66
2	2,92	4,30	9,92
3	2,35	3,18	5,84
4	2,13	2,78	4,60
5	2,02	2,57	4,03
6	1,94	2,45	3,71
7	1,89	2,37	3,50
8	1,86	2,31	3,36
9	1,83	2,26	3,25
10	1,81	2,23	3,17
11	1,79	2,20	3,11
12	1,78	2,18	3,06
13	1,77	2,16	3,01
14	1,76	2,15	2,98
15	1,75	2,13	2,95
16	1,74	2,12	2,92
17	1,74	2,11	2,90
18	1,73	2,10	2,88
19	1,73	2,09	2,86
20	1,72	2,09	2,85

ляции r , который находится в пределах от 0 до ± 1 .

при r близком к 0 (нулю) — отсутствует связь;

при $r = 0,2—0,3$ — малая связь;

при $r = 0,4—0,6$ — средняя связь;

при $r = 0,7—0,9$ связь считается сильной.

Знак минус или плюс у коэффициента корреляции r указывает на направление связи. Знак плюс означает, что связь между признаками X и Y прямая (*положительная*), знак минус — связь обратная (*отрицательная*).

Коэффициент корреляции выявляет величину и направление связи лишь тогда, когда связь между признаками близка к прямолинейной. Поэтому прежде чем вычислить коэффициент корреляции, необходимо установить, какой тип связи может быть между X и Y : близкий к прямолинейной или сильно выраженный криволинейный. Это достигается путем анализа литературных данных или нанесения опытных данных на график в координатах по X и Y .

Коэффициент корреляции рассчитывают по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i и \bar{x} — значение единичного результата и средней арифметической величины одного признака; y_i и \bar{y} — значение единичного результата и средней арифметической величины другого зависимого признака.

Установление функциональной зависимости. Влияние какого-либо фактора X на выход процесса Y выражается функциональной зависимостью или уравнением регрессии:

$$Y=f(X).$$

Наиболее часто встречающиеся в исследованиях виды функциональных зависимостей показаны на рис. 2.

Последовательность обработки полученных результатов исследования для установления зависимости и определения искомого уравнения регрессии следующие.

1) определение среднего значения результата (\bar{x} ; \bar{y}) для средней оценки дисперсии единичного $s^2(x_i; y_i)$ и среднего $s^2(\bar{x}; \bar{y})$ результатов.

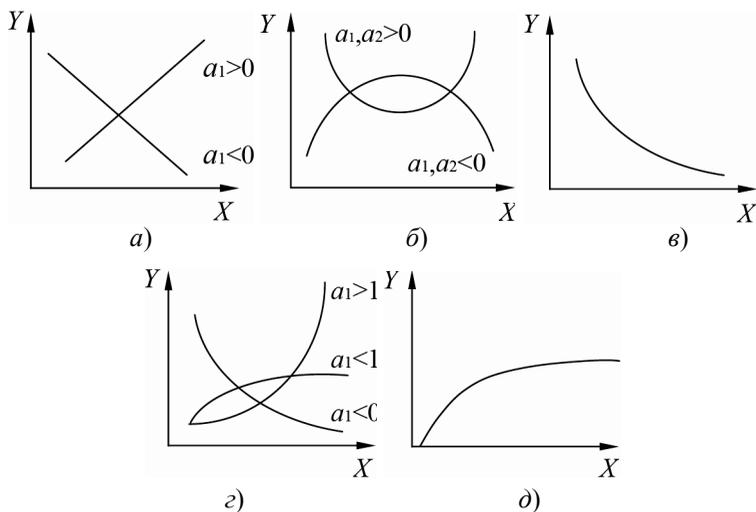


Рис. 2. Виды функциональных зависимостей: а) линейная $Y=a_0+a_1X$; б) параболическая $Y=a_0+a_1X_1+a_2X^2$; в) гиперболическая $Y=a_0+a_1/X$; г) степенная $Y=a_0X^{a_1}$; д) логарифмическая $Y=a_0\log X$

2) графическое представление данных эксперимента и установление того или иного вида искомого уравнения (линейное, квадратичное, степенное и т. д., см. рис. 2.).

3) определение коэффициентов искомого уравнения и проверка адекватности (соответствия) полученного уравнения экспериментальным данным, оценка точности аппроксимации (выполняется в пакете Excel).

Если уравнение недостаточно точно описывает экспериментальные данные, то следует выбрать другой вид уравнения, перейти к полиному более высокой степени.

Оценка точности аппроксимации. Точность аппроксимации оценивается для уравнения регрессии любого вида коэффициентом аппроксимации Δ (в процентах):

$$\Delta = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y(x_i)}{y_i} \right|.$$

Точность аппроксимации считается удовлетворительной, если $\Delta \leq 10\%$.

3. Практическое занятие по теме

Грамотная обработка экспериментальных данных нередко дает возможность подтвердить реально существующие закономерности, зафиксированные в ходе эксперимента.

Задание 1. Провести статистическую обработку результатов исследования с принятой доверительной вероятностью $P=0,90$ по данным табл. 2. Установить следующие статистические величины:

- среднюю арифметическую;
- среднеквадратичное отклонение единичного результата;
- стандартное отклонение среднеарифметической или ошибку средней арифметической;
- достоверность средней арифметической;
- доверительную ошибку оценки измеряемой величины.

Таблица 2

Результаты анализа массовой доли компонента в пробе вещества

№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8
МДК, %	3,75	3,76	3,84	3,65	3,78	3,91	3,82	3,84

Задание 2. Установить корреляционную и функциональную зависимости между варьирующими признаками X и Y (табл. 3).

Для выполнения задания

Таблица 3

студенту необходимо данные таблицы представить графически. Далее по графику установить направление корреляционной связи и вид функциональной зависимости.

x_i	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
y_i	3,1	3,3	3,3	4,6	4,8	5,1

Задание 3. С использованием табличного процессора EXCEL провести математическую обработку результатов исследований для ранее выполненных заданий 1 и 2. Представить распечатку.

4. Контрольные вопросы

1. Цель и задачи математической обработки результатов исследования.
2. Какие ошибки имеют место в измерении величин показателей эксперимента, назовите ошибки по характеру появления причин?
3. Укажите причины появления промахов и систематических ошибок, способы их устранения.

4. Укажите причины появления случайных ошибок, способы их устранения.

5. Назовите основные статистические величины, которые следует определять при обработке экспериментальных данных.

6. Цель установления корреляционной зависимости, по какому показателю она определяется, и какие значения может иметь данный показатель?

7. Назовите виды функциональной зависимости, что означает установить функциональную зависимость?

5. Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта соответствует номеру фамилии студента в журнале преподавателя.

Задание 1. Провести математическую обработку результатов измерений с вероятностью P , если в опыте было проведено восемь измерений и получены следующие результаты:

Вариант/ Вероятность	Номер измерения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1/0,95	3,8	3,7	3,82	3,83	3,78	3,90	3,92	3,84
2/0,90	73,1	74,8	73,3	73,0	74,6	74,6	73,4	73,3
3/0,95	86	87	84	88	87	86	88	89
4/0,90	0,80	0,90	0,86	0,93	0,92	0,88	0,88	0,90
5/0,95	79,6	79,4	80,0	80,2	80,4	80,4	80,5	81,0
6/0,90	3,20	3,15	3,18	3,24	3,30	3,20	3,30	3,25
7/0,95	3,20	3,16	3,19	3,24	3,30	3,40	3,50	3,25
8/0,90	79,4	79,6	80,0	80,4	80,5	80,1	80,3	80,2
9/0,90	3,75	3,76	3,84	3,65	3,78	3,91	3,82	3,84
10/0,95	0,90	0,85	0,93	0,94	0,87	0,88	0,92	0,84
11/0,90	3,60	3,63	3,53	3,63	3,58	3,65	3,70	3,60
12/0,95	150	150	152	146	148	147	153	150
13/0,95	5,30	5,00	5,40	4,90	4,90	5,30	5,00	5,20
14/0,90	65,0	65,4	65,2	65,2	64,6	64,8	65,4	64,1
15/0,90	25,0	24,5	24,8	25,3	25,5	25,0	24,6	25,2

Задание 2. Установить корреляционную и функциональную зависимости между величинами, если в опытах были получены следующие результаты:

Вариант 1	Значение фактора в натуральных величинах	1,0	1,3	2,2	2,6	3,3	3,6	5,3	6,0	
	Среднее значение параметра	-1,3	-2,2	-2,8	-3,2	-3,8	-4,4	-5,8	-6,5	
Вариант 2	Значение фактора в натуральных величинах	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Среднее значение параметра	19	21	23	28	33	46	60	63	78
Вариант 3	Значение фактора в натуральных величинах	5	10	15	20	25	30	35	60	
	Среднее значение параметра	71,5	75,5	77,1	78,0	78,2	78,3	78,4	78,5	
Вариант 4	Значение фактора в натуральных величинах	0	15	30	45	60	90	120		
	Среднее значение параметра	0	40	52	64	69	73	76		
Вариант 5	Значение фактора в натуральных величинах	73,0	74,0	75,0	76,0	77,0	78,0	79,0	80,0	81,0
	Среднее значение параметра	-2,9	-2,4	-5,0	-2,1	-1,8	-1,6	-1,5	-1,6	-1,4
Вариант 6	Значение фактора в натуральных величинах	16	23	26	28	30	36	40		
	Среднее значение параметра	0,35	0,57	0,61	0,69	0,75	0,81	0,94		
Вариант 7	Значение фактора в натуральных величинах	10	18	20	30	36	40	50	70	
	Среднее значение параметра	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,18	0,34	0,42	
Вариант 8	Значение фактора в натуральных величинах	0	73	85	95	103	115	130		

	Среднее значение параметра	0,71	0,49	0,43	0,39	0,37	0,35	0,21		
Вариант 9	Значение фактора в натуральных величинах	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	
	Среднее значение параметра	9,2	8,6	7,4	6,9	6,2	5,4	4,8	4,2	
Вариант 10	Значение фактора в натуральных величинах	5	10	15	20	25	30	45	60	
	Среднее значение параметра	73,0	76,5	82,0	82,2	82,3	82,3	82,5	82,5	
Вариант 11	Значение фактора в натуральных величинах	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	
	Среднее значение параметра	9,2	8,6	7,4	6,9	6,0	5,4	4,8	4,0	
Вариант 12	Значение фактора в натуральных величинах	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1			
	Среднее значение параметра	3,1	3,3	3,9	4,6	5,1	5,4			
Вариант 13	Значение фактора в натуральных величинах	1,0	1,6	2,2	2,6	3,6	4,2	5,5	6,0	
	Среднее значение параметра	-1,6	-2,2	-2,8	-3,1	-3,7	-4,3	-5,7	-5,9	
Вариант 14	Значение фактора в натуральных величинах	5	10	15	20	25	30	45	60	
	Среднее значение параметра	67,6	70,4	72,6	74,4	74,6	74,6	75,0	75,2	
Вариант 15	Значение фактора в натуральных величинах	10	15	20	25	35	40		65	
	Среднее значение параметра	0,28	0,28	0,26	0,18	0,05	0,05	0,06	0,25	

Лабораторная работа № 2
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель работы: изучить методику планирования и проведения эксперимента.

1. Задачи, решаемые в экспериментальных исследованиях

Назначение математического планирования эксперимента. Повышение качества и эффективности научных исследований невозможно без использования методов анализа и программных средств обработки экспериментальных данных. Это возможно за счет использования методов математического планирования эксперимента, сокращающих одновременно в большей степени трудоёмкость и стоимость самого исследования.

Математизация исследований предполагает, в первую очередь, получение математической модели исследуемого процесса, достаточно точно и адекватно его описывающей. При наличии такой модели возникает возможность дальнейшего исследования процесса заменить анализом его математической модели для получения решения конкретно поставленных задач.

В экспериментальных исследованиях обычно требуется решение интерполяционной или, чаще, оптимизационной задачи.

Интерполяционная задача — задача нахождения промежуточных значений величины интересующего выходного параметра (y) исследуемого процесса, объекта при изменении их входных параметров — факторов (X), т. е. установление зависимости вида $y=f(X)$.

Оптимизационная задача — задача нахождения такого сочетания величин факторов процесса или объекта, при котором обеспечивается оптимальное (максимальное или минимальное) значение интересующего исследователя выходного параметра процесса или объекта.

На процессы, с которыми приходится иметь дело специалисту, влияет множество факторов. Именно в многофакторных исследованиях, в ходе которых ведется поиск оптимальных решений, имеется наибольшая эффективность от применения методов математического планирования эксперимента.

Известно, что на выбор режимов выполнения технологических операций изготовления изделий электронной техники влияет

множество факторов. Поэтому провести исследование по установлению влияния сразу нескольких факторов на изучаемый параметр процесса и получить математическую модель процесса с учетом взаимовлияния на него всех принятых к исследованию факторов трудно, тем не менее, необходимо. Использование математических методов в таких экспериментальных исследованиях делает это возможным.

По теории математического планирования количество опытов в исследовании (N), которое необходимо провести при изменении ряда факторов и их уровней, определяется уравнением:

$$N=l^n,$$

где l — уровни изменения факторов; n — количество факторов, принятых к исследованию.

Например, если $l=4$ и $n=3$, то $N=64$, т. е. требуется поставить 64 опыта, а если $l=5$ и $n=4$, то $N=1024$, т. е. требуется поставить уже 1024 опыта.

Понятно, что для проведения такого огромного числа опытов потребуются значительное количество времени и средств.

Вот здесь и возникает необходимость использования математических методов планирования эксперимента, которые позволяют наиболее экономично и эффективно получить математические модели исследуемого процесса в реализованном диапазоне изменения многих факторов, влияющих на процесс.

Обычно к исследованию в одном эксперименте принимают не более четырех—пяти факторов.

Если необходимо исследовать большее число разнородных факторов, то проводят два и более эксперимента, группируя для каждого из них по возможности однородные факторы.

Например. Влияние состава среды и условий плазменной обработки (давление, температура, мощность, обрабатываемая площадь и т. п.) на скорость травления изучить одновременно в одном эксперименте невозможно, поэтому ставят два эксперимента. В рамках первого эксперимента определяется оптимальный состав среды, а затем в рамках второго эксперимента определяются оптимальные условия обработки.

Для полной реализации методов математического планирования в экспериментальных исследованиях необходимы знания теории вероятности, математической статистики, численных методов, математического программирования и умения работать в програм-

мах ПК, позволяющих математически описать исследуемый процесс и осуществить поиск оптимальных решений.

Этапы математического планирования эксперимента. В общем виде реализация теории математического планирования включает:

- сбор и анализ априорной (до опытной) информации об объекте;
- выбор входных и выходных переменных области экспериментирования;
- выбор математической модели, с помощью которой будут представляться экспериментальные данные (виды уравнений регрессии, графики и т. п.);
- выбор критерия оптимальности (если требуется по условию задачи исследования);
- выбор плана эксперимента;
- проведение эксперимента по выбранному плану;
- выбор метода анализа и обработки результатов эксперимента;
- обработку результатов исследования, интерпретацию, обсуждение и выводы.

2. Понятие входного и выходного параметра.

Параметр оптимизации

В постановке эксперимента с помощью математических методов применяются понятия *входные* и *выходные параметры* и связано это с тем, что теория математического планирования экспери-

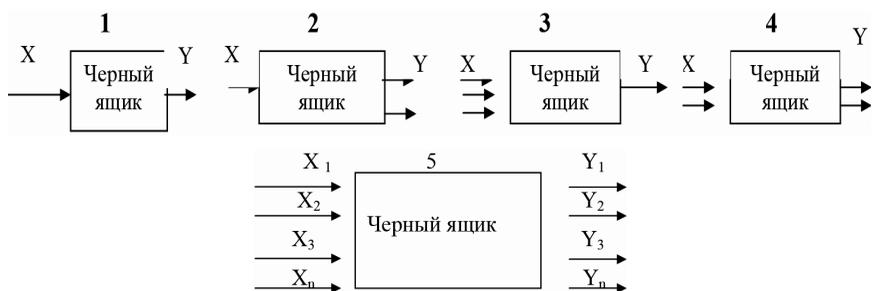


Рис. 1. Возможные схемы изучения объекта исследования: 1 — одноуровневый одномерный; 2 — одноуровневый двумерный (или многомерный); 3 — многоуровневый одномерный; 4 — двухуровневый двумерный; 5 — многоуровневый многомерный; X — входные (управляющие) параметры (факторы); Y — выходные параметры (параметры оптимизации)

мента базируется на кибернетическом представлении объекта исследования. При этом объект исследования представляется в виде «черного ящика», имеющего некоторое количество входов и выходов (рис. 1).

По теории математического планирования эксперимента объект исследования:

должен быть *управляемым*, т. е. допускать целенаправленное изменение уровней факторов в избранных исследователем пределах;

обладать свойством *воспроизводимости* результатов, то есть результаты измерения должны быть практически одинаковыми при повторном проведении (с ошибкой не более 2—5 %).

Выходной параметр (Y) — это *показатель, характеризующий результат исследуемого процесса, иногда его называют выходом процесса.*

Чаще в исследованиях выходной параметр, наиболее полно характеризующий результат исследуемого процесса, принято называть *критерием оптимальности* или *параметром оптимизации*. Он может выражаться *целевой функцией, критерием оптимальности, функцией отклика, поверхностью отклика.*

Основные требования, предъявляемые к параметру оптимизации. Он должен:

- быть количественным и выражаться одним числом;
- обладать физическим смыслом;
- быть глобально эффективным, т. е. значимым для достижения конечной цели;
- быть статистически эффективным, т. е. иметь малую дисперсию воспроизводимости и большой коэффициент вариации.

Параметрами оптимизации процессов при совершенствовании и разработке технологии молочных продуктов могут быть приняты — *качество продукта* (конкретные оценочные показатели), *его выход или расход сырья на единицу продукции, продолжительность процесса, себестоимость продукции и др.*

Входные параметры (X) — это те параметры, *которые по воле исследователя принимают различные значения (уровни) с целью изменения состояния исследуемого объекта.*

Исследователю в работе после выбора объекта изучения и параметра оптимизации необходимо рассмотреть все возможные факторы, которые могут влиять на изучаемый процесс. Первоначально

он определяется с факторами качественными. Ими являются технологические приемы, способы производства, оборудование. Затем исследователь определяется с количественными факторами — температурой, давлением, расход исходных веществ и др.

Поверхность отклика и уравнение регрессии. При математизации исследований изучение любой системы можно представить как отыскание функции многих переменных, т. е. исследование уравнения регрессии вида:

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где n — число исследуемых факторов.

Это уравнение описывает некоторую поверхность отклика, т. е. гиперповерхность в $(n+1)$ -мерном пространстве.

Изучение многофакторного процесса (или системы) можно представить как исследование формы этой поверхности — *поверхности отклика*.

Пространство, в котором строится поверхность отклика, называют *факторным пространством*.

В однофакторном эксперименте, когда $y=f(x_1)$, поверхность отклика — это линия на плоскости (рис. 2). Условие оптимума изучаемого процесса в эксперименте $x_1=x_{1\text{опт}}$.

В двухфакторном эксперименте, когда $y=f(x_1, x_2)$, поверхность отклика — кривые в трехмерном пространстве (рис. 3).

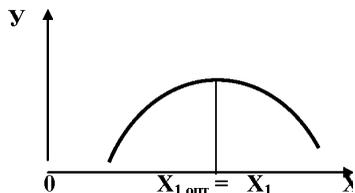


Рис. 2. Поверхность отклика в однофакторном эксперименте

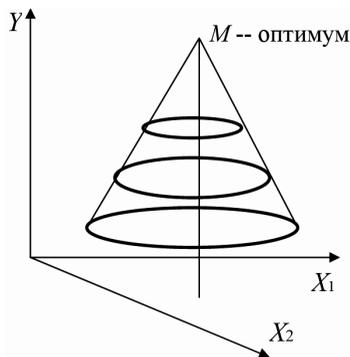


Рис. 3. Поверхность отклика в двухфакторном эксперименте

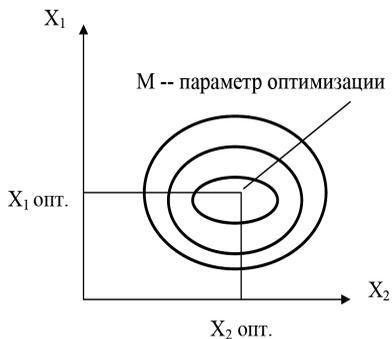


Рис. 4. Поверхность отклика для двухфакторного эксперимента в координатах x_1 и x_2

Если спроецировать установленные функции отклика (рис. 3) на плоскость координат исследуемых факторов (x_1 и x_2), то можно определить оптимальное значение параметра оптимизации M (рис. 4).

Поскольку первоначально истинный вид функции $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ неизвестен, то для описания поверхности отклика используют уравнения, представляющие собой разложение этой функции в степенной ряд, например, квадратичное уравнение:

$$y = b_0 + \sum b_{1i}x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij}x_i x_j + \sum b_{2i}x_i^2 + \dots,$$

где x_i, x_j — переменные факторы при $i=\overline{1, n}, j=\overline{1, n}, i \neq j$; $b_0, b_{1i}, b_{2i}, b_{ij}$ — коэффициенты регрессии при соответствующих переменных, значения которых определяют форму поверхности отклика, т. е. уравнения регрессии.

Наличие в уравнении переменных высших степеней x_i^2, y_j^2 характеризуют кривизну поверхности отклика. *Кривизна поверхности отклика исследуемого процесса тем больше, чем больше в уравнении регрессионных членов высших степеней, а значит и коэффициентов регрессии, которые необходимо определить в данном уравнении.*

3. Контрольные вопросы

1. Что предполагает математизация исследований в НИР, при решении каких задач она дает наибольший эффект?

2. Сущность интерполяционной задачи экспериментальных исследований.

3. Сущность оптимизационной задачи экспериментальных исследований.

4. Последовательность этапов математического планирования эксперимента.

5. Возможные схемы изучения объекта в исследованиях. Поясните их на примере исследований процессов в технологии изделий электронной техники.

6. Выходные параметры и параметры оптимизации для технологических исследований.

7. Какие требования предъявляются к исследуемому объекту при математическом планировании эксперимента?

8. Основные требования, предъявляемые к параметру оптимизации.

9. Какие различают факторы в эксперименте? Приведите их примеры из технологии изделий электронной техники.

4. Практическое занятие по теме

На технологические процессы производства изделий электронной техники, с которыми приходится иметь дело исследователю, влияет множество факторов. Для установления влияния каждого из выбранных факторов на интересующий показатель процесса требуется достаточно много материальных ресурсов, времени и труда исследователя.

Исследовать влияние на процесс сразу нескольких факторов и получить математическую модель процесса с учётом взаимовлияния на него всех принятых к исследованию факторов, что требуется в НИР, возможно при использовании математических методов планирования эксперимента.

Эффективность эксперимента во многом определяется выбором координат центра эксперимента и интервала варьирования факторов. Координаты центра должны соответствовать наилучшим из всех рекомендованных ранее условий протекания процесса.

Самым простым в планировании и проведении эксперимента является план полного факторного эксперимента — ПФЭ 2^n , в котором исследуемые факторы (n) изменяются лишь на двух уровнях: *верхнем и нижнем*.

Доступным в УИРС, НИРС и ВКР является план ПФЭ 2^2 или ПФЭ 2^3 , где степень 2 или 3 — количество факторов принятых, к исследованию.

Ниже рассматривается реализация плана ПФЭ 2^2 в исследовании по условию следующего задания.

Задание. Применяя для эксперимента план ПФЭ 2^2 математически описать технологическую операцию в производстве изделий электронной техники и установить адекватность уравнения регрессии, если в эксперименте выбраны значения входных факторов: x_1 — может варьироваться в диапазоне 18—26 условных единиц (у. е.); x_2 — 10—20 у. е. Исследуемый процесс оценивали по времени достижения результата — выполнения технологической операции (выходной параметр — y). Все опыты проведены в двух повторностях (m). Результаты опытов имели следующие значения:

1. $y_1=8,2$ мин; 7,8 мин; 2. $y_2=7,4$ мин; 7,6 мин;
3. $y_3=6,5$ мин; 6,7 мин.; 4. $y_4=5,4$ мин; 5,6 мин.

Выполнение

1. Строится план эксперимента в натуральных и кодированных значениях факторов (табл. 1).

По теории плана ПФЭ 2^2 исследуемые факторы изменяются лишь на двух уровнях: верхнем x_i^+ и нижнем x_i^- .

План эксперимента строится и проводится по правилу (см. табл. 1):

1-й опыт — нижнее значение по 1-му фактору и нижнее значение по 2-му фактору;

2-й опыт — нижнее значение по 1-му фактору и верхнее значение по 2-му фактору;

3-й опыт — верхнее значение по 1-му фактору и нижнее значение по 2-му фактору;

4-й опыт — верхнее значение по 1-му фактору и верхнее значение по 2-му фактору.

Среднее значение параметра (\bar{y}_k) вычисляется как среднее значение величины времени достижения результата в каждом опыте. Так, для 1-го опыта $\bar{y}_1=(8,2+7,8)/2=8,0$ (мин).

2. Для каждого фактора определяется центр эксперимента (x_{i0}) по формуле:

$$x_{i0}=(x_i^++x_i^-)/2.$$

Для 1-го фактора $x_{10}=(18+26)/2=22$ мин.

Таблица 1

План постановки и результаты эксперимента

№ опыта (k)	Значения факторов в натуральных величинах		Среднее значение параметра (\bar{y}_k), мин	Значения факторов в кодированных величинах			Среднее значение параметра (\bar{y}_k), мин
	x_1	x_2		X_1	X_2	X_1X_2	
1	18	10	8	-1	-1	+1	8
2	18	30	7,5	-1	+1	-1	7,5
3	26	10	6,6	+1	-1	-1	6,6
4	26	30	5,5	+1	+1	+1	5,5
x_{i0}	22	20					
Δx_{i0}	4	10					

Для 2-го фактора $x_{10}=(10+30)/2=20,0$ у. е.

3. Для каждого фактора определяется интервал варьирования (Δx_{i0}) по формуле:

$$\Delta x_{i0}=(x_i^+-x_i^-)/2=x_i^+-x_{i0}=x_{i0}-x_i^-.$$

Для 1-го фактора $\Delta x_{10}=(26-18)/2=4$ у. е. или $\Delta x_{10}=22-18=4$ у. е.

Для 2-го фактора $\Delta x_{20}=(30-10)/2=10$ у. е. или $\Delta x_{20}=20-10=10$ у. е.

4. Значения факторов в натуральных величинах выразить в их кодированных (безразмерных) величинах по формулам:

верхний уровень фактора (обозначается как X_i^+)

$$X_i^+ = (x_i^+ - x_{i0}) / \Delta x_{i0};$$

нижний уровень фактора обозначается (обозначается как X_i^-)

$$X_i^- = (x_i^- - x_{i0}) / \Delta x_{i0}.$$

Для 1-го фактора $X_1^+=(26-22)/4=+1$, $X_1^-=(18-22)/4=-1$.

Для 2-го фактора $X_2^+=(30-20)/10=+1$, $X_2^-=(10-20)/10=-1$.

Результаты расчета центра эксперимента и интервала варьирования по каждому фактору заносятся в табл. 1.

Область исследования факторов (рис. 5) графически представляется в виде прямоугольника в системе x_1Ox_2 (натуральная размерность) и в виде квадрата в системе X_1OX_2 (кодированное, безразмерное выражение величин факторов).

5. Для описания исследуемого процесса выбирается математическая модель (уравнение регрессии) и рассчитываются значения коэффициентов в уравнении.

По результатам двухфакторного эксперимента можно первоначально выбрать линейное уравнение регрессии, в котором помимо линейных коэффициентов будет коэффициент, учитывающий эффект парного взаимодействия:

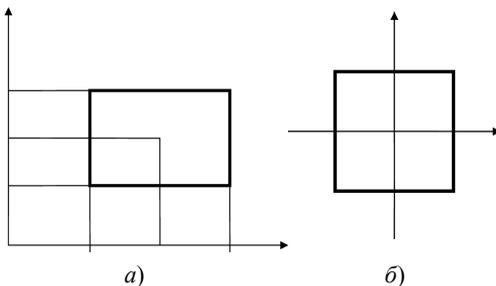


Рис. 5. Изображение плана ПФЭ 2^2 на плоскости: а — натуральная размерность факторов; б — безразмерное выражение величин факторов

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2.$$

По плану ПФЭ 2^2 количество коэффициентов в линейном уравнении регрессии должно быть равно количеству опытов ($N=4$), следовательно, должно быть представлено и рассчитано четыре коэффициента. По плану ПФЭ 2^3 в линейном уравнении регрессии должно быть представлено и рассчитано восемь коэффициентов.

Коэффициент b_0 , характеризующий средний выход процесса, рассчитывается по формуле:

$$b_0 = \sum_{k=1}^N y_k / N.$$

Коэффициенты b_i или b_1, b_2 в линейном уравнении регрессии рассчитываются по формуле:

$$b_i = \sum_{k=1}^N y_k X_{ik} / N; (i = \overline{1, n})$$

и коэффициенты b_{ij} или b_{12} в линейном уравнении регрессии — по формуле:

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^N y_k X_{ik} X_{jk} / N; (i \neq j; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}).$$

По данным эксперимента (табл. 1) для расчета значения коэффициента a_0 суммируется значение Y по каждому опыту:

$$b_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} = \frac{8,0 + 7,5 + 6,6 + 5,5}{4} = 6,9.$$

Для расчета коэффициента b_1 значение y по каждому опыту умножается на кодированную величину фактора X_1 со знаком (+ или -).

$$b_1 = \frac{y_1(-1) + y_2(-1) + y_3(+1) + y_4(+1)}{4} = \frac{-8,0 - 7,5 + 6,6 + 5,5}{4} = -0,85.$$

Для расчета коэффициента b_2 значение y по каждому опыту умножается соответственно на кодированную величину X_2 также со знаками (+ или -).

$$b_2 = \frac{y_1(-1) + y_2(+1) + y_3(-1) + y_4(+1)}{4} = \frac{-8,0 + 7,5 - 6,6 + 5,5}{4} = -0,40.$$

Для расчета коэффициента b_{12} значение y по каждому опыту

умножается соответственно на кодированную величину межфакторного влияния X_1X_2 также со знаками (+ или -):

$$b_{12} = \frac{y_1(+1) + y_2(-1) + y_3(-1) + y_4(+1)}{4} = \frac{8,0 - 7,5 - 6,6 + 5,5}{4} = -0,15.$$

Таким образом, на основании результатов эксперимента исследуемая технологическая операция процесса изготовления изделия электронной техники описывается уравнением:

$$y = 6,9 - 0,85X_1 - 0,40X_2 - 0,15X_1X_2.$$

6. Прежде чем перейти к проверке значимости коэффициентов в полученном уравнении и его достоверности, исследователю следует предварительно проанализировать полученную закономерность по знаку при факторах (X_1 , X_2 и X_1X_2) и значения коэффициентов при них с тем, чтобы убедиться о ранее известной закономерности влияния таких факторов на изучаемый параметр исследуемого процесса.

Так, анализ полученного уравнения позволяет исследователю предварительно сделать следующие выводы:

1) повышение факторов X_1 и X_2 приводит к сокращению времени выполнения технологической операции, о чем свидетельствует знак минус (-) при этих факторах.

2) фактор X_1 более существенно влияет на время выполнения технологической операции, чем фактор X_2 , о чем свидетельствует значение коэффициента при факторе X_1 , равное 0,85, и факторе X_2 — 0,40.

Эти выводы хорошо согласуются с ранее известными закономерностями процесса выполнения технологической операции.

В то же время коэффициент при совместном влиянии факторов (X_1X_2), равный 0,15, может насторожить исследователя, так как значение его меньше, чем при факторах X_1 (0,85) и X_2 (0,40).

Это возможно по двум причинам: во-первых, могла вкратиться арифметическая ошибка в расчетах коэффициента, во-вторых, скажется неточность в результатах эксперимента. Для устранения первой причины следует внимательно повторно провести расчет этого коэффициента, обратив внимание на знаки при межфакторном взаимодействии факторов X_1X_2 , и y_k всех четырех опытов. Для обнаружения второй причины обязательно требуется проверка значимости коэффициентов в уравнении и его достоверность.

7. Выполняется проверка значимости коэффициента (b_i) в полученной зависимости по следующему условию. Если $|b_i| > \Delta_{b_i}$, то оценка коэффициента (b_i) значимо отличается от нуля, т. е. коэффициент значимый и он остается в уравнении.

Доверительная ошибка Δ_{b_i} рассчитывается по уравнению

$$\Delta_{b_i} = t(P; f) s(b_i).$$

где t — критерий Стьюдента как функция от P и f ; P — заданный уровень вероятности, обычно 0,95 или 0,90; f — число степеней свободы, равное числу измерений n минус 1 ($n-1$); $s(b_i)$ — стандартное отклонение.

Для определения величины стандартного отклонения, рассчитываемой как корень квадратный из дисперсии $s^2(b_i)$, требуется провести ряд расчетов.

7.1. Определить построчную оценку дисперсии воспроизводимости единичного результата измерения в каждом опыте:

$$s^2(y_{kl}) = \frac{1}{m_k - 1} \sum_{l=1}^{m_k} (y_{kl} - \bar{y}_k)^2,$$

где y_{kl} — единичный результат измерения величины в каждом опыте (k) и его повторности (m); \bar{y}_k — средний результат измерения величины в каждом опыте (k) и его повторности (m).

7.2. Определить среднюю для всего эксперимента дисперсию воспроизводимости единичного результата при $m_k = \text{const}$:

$$s^2(y_l) = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{m_k} (y_{kl} - \bar{y}_k)^2,$$

где N — количество опытов в эксперименте; m — число повторностей измерения величины в каждом опыте.

7.3. Рассчитать среднюю для всего эксперимента дисперсию воспроизводимости среднего значения выхода, которая в каждой строке будет в m раз меньше дисперсии $s^2(y_l)$

$$s^2(\bar{y}) = \frac{s^2(y_l)}{m}.$$

7.4. Рассчитать дисперсию среднего по каждому определяемому коэффициенту уравнения:

Промежуточные значения обработки данных эксперимента

Номер опыта (k)	$ y_{k1} - \bar{y}_k $	$ y_{k2} - \bar{y}_k $	$(y_{k1} - \bar{y}_k)^2$	$(y_{k2} - \bar{y}_k)^2$	$\sum_{i=1}^n (y_{ki} - \bar{y}_k)^2$	$s^2(y_{ki})$
1	2	3	4	5	6	7
1	7,8-8=0,2	8,2-8=0,2	0,04	0,04	0,08	0,08
2	7,4-7,5=0,1	7,6-7,5=0,1	0,01	0,01	0,02	0,02
3	6,5-6,6=0,1	6,7-6,6=0,1	0,01	0,01	0,02	0,02
4	5,4-5,5=0,1	5,6-5,5=0,1	0,01	0,01	0,02	0,02
Итого						0,14

Примечание. Так как в рассматриваемом задании количество повторностей каждого опыта равно 2, то в формуле для $s^2(y_{ki})$ знаменатель равен 1 и числа в графе 7 равны числам графы 6.

$$s^2(b_i) = \frac{s^2(\bar{y})}{N}.$$

7.5. Определить *стандартное отклонение*:

$$s(b_i) = \sqrt{s^2(b_i)}.$$

Для облегчения расчетов целесообразно промежуточные значения представить в виде табл. 2.

Далее расчет требуемых величин ведется по сумме значений величин графы 7 (0,14).

7.6. *Средняя для всего эксперимента оценка дисперсии воспроизводимости единичного результата*

$$s^2(y_l) = \frac{0,14}{4(2-1)} = 0,035.$$

7.7. *Средняя для всего эксперимента дисперсия воспроизводимости среднего значения выхода*

$$s^2(\bar{y}) = \frac{0,035}{2} = 0,0175.$$

7.8. *Дисперсия среднего по каждому определяемому коэффициенту уравнения*

$$s^2(b_i) = \frac{0,0175}{4} = 0,0044.$$

7.9. Стандартное отклонение

$$s(b_i) = \sqrt{0,0044} = 0,066.$$

7.10. Для рассматриваемого примера $P=0,95$, $f=(8-1)=7$, поэтому критерий Стьюдента $t(0,95; 7)=2,37$ и *доверительная ошибка* $\Delta b_i=2,37 \cdot 0,066=0,156$.

7.11. Значения величин всех коэффициентов в полученном уравнении сравниваются с рассчитанной величиной доверительной ошибки (0,156).

$$y=6,9-0,85X_1-0,40X_2-0,15X_1X_2$$

$|b_0|=6,9$ больше 0,156 — коэффициент значимый,
 $|b_1|=0,85$ больше 0,156 — коэффициент значимый,
 $|b_2|=0,40$ больше 0,156 — коэффициент значимый,
 $|b_{12}|=0,15$ меньше 0,156 — коэффициент не значимый и он исключается из уравнения.

Таким образом, полученное уравнение после проверки значимости коэффициентов будет иметь вид:

$$y = 6,9 - 0,85X_1 - 0,40X_2.$$

8. По теории математического планирования эксперимента, *если число значимых коэффициентов хотя бы на единицу меньше числа опытов, то появляется необходимость (и возможность) статистической проверки адекватности уравнения экспериментальным данным*. Эта проверка осуществляется по критерию Фишера, но предварительно выполняются следующие действия:

1) рассчитывают выход y для каждого варианта опыта по полученному уравнению, в котором исключены незначимые члены;

2) находят разности $y_k - \bar{y}_k$;

3) рассчитывают дисперсию неадекватности по формуле

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{N - N'} \sum_{k=1}^N |y_k - \bar{y}_k|;$$

где N' — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

4) рассчитывают F -отношение по формуле

$$F = s_{\text{ад}}^2 / s^2(\bar{y});$$

5) сравнивают полученное значение F -отношения со значени-

Таблица 3

Значение критерия Фишера F_T для уровня значимости $\alpha=0,05$

Число степеней свободы знаменателя f_2	Число степеней свободы числителя f_1			
	1	2	3	4
1	161,4	199,5	215,7	224,6
2	18,5	19,0	19,2	19,3
3	10,1	9,6	9,3	9,1
4	7,7	6,9	6,6	6,4
5	6,6	5,8	5,4	5,2
6	6,0	5,1	4,8	4,5

сии воспроизводимости *среднего* $s^2(y)$.

Если $F > F_T$, то уравнение неадекватно описывает экспериментальные данные, так как точность описания процесса данным уравнением значимо ниже той точности, с которой получены экспериментальные результаты. Такое уравнение не может служить хорошей основой для поиска оптимальных условий. В подобной ситуации исследователь должен найти ответ на вопрос о причинах получения недостаточно точного уравнения процесса. Наиболее часто встречающаяся причина — арифметические ошибки. Чтобы убедиться в отсутствии таких ошибок, рекомендуется по уравнению, в котором оставлены все, в том числе и незначимые, коэффициенты (число коэффициентов должно быть равно числу опытов), рассчитать выход процесса при условии двух—трех опытов плана. Если полученные результаты y_k в пределах точности округления будут совпадать с экспериментальными данными \bar{y}_k , то арифметической ошибки нет.

9. Для проверки адекватности уравнения $y=6,9-0,85X_1-0,40X_2$ по критерию Фишера предварительно выполняются действия.

9.1. Находят выход y_k для каждого опыта по данному уравнению с учетом значений кодированных величин факторов в каждом опыте (см. табл. 1):

для 1-го опыта $y_1=6,9-0,85(-1)-0,40(-1)=6,9+0,85+0,40=8,15$;

для 2-го опыта $y_2=6,9-0,85(-1)-0,40(+1)=6,9+0,85-0,40=7,35$;

для 3-го опыта $y_3=6,9-0,85(+1)-0,40(-1)=6,9-0,85+0,40=6,45$;

для 4-го опыта $y_4=6,9-0,85(+1)-0,40(+1)=6,9-0,85-0,40=5,65$.

ем Фишера (табл. 3).

В таблице критерий Фишера дан в табличного $F_T(P; f_1; f_2)$ критерия зависимости от числа степеней свободы $f_1=N-N'$ при определении дисперсии неадекватности и $f_2=N(m-1)$ при определении средней дисперсии воспроизводимости *единичного измерения* $s^2(y_i)$, равного числу степеней свободы в определении средней диспер-

9.2. Находят разности $|y_k - \bar{y}_k|$:

для 1-го опыта $|8,15 - 8,0| = 0,15$;

для 2-го опыта $|7,35 - 7,5| = 0,15$;

для 3-го опыта $|6,45 - 6,6| = 0,15$;

для 4-го опыта $|5,65 - 5,5| = 0,15$.

9.3. Рассчитывают дисперсию неадекватности:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{0,15^2 + 0,15^2 + 0,15^2 + 0,15^2}{4 - 3} = \frac{0,09}{1} = 0,09.$$

9.4. Рассчитывают критерий Фишера:

$$F = \frac{0,09}{0,0175} = 5,14.$$

9.5. Сравнивают значение F со значением $F_T(P; f_1; f_2)$ критерия Фишера из табл. 3. Из табл. 3 при $f_1 = N - N - 4 - 3 = 1$; $f_2 = N(m - 1) = 4(2 - 1) = 4$ и уровне вероятности 0,95 (или значимости $\alpha = 1 - P = 1 - 0,95 = 0,05$) критерий Фишера $F_T(0,95; 1; 4)$ имеет значение, равное 7,7.

Результат сравнения табличного значения критерия Фишера $F_T(7,7)$ с рассчитанным критерием $F(5,14)$ удовлетворяет неравенству $F < F_T$. На этом основании с вероятностью 0,95 делается вывод, что уравнение $y = 6,9 - 0,85X_1 - 0,40X_2$ адекватно описывает экспериментальные данные и может служить хорошей основой для поиска оптимальных значений факторов исследуемого процесса.

5. Контрольные вопросы

1. Сущность плана ПФЭ 2^2 и принципы его построения.
2. Как определяется центр эксперимента и интервал варьирования факторов?
3. Как перевести натуральные значения факторов в кодированные (безразмерные) величины?
4. Как рассчитывается в уравнении регрессии коэффициент, характеризующий средний выход процесса?
5. Как рассчитывается в уравнении регрессии коэффициент, характеризующий степень влияния фактора на выход процесса?
6. По какому условию проверяется значимость коэффициентов в уравнении регрессии?
7. В каком случае и как устанавливается адекватность уравнения регрессии?

6. Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта соответствует номеру фамилии студента в журнале преподавателя.

Из представленных ниже вариантов выполнить два задания.

Задание 1. Указать факторы и их уровни, а также параметры оптимизации при исследовании процесса:

1. Термического окисления кремния;
2. Химико-механического полирования;
3. Химического осаждения из газовой фазы;
4. Жидкостного травления;
5. Плазмохимического травления;
6. Реактивно-ионного травления;
7. Ионно-лучевого травления;
8. Вакуум-термического осаждения;
9. Магнетронного распыления;
10. Нанесения фоторезиста;
11. Экспонирования фоторезиста;
12. Диффузионного легирования;
13. Ионной имплантации;
14. Ультразвуковой сварки;
15. Термокомпрессионной сварки.

Задание 2. Применяя для эксперимента план ПФЭ 2^2 математически описать процесс, представленный результатами в табл. 4, и установить адекватность уравнения регрессии при выбранных значениях входных факторов. Все эксперименты проводились в двух повторностях.

Таблица 4

Вариант	Значения входных факторов		Результаты экспериментов							
	x_1	x_2	y_1		y_2		y_3		y_4	
1	18—24	10—40	8,0	7,8	7,4	7,2	6,6	6,4	5,4	5,2
2	16—22	1—10	10,2	10,8	8,4	8,8	7,1	7,3	6,4	6,2
3	32—36	1,5—3,5	50	48	40	36	32	30	29	27
4	12—70	17—25	0,1	0,08	0,04	0,04	0,08	0,08	0,06	0,04
5	70—98	5—20	98	97,6	98,8	98,6	99,2	99,4	99,8	99,9
6	28—36	1—10	58	56	65	67	70	72	79	77
7	26—38	3—10	78	76	74	73	68	70	66	68
8	40—70	10—18	2,0	2,2	2,4	2,6	3,4	3,2	2,6	2,8

Вариант	Значения входных факторов		Результаты экспериментов							
	x_1	x_2	y_1		y_2		y_3		y_4	
9	28—36	1—3,0	42	45	36	38	32	29	26	28
10	65—80	36—50	78	76	70	72	64	66	80	78
11	19—25	0,2—1,0	7,2	7,4	6,4	6,6	5,8	5,6	5,4	5,6
12	32—46	0,1—0,8	6,2	6,4	5,4	5,6	4,9	5,0	4,4	4,6
13	28—36	1—5	76	79	70	72	65	67	58	56
14	60—80	32—42	78	76	74	72	68	66	78	80
15	10—40	1,5—3,5	5,0	4,5	4,2	4,0	3,5	4,0	3,0	3,5

Лабораторная работа № 3

ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР

В какой бы конкретной области ни проводились исследования, им присущи некоторые общие черты, а именно компоненты исследования, которые можно сформулировать так

1. Постановка задачи, проблемы.
2. Предварительный анализ имеющейся информации, условий и методов решений задач данного класса.
3. Выдвижение гипотез, новых научных и технических решений.
4. Планирование и организация натурального или теоретического эксперимента.
5. Проведение эксперимента.
6. Анализ и обобщение полученных результатов.
7. Проверка исходных гипотез на основе полученных фактов.
8. Окончательная формулировка новых фактов и законов. Получение объяснений и прогнозов.

Это, разумеется, лишь общая схема исследований, которая может в той или иной мере видоизменяться в зависимости от имеющихся исходных данных и от конкретных целей исследования.

Заключительным этапом любого прикладного исследования должно быть внедрение в производство полученных результатов.

При письменном (литературном) оформлении научной работы начинающий исследователь должен учесть ряд моментов.

Прежде всего, данные, полученные в эксперименте, необхо-

димо сначала осмыслить, глубоко оценить их теоретическое значение и практическую ценность. Далее необходимо оценить прочитанную литературу и критически сопоставить литературные данные и собственные результаты, вдумчиво рассмотреть материалы сопоставления, чтобы получить ответ на вопрос: «Что нового сделано исследователем в результате проведенной работы?»

Любая выполненная НИР должна содержать три основные части: теоретическую, экспериментальную и экономическую. Материал этих частей должен быть представлен в отчете. Изложение материала по указанным частям при написании научной работы (отчета, дипломной работы, отчета по УИРС, статьи) представляется в следующем виде.

<i>Разделы</i>	<i>Возможный объём, %</i>
Введение	
1. Литературный обзор (или Состояние вопроса)	25
1.1.....	
1.2.....	
1.3.....	
1.4. Заключение, цель и задачи.	
<i>В параграфах 1.1, 1.2, 1.3 раскрывается теоретический (литературный) материал по выбранным задачам собственного исследования.</i>	
2. Постановка работы и методы исследований	10
2.1. Методика работы	
2.2. Методы анализа	
2.3. Математическая обработка результатов	
3. Результаты исследования и их обсуждение	55
3.1.	
3.2.	
3.3.	
<i>Формулировка параграфов 3.1, 3.2, 3.3 практически всегда соответствует задачам исследования, указанным в литературном обзоре.</i>	
4. Экономическая часть	10
Заключение (или Выводы)	

Библиография (или Список использованных источников).

Приложения

Краткая характеристика разделов.

Введение — это довольно трудная часть работы при написании отчета.

Здесь вначале показываются основные задачи, стоящие перед той отраслью или областью науки, которой исследователь занимается. Далее обосновывается необходимость проведения данной НИР, то есть дается ответ на вопрос: почему он занялся этой темой, чем вызвано выполнение таких исследований и, таким образом, обосновывается актуальность темы.

Глава 1. Литературный обзор. *Написание обзора по теме — сложная, трудоёмкая работа.*

Основная задача обзора литературы — дать читателю, (оппоненту) более полное представление о состоянии вопроса или вопросов, затрагиваемых темой. Автор обзора должен выбрать информацию из литературных источников и представить её так, чтобы читатель сумел легко установить — какие вопросы получили отражение в литературе, какие из них нашли частичное отражение в литературе, какие из вопросов по тем или иным причинам неправильно разрешены или вовсе не привлекли внимание ученых.

На основании этого для читателя обзора (*оппоненту работы*) должны быть очевидны, не только необходимость проведения дальнейших исследований, но и направления их.

Следовательно, если во введении читатель, доверяя автору, согласился с тем, что тема актуальна, то на основании данных обзора литературы он должен лично убедиться в этом.

В литературном обзоре автору (студенту-исследователю) необходимо показать взгляды других авторов (исследователей), изучавших тот или иной вопрос данной проблемы или данного направления.

Примеры.

1. Ряд авторов [Петров И.О., 1985, Остроумов Л.А., 1991] показали, что

(указываются Ф.И.О. ученых, на результаты которых автор-исследователь ссылается в литературном обзоре).

2. В литературе [1, 6, 9] имеются сведения, что

(указывается ссылка на использованный источник информации, соответствующий номеру 1, 6, 9 в списке использованной литературы).

В литературном обзоре автор-исследователь обязательно должен выразить своё отношение к рассматриваемому вопросу и показать свои взгляды на вопросы, высказать своё мнение.

В конце литературного обзора необходимо сделать краткое заключение, в котором со строгой научной объективностью автор-исследователь должен показать все положительное, что было сделано его предшественниками, какие были недостатки, какие вопросы остались неразрешенными, каковы пути их решения и, наконец, обосновать направление собственного исследования, указав его цель и задачи.

Глава 2. Постановка работы и методы исследования

Содержание данной главы:

1. Дается характеристика изучаемого объекта.
2. Описываются условия постановки эксперимента. Постановка эксперимента может быть представлена в виде схемы (рисунка).
3. Отражаются и обосновываются выбранные методы анализа оценочных показателей (при использовании стандартных методов дается ссылка на ГОСТы, для новых модернизированных методов приводится их пропись).
4. Указывается повторность проведения опытов.
5. Указывается метод обработки экспериментальных данных.

Таким образом, содержание этого раздела должно убедить читателя в том, что, несмотря на большое количество существующих методик и методов, избранная автором методика постановки эксперимента и методы анализа в наибольшей степени соответствуют цели исследования.

Глава 3. Результаты исследований и их обсуждение

Основным требованием к изложению материала в этом разделе является логическая преемственность содержания параграфов: содержание каждого последующего параграфа должно вытекать из предыдущего (то есть последующий параграф является как бы продолжением предыдущего).

Результаты исследования в этом разделе представляются в виде таблиц, графиков, уравнений, диаграмм и дается разъяснение, пояснение и обсуждение представленных в них результатов.

Глава 4. Экономическая часть

Она предусматривает расчет экономической эффективности от внедрения результатов работы, либо расчет цены на продукт от внедрения предлагаемой технологии.

Выводы — самая ответственная часть любого исследования.

Основным требованием, предъявляемым к выводу, является, прежде всего, его обоснованность. Вывод должен вытекать из результатов проведенного исследования, он должен базироваться на фактах, а не на умозрительных построениях автора.

Вывод выполненной НИР должен отвечать запросам теории или практики, или тому или другому одновременно.

Таким образом, приступая к формулированию выводов, автор должен, прежде всего, ответить на вопрос — Какое теоретическое и практическое значение имеют факты, полученные в результате исследования?

Ответы на этот вопрос действительно будут выводами, о которых можно говорить, спорить и которые можно подвергать проверке. Особенность любого вывода — это то, что из фактов, полученных в результате исследования, должна вытекать какая-то закономерность.

Примеры формулирования начала выводов. Установлено, что; Выявлено, что; Показано, что, Рассчитано, что от внедрения

Библиография (или Список использованной литературы)

Составить его нетрудно, если автор располагает картотекой или ведет журнал регистрации использованной литературы. В список литературы отчета, ВКР вносят те работы, которые имеют непосредственное отношение к работе (к данной теме исследования). Нередко студенты в своих научных работах в тексте упоминают работу исследователей, а в списке её не приводят или наоборот. Чтобы избежать таких недостатков, следует в тексте ставить такой номер, под которым значится ФИО автора в списке литературы. Например. В тексте литературного обзора записано: По мнению Ю.П. Адлера [3] ..., следовательно, в списке литературы цитируемый источник давать под номером **3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер. — М.: Наука, 1976. — 979 с.**

Приложения

В них можно представить:

- исходные результаты исследований, которые подвергнуты математической обработке, например, в пакете Excel;
- акт промышленных испытаний;
- проекты разработанной нормативной документации на продукцию;
- дать теоретические выкладки необходимости математической обработки результатов исследований, то есть указать цель и задачи математической обработки;
- показать статистические величины и формулы их расчета;
- раскрыть необходимость определения корреляционной и функциональной зависимостей и привести формулу расчета коэффициента корреляции;
- выполнить расчеты по заданию в пакете Excel и представить результаты в распечатанном виде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер. — М.: Наука, 1976. — 979 с.
2. Андреев Г.И. Основы научной работы и оформления результатов научной деятельности/ Г.И. Андреев. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 269 с.
3. Ахназарова С.П. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии/ С.П. Ахназарова, В.В. Кафаров. — М.: Высш. шк., 1978. — 319 с.
4. Бабуров Э.Ф. Основы научных исследований/ Э.Ф. Бабуров, Э.Л. Куликов, В.К. Мыригодов. — Киев: Вища шк., 1988. — 230 с.
5. Батищев Д.И. Поисковые методы оптимального проектирования/ Д.И. Батищев. — М.: Сов. радио, 1975. — 216 с.
6. Винарский М.С., Планирование эксперимента в технологических исследованиях/ М.С. Винарский, М.В. Лурье. — Киев: Техника, 1975. — 168 с.
7. Гаскаров Д.В. Оптимизация технологических процессов в производстве электронных приборов/ Д.В. Гаскаров, А.А. Дахнович. — М.: Высш. шк., 1986. — 191 с.
8. Грушко И.М. Основы научных исследований/ И.М. Глуш-

ко, В.М. Сиденко. — Киев: Вища шк., 1983. — 224 с.

9. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Т.1./ Н. Дрейпер, Т. Смит. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 366 с.

10. Космин В.В. Основы научных исследований (Общий курс) / В.В. Космин. — М.: РИОР:ИНФА-М, 2017. — 227 с.

11. Кузнецов И.Н. Рефераты, курсовые и дипломные работы: методика подготовки и оформления/ И.Н. Кузнецов. — М.: Дашков и К, 2004. — 352 с.

12. Лавренчик В.Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка результатов/ В.Н. Лавренчик. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 272 с.

13. Методические указания по математической обработке результатов исследования с использованием табличного процессора EXCEL/ Сост. Т.Е. Кокшарова, Ц.Ц. Цыдыпов. — Улан-Удэ: Вост.-Сиб. гос. технолог. ун-т, 2002. — 40 с.

14. Налимов В.В. Теория эксперимента/ В.В. Налимов. — М.: Наука, 1971. — 208 с.

15. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов/ В.В. Налимов, Н.А Чернова. — М.: Наука, 1965. — 340 с.

16. Научные работы: методика подготовки и оформления/ И.Н. Кузнецов. — Минск: Амалфея, 2000. — 544 с.

17. Обработка экспериментальных данных в MS Excel: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов дневной формы обучения/ Сост. Е.Г. Агапова, Е.А. Битехтина. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. — 32 с.

18. Основы научных исследований/ Под ред. В.И. Крутова. — М.: Высш. шк., 1989. — 399 с.

19. Планирование эксперимента при разработке технологии и оборудования плазменного напыления/ В.Н. Лясков, Б.Ф. Рыженко. — Обз. по электр. техн. Сер.7, 1982. Вып.2(854). — 68 с.

20. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов/ А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.

21. Сыпчук П.П. Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА/ П.П. Сыпчук, А.М. Талалай. — М.: Сов радио, 1979. — 168 с.

22. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами/ Д. Химмельблау. — М.: Мир, 1973. — 960 с.

23. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента/ Х. Шенк. — М.: Мир, 1972. — 382 с.

24. Шеффе Г. Дисперсионный анализ/ Г. Шеффе. — М.: Наука, 1980. — 512 с.

25. Штремель М.А. Инженер в лаборатории (организация труда)/ М.А. Штремель. — М.: Металлургия, 1983. — 128 с.

26. ГОСТ 7.32.61. Правила оформления отчетов и технической документации. — М.: Изд-во стандартов, 2002. — 48 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Математическая обработка экспериментальных данных	1
Лабораторная работа № 2. Математические методы планирования эксперимента	14
Лабораторная работа № 3. Оформление результатов НИР	31
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	36

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы научных исследований и техника эксперимента»
для студентов направления подготовки 28.03.02 «Наноинженерия»
(профиль «Инженерные нанотехнологии в приборостроении»)
очной формы обучения

Составитель Липатов Геннадий Иванович

Компьютерный набор Г.И. Липатова

Подписано к изданию 04.04.2018

Уч.-изд. л. 2,2

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14