

3449



Министерство образования
Республики Беларусь

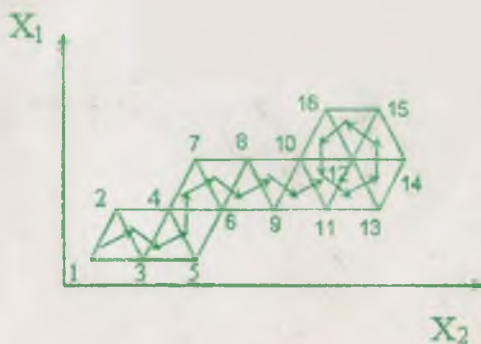
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Материаловедение в машиностроении»

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебно-методическое пособие

Часть 1



Минск 2009

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Материаловедение в машиностроении»

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей

1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка»
и 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»

В 2 частях

Часть 1

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск 2009

669

УДК 519.22(075.8)

ББК 22.172.в6я7

О-75

Авторы:

Г.Ф. Протасевич, В.В. Мельниченко,

В.А. Смёткин, А.И. Михлюк

Рецензенты:

Ф.И. Пантелеенко, П.С. Гурченко

О 75 Основы научных исследований. Математическое моделирование технических процессов: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалообработка» и 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»: в 2 ч. / Г.Ф. Протасевич [и др.]. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 1. – 92 с.

ISBN 978-985-525-073-0 (Ч.1).

В пособии последовательно рассмотрены основные этапы инженерного эксперимента: предварительная организация эксперимента, поиск информации по теме исследований, статистическая обработка текущих и окончательных результатов, оформление результатов в отчете о научно-исследовательской работе. Рассмотрены также методы пассивного и активного эксперимента, достаточно широко применяемые при решении металлургических задач, и методика их использования. Приведены необходимые статистические таблицы и перечень наиболее широко используемых в металлургии государственных стандартов.

УДК 6519.22 (075.8)
ББК 22.172.в6я7

ISBN 978-985-525-073-0 (Ч.1)

ISBN 978-985-525-077-8

© БНТУ, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения и сокращения.	5
1. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА И ЕЕ ОРГАНИЗАЦИЯ.	9
1.1. Задачи металлургии.	9
1.2. Техническое задание и тема исследований.	10
1.3. Поиск информации по теме исследований.	11
1.4. Литературный обзор.	13
1.5. Составление списка использованных источников.	14
2. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.	16
2.1. Постановка задачи.	16
2.1.1. Выбор параметров оптимизации.	17
2.1.2. Выбор факторов оптимизации.	18
2.2. Предварительная технологическая оценка работы.	19
2.3. Методическое обеспечение.	20
2.3.1. Выбор методов исследования и аппаратуры.	21
2.3.2. Государственные стандарты.	21
3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.	24
3.1. Оформление текущих результатов.	24
3.2. Формы записи.	24
3.3. Порядок записей.	25
3.4. Оформление численных данных.	26
3.5. Статистическая обработка результатов эксперимента.	29
3.5.1. Проведение измерений и запись результатов.	29
3.5.2. Элементы теории ошибок.	30
3.5.3. Выявление и исключение промахов.	32
3.5.4. Вероятностная оценка ошибок измерений.	33
3.5.5. Работа с числами.	34
4. ЭКСПЕРИМЕНТ.	36
4.1. Корреляционный анализ.	37
4.1.1. Понятие о методе наименьших квадратов.	38
4.1.2. Коэффициент корреляции.	38
4.2. Регрессионный анализ.	40
4.3. Математическое планирование эксперимента.	41
4.3.1. Суть метода Бокса–Уилсона.	41
4.3.2. Последовательность решения задачи.	44

4.3.3. Составление плана эксперимента	46
4.3.4. Реализация плана эксперимента	48
4.3.5. Построение математической модели	49
4.3.6. Статистический анализ модели	51
4.3.7. Интерпретация результатов	55
4.3.8. Крутое восхождение	56
4.3.9. Принятие решений при неадекватной модели	59
5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА	
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ	61
5.1. Структура отчета	61
5.2. Оформление текста отчета	65
5.3. Оформление рисунков	66
5.3.1. Оформление графиков	67
5.3.2. Оформление диаграмм	70
5.4. Оформление формул	71
5.5. Оформление таблиц	71
6. СИМПЛЕКС-ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	72
6.1. Последовательное симплекс-планирование	73
6.2. Построение диаграмм «состав–свойство» с помощью симплексных решеток	74
6.2.1. Диаграммы «состав–свойство»	74
6.2.2. Примеры применения симплексных решеток	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	80
ПРИЛОЖЕНИЯ	82
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	82
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	83

Определения, обозначения и сокращения

Техническое задание – задание, предоставляемое заказчиком на выполнение научно-исследовательской работы, содержащее конкретную цель исследования.

Объект исследования – это та физическая величина, на которую воздействует исследователь с целью получения новой информации.

Параметр оптимизации – величина, которая характеризует результаты эксперимента и которую требуется оптимизировать в поставленной задаче.

УДК – универсальная десятичная классификация, в которой должны быть зашифрованы отрасль и объект исследования, характер воздействия на объект.

РЖ – реферативный журнал, в котором приведены рефераты всех мировых публикаций по конкретной отрасли производства или науки.

Реферат – краткое описание выполненной работы для РЖ.

Постановка задачи – формулировка цели и вытекающих из нее задач исследования.

Факторы – варьируемые в задаче независимые переменные, которые влияют на изменение параметра оптимизации.

Функция отклика – уравнение, связывающее параметр оптимизации и факторы и описывающее некоторую поверхность (*поверхность отклика*) в многомерном факторном пространстве. Данное уравнение называют также *уравнением регрессии или математической моделью* изучаемого процесса.

План-схема эксперимента – порядок выполнения эксперимента в научно-исследовательской работе, включающий все его этапы.

Методика исследований – краткое описание всех методов и методик исследования, измерений и расчетов, примененных в работе.

Измерение – сравнение измеряемой величины с эталоном.

Задача измерений – измерение, оценка допущенной погрешности и вероятности ее возникновения.

Истинное значение измеряемой величины – ее среднеарифметическое значение.

Правило измерений – правило, определяющее, какое количество измерений должно быть произведено в конкретных условиях проведения опытов.

Ошибки систематические – ошибки, вызванные причинами, действующими по определенным законам и одинаково при многократном повторении измерений (опытов).

Ошибки случайные – ошибки, складывающиеся из множества различных неконтролируемых при эксперименте, но влияющих на его результат причин.

Среднеквадратичная ошибка σ – оценка случайной ошибки, определяемая при $n \rightarrow \infty$.

Стандарт отклонения S_Y – оценка среднеквадратичной ошибки при конечных значениях числа опытов (измерений).

Дисперсия σ^2 характеризует рассеяние значений измеряемой величины относительно ее математического ожидания; равна квадрату среднеквадратичной ошибки σ .

Число степеней свободы f – в математической статистике разница между числом опытов и числом оценок, уже сделанных по этим опытам.

Правило точности определения случайной ошибки – чем точнее хотелось бы знать случайную ошибку, тем больше дублей опытов надо сделать, причем в геометрическом соотношении.

Ошибки грубые (промахи) – ошибки, вызванные в основном неаккуратностью и невнимательностью исследователя.

Доверительный интервал – интервал, внутри которого с заданной степенью вероятности находится значение оцениваемого параметра (интервал значений \bar{Y} от $\bar{Y} + \Delta Y$ до $\bar{Y} - \Delta Y$).

Доверительная вероятность ξ – вероятность P того, что результат Y отличается от истинного значения \bar{Y} на величину, не большую чем $\pm \Delta Y$.

Уровень значимости α – величина, равная $\alpha = 1 - \xi$ и характеризующая, какова вероятность того, что полученный результат неверен. В технических экспериментах обычно принимают $\alpha = 0,05$ (или в процентах – 5 %).

Эксперимент – общий процесс научного исследования и получения новых данных об объекте исследования.

Пассивный эксперимент – эксперимент, при проведении которого изменяют только один фактор.

Математическое планирование эксперимента (МПЭ) – процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Активный эксперимент – см. математическое планирование эксперимента.

Корреляционный анализ – анализ наличия связи между двумя и более рядами случайных величин, относящихся к одному объекту исследования. Наличие и тесноту связи характеризует коэффициент корреляции r_{xy} , изменяющийся от 0 до ± 1 . Ноль указывает на отсутствие связи, единица – на функциональную связь. Прямо пропорциональная связь характеризуется знаком «плюс» при коэффициенте корреляции, а обратно пропорциональная – знаком «минус».

Связь функциональная – связь, при которой каждому значению независимой переменной X соответствует определенное значение зависимой переменной Y .

Связь стохастическая – связь, при которой каждому значению независимой переменной X соответствует набор случайных значений Y .

Коэффициент парной корреляции – мера тесноты линейной связи между двумя рядами случайных величин, определенных независимо друг от друга.

Регрессионный анализ – процедура установления связи между рядами переменных.

Коэффициенты регрессии – коэффициенты при соответствующих переменных уравнения регрессии, значения которых определяют форму поверхности отклика в изучаемой области факторного пространства.

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) – эксперимент, в котором реализованы все возможные сочетания уровней факторов.

Дробный факторный эксперимент (ДФЭ) – часть ПФЭ, построенная из нескольких дробных реплик.

Дробная реплика (регулярная) – часть ПФЭ, выбираемая по определенным правилам и кратная числу уровней варьирования факторов.

Матрица планирования – таблица условий проведения эксперимента, записанная в кодированном виде, по которой производят оценку коэффициентов уравнения регрессии.

Интервал варьирования – разница между основным (нулевым, 0) и верхним (+ 1) или нижним (– 1) уровнем изменения факторов.

Адекватность (уравнения) – пригодность модели для описания исследуемого процесса.

Крутое восхождение – восхождение по градиенту полученной модели к области оптимума.

Научно-исследовательский отчет – научно-технический документ, который содержит исчерпывающие систематизированные сведения о выполненной работе.

График отображает функциональную зависимость одной физической величины от другой.

Графические схемы отображают только качественный характер зависимости между физическими величинами.

Диаграммы отображают нефункциональную зависимость.

Симплекс – выпуклая простейшая геометрическая фигура.

Вершины – точки, образующие симплекс.

Последовательное симплекс-планирование (ПСП) – метод нахождения экстремума функции, основанный на *шаговом* движении, путем *последовательного* отображения вершины регулярного симплекса в *факторном пространстве*.

Симплекс-решетчатые планы – планы проведения экспериментов, в которых экспериментальные точки располагают симметрично на симплексе.

В данном пособии придется столкнуться с большим количеством *терминов*. Часть из них хорошо знакома читателю из курсов математики и физики, с некоторыми он встретится впервые. Многие термины многократно повторяются в тексте. Все они выделены курсивом.

Для удобства поиска терминов в данном разделе они приведены в порядке их первого упоминания.

1. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА И ЕЕ ОРГАНИЗАЦИЯ

1.1. Задачи металлургии

Характер металлургических задач может быть выражен следующей схемой (рисунок 1).

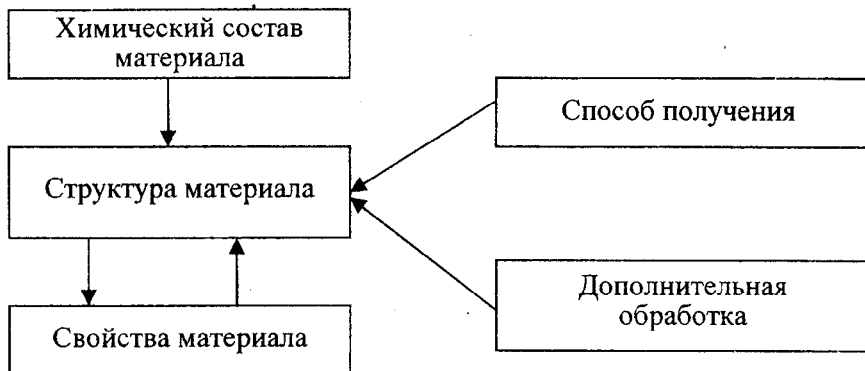


Рисунок 1 – Металлургические задачи

Отсюда вытекают следующие задачи:

- поиск связи между составом материала и его структурой;
- исследование влияния технологии (обработка давлением, литье, порошковая металлургия) получения материала на его структуру и свойства;
- установление влияния вида дополнительной обработки, например термообработки и ее технологии, на структуру материала и какие-либо его свойства (механические, физические, химические, эксплуатационные);
- иногда решают и обратные задачи: определение по свойствам материала его структуры и даже предыстории его получения.

Исследование перечисленного приводит в основном к трем классам решаемых задач с точки зрения цели исследования и конечного результата:

- задачи *описания*, например, построение диаграммы состояния системы сплавов или диаграммы «состав-свойство»;

- задачи *оптимизации* или, иначе, *экстремальные задачи*, когда исследуют влияние технологии получения материала на его свойства;
- предыдущий класс задач часто порождает необходимость решения *компромиссных задач*, в которых приходится оптимизировать одновременно несколько разнородных свойств, например, характеристик прочности и вязкости, чтобы получить высокую конструктивную прочность материала.

Описанное показывает, что металлургические задачи, как правило, сложны из-за большого количества исследуемых *факторов и параметров* оптимизации (см. «Определения, обозначения и сокращения»), и их решение традиционным методом *пассивного* эксперимента становится невозможным и заставляет переходить к новой стратегии – математическому планированию эксперимента (*активного*).

1.2. Техническое задание и тема исследований

Пойди туда, не знаю куда,
принеси то, не знаю что.

Русская сказка

Обычно выполнение прикладных научно-исследовательских работ (НИР) начинается с выдачи заказчиком исполнителю *технического задания*. В нем оговаривают *цель* исследования. Она должна быть сформулирована предельно четко, однозначно и по возможности *количественно*, т.е. давать исполнителю *контрольную цифру*. В этом случае он впоследствии будет избавлен от неприятных переговоров с заказчиком при сдаче отчета, если контрольная цифра достигнута.

Далее исполнитель формулирует *тему* исследований. Она должна быть сформулирована четко, лаконично, содержать *объект исследования* и *цель* работы.

Объект исследования – это та физическая величина, на которую воздействует исследователь (экспериментатор) с целью получения новой информации о ней. В металлургических задачах, например, это могут быть металлы, сплавы, формовочные литейные смеси, порошковые смеси для изготовления спеченных изделий и т.д. Характеризуют *объект исследования параметры оптимизации*, т.е. те

свойства объекта исследования, которые экспериментатор пытается установить или улучшить.

После того как тема исследований сформулирована и отшлифована, можно приступить к *поиску информации*, уже имеющейся по теме исследований.

1.3. Поиск информации по теме исследований

Затраты времени на изучение литературы всегда окупаются.

М. Штрель

Если тема сформулирована четко, лаконично, а цель исследования и задачи, из неё вытекающие, ясны и однозначны, то поиск информации будет прост и эффективен.

Для этого надо прежде всего подобрать шифр темы по *универсальной десятичной классификации (УДК)*. В нем должны быть зашифрованы *отрасль*, к которой относится исследование, *объект исследования* и *характер воздействия* на него (направление исследований). Таким образом, в шифре УДК обычно может быть три группы цифр, отделенных друг от друга точкой. Поиск шифра УДК ведут с помощью классификатора УДК в кабинете каталогов библиотеки. В классификаторе УДК в алфавитном порядке размещены все возможные объекты исследования. Найдя *свой*, рядом ищут шифр УДК. Следует обратить внимание на первую группу цифр. Это шифр отрасли. Если это нужная отрасль исследований, то все в порядке – можно приступить к поиску литературы в соответствующих ящиках систематического каталога – основы информационного поиска. Но необходимо быть внимательным – отрасль может оказаться другой. Например, исследуется процесс выплавки новой стали. Тогда первая группа цифр в шифре будет «669». Это шифр отрасли «Металлургия». Если же исследуется влияние каких-то факторов, например, на обрабатываемость стали резанием, то, возможно, ближе к заданной теме будет отрасль «Машиностроение» (шифр 621).

Если направление (характер) воздействия на объект исследования в найденном УДК не фигурирует, то его надо найти. Например, планируют воздействовать на обрабатываемость резанием с помо-

щью термообработки. Тогда надо опираться еще на один шифр УДК–621.785. Общий шифр УДК в этом случае надо записать так: **УДК 621.9.011: 621.785.**

Если название нужного издания или автор известны, то можно попытаться сразу найти этот первоисточник в алфавитном каталоге.

Источником новейшей информации по теме исследований являются *реферативные журналы (РЖ)*. Туда поступают рефераты всех публикаций по определенной отрасли. Информация по металлургии и машиностроению поступает соответственно в РЖ «Металлургия» и РЖ «Технология машиностроения». Публикаций по этим отраслям так много, что они разбиты на отдельные подотрасли, например: «Металловедение и термическая обработка металлов», «Порошковая металлургия», «Технология и оборудование литейного производства».

По имеющейся в рефератах информации можно найти интересные первоисточники. Информацию по теме исследований целесообразно выписать на отдельные карточки и систематизировать её.

Ещё одним источником информации служат тематические журналы. Некоторые из них, выпускающиеся по отраслям «Металлургия» и «Машиностроение», приведены ниже:

- 1) «Материаловедение»;
- 2) «Металловедение и термическая обработка металлов»;
- 3) «Порошковая металлургия»;
- 4) «Вестник машиностроения»;
- 5) «Литье и металлургия»;
- 6) «Литейное производство».

По теме исследования целесообразно провести патентный поиск. Результаты поиска оформляют в виде «Справки о патентном исследовании заявляемого объекта по источникам патентной и научно-технической информации». Образец справки можно найти в источнике [1]. Там же имеются и более подробные указания о том, как проводить и оформлять патентный поиск.

По разделам науки «Металловедение и термическая обработка металлов» и «Материаловедение в машиностроении» патентная информация содержится в следующих изданиях:

1) официальный бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки». М., ЦНИИПИ. В данном издании

необходимо просмотреть раздел «С» – «Химия и металлургия» (авторские издательства и патенты);

2) объединенные издания патентных бюллетеней Великобритании, США, Франции, ФРГ и Японии «Изобретения за рубежом». М., ЦНИИПИ;

3) объединенное издание «Изобретения в СССР и за рубежом». М., ЦНИИПИ (данное издание выпускается с 1978 года).

Студент прорабатывает *патентную литературу* и составляет справку. Перечисленная патентная литература начиная с 1972 года издания имеется в кабинете патентной литературы университета.

Важнейшая информация по оценке различных характеристик объектов исследования (*параметров оптимизации*) сосредоточена в соответствующих государственных стандартах (ГОСТ). В библиотеке БНТУ имеется отдел стандартов (ул. Якуба Коласа, 16), куда и следует обратиться за этой информацией. Перечень некоторых ГОСТов, применяющихся в металлургии и машиностроении, приведен в таблице П1 приложений.

1.4. Литературный обзор

Во всех делах самое трудное – начало.

Русский афоризм

В случае необходимости литературный обзор может и должен быть разбит на отдельные подразделы и пункты. Поэтому перед написанием литобзора составляют его план, затем целесообразно еще раз просмотреть ранее составленную картотеку и для каждого пункта плана отметить номера литературных источников, которые можно в нем использовать. Это избавит от необходимости каждый раз просматривать всю картотеку.

При написании литобзора неизбежно цитирование и использование опубликованных экспериментальных данных.

Научная этика в этом случае требует ссылки на литературный источник, из которого они заимствованы. Ссылки можно давать, например, следующим образом: в работе [15] показано что...; Иванов С.И. [21] установил, что...; изменение этой характеристики под-

чиняется правилу, установленному в работах [3, 17], и т.д. В квадратных скобках приводят порядковый номер литературного источника по списку литературы. Общеизвестные истины, не содержащие основополагающих законов, ссылки не требуют. Ориентиром может служить следующее. Если информация вошла в *учебник*, то можно просто сослаться на него. Аналогичные ссылки дают в случае необходимости и в остальных разделах отчета.

Литобзор можно иллюстрировать. При заимствовании рисунков и таблиц необходимо привести их в соответствие с ГОСТ 7.32–2002 [2] с точки зрения их оформления.

В заключение укажем, что очень много полезной информации по технологии изготовления металлических изделий можно почерпнуть в изданиях [3–6].

Если возникли трудности, связанные с терминологией в области машиностроения, то рекомендуем воспользоваться изданием [7].

1.5. Составление списка использованных источников

Все использованные в литературном обзоре (и остальных разделах отчета) первоисточники сводят в список использованных источников, помещаемый в конце пояснительной записки. Нумерацию первоисточников проводят обычно по ходу привлечения их в тексте.

Библиографическое описание подчиняется ГОСТ 7.1–2003 [8]. При ссылке на литературный источник в его описании обязательно указывают следующие элементы в порядке их подачи:

1) *заголовок*. Он включает Ф.И.О. авторов или наименование коллективного автора (предприятия) и название работы (книги, статьи);

2) *подзаголовочные данные*. Сюда входит порядковый номер издания, его характеристика и язык оригинала для переводных изданий;

3) *выходные данные* включают в себя место издания (города Москву и Санкт-Петербург указывают первыми буквами, т.е. соответственно М. и СПб., остальные города – полностью), название издательства, год издания, том, выпуск (номер).

4) *количественные данные*, содержащие данные о количестве страниц.

Ниже приведены примеры оформления библиографии (кроме данных примеров см. также библиографию пособия):

1) О принятии решений в неформализованных ситуациях / Ю.П. Адлер [и др.] // Методические проблемы кибернетики: сб.: в 2 т. – М.: Совет по кибернетике, 1970. – Т. 2. – С. 33–39.

2) Смольников, Е.А. Как рассчитать время нагрева при закалке / Е.А. Смольников // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1970. – № 12. – С. 53–56.

3) Пугина, Л.И. Исследование износостойких металлокерамических материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.И. Пугина. – Киев, 1961.

4) Способ непрерывного литья ленты: а. с. 984649 СССР, МКИ³ в 22D 11/00 / Г.А. Анисович, Э.Ф. Барановский, В.М. Ильюшенко, В.Н. Тюлюкин (СССР). – № 3261261/22-02; заявл. 18.03.81; опубл. 30.12.82 // Бюл. № 48. Открытия. Изобретения. – 1982. – № 48.

5) Грачев, С.В. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению / С.В. Грачев // РЖ Металлургия. 15И. Металловедение и термическая обработка. – 1976.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментатор, в отличие от теоретика, ошибается только один раз, а потом ему уже не верят.

Л.А. Арцимович

2.1. Постановка задачи

Цель данной части работы – обоснование (на основе имеющейся информации по теме исследований и ее анализа) направления исследований. Наряду с обоснованием выбора направления исследования необходимо показать его преимущества перед другими возможными путями решения задачи, например, с экономической точки зрения.

Как говорит М. Штремель: *«Общее доброе правило: приступая к задаче, попытайся ответить на вопрос: Что мы собираемся делать с ответом?»* [9].

Для этого сначала лучше подытожить основные данные, полученные в результате изучения литературы, отмечая вопросы, представляющие интерес в научном и народнохозяйственном значении и недостаточно изученные.

После того как предварительная информация проанализирована, систематизирована и подытожена, приступают собственно к постановке задачи. Для этого надо сначала четко и однозначно сформулировать *цель* исследований и по возможности *количественно*. После этого приступают к выбору и формулировке задач исследований, которые могут включать:

- выбор стратегии эксперимента, т.е. пассивный или активный эксперимент (см. «Определения, обозначения и сокращения»);
- выбор тактики эксперимента, т.е. отдельных этапов его проведения, которые, в свою очередь, могут включать:
 - класс материалов, на которых планируется проведение исследований;
 - способы и технологии их обработки;
 - используемые методы и методики исследований;

- методы обработки информации, особенно если они нетрадиционные;
- оцениваемые параметры (свойства) изучаемых материалов и методы их оценки и т.д.

Все задачи необходимо сформулировать по пунктам.

2.1.1. Выбор параметров оптимизации

После того как написана постановка задачи, следует приступить к выбору *параметра оптимизации*. Если цель исследования сформулирована четко, то количественную характеристику цели и называют параметром оптимизации.

Идеально, когда заказчик в техническом задании сам однозначно оговорил цель и параметр оптимизации, но так бывает редко. Например, заказчик просит повысить прочность материала. Вроде бы все в порядке, но это только кажется. Ведь характеристик прочности несколько: пределы прочности при растяжении, сжатии, изгибе, кручении; контактная прочность и т.д. Все определяется условиями работы изделия. В этом случае необходимо уточнить эти моменты у заказчика и вместе переформулировать техническое задание.

Хуже обстоит дело, если эти вопросы придется решать самому исследователю. Поэтому остановимся на этом вопросе подробнее. В металлургических задачах *параметрами оптимизации* могут быть различные свойства материала: механические, физические, химические; технологические характеристики (износостойкость, коррозионная и жаростойкость, жидкотекучесть, пластичность и т.д.); технико-экономические показатели, определяющие, например, себестоимость производства материала. Естественно, что каждая из перечисленных характеристик определяется своими факторами и, если исследователь вынужден проводить оптимизацию по нескольким параметрам, то задача для него резко усложняется. В этом случае на первом этапе можно обойтись одним планом исследований для получения первичной информации, а дальше, на этапе оптимизации, задача разветвится и ее придется **решать** как компромиссную. Если повезло обойтись одним параметром оптимизации, то желательно, чтобы он имел физический смысл, был прост и легко вычислялся. Теперь можно перейти к отбору способов воздействия на него.

2.1.2. Выбор фактора оптимизации

Способы воздействия на параметр оптимизации Y называют *факторами исследования* X . Желательно получить математическую модель (уравнение), связывающую их:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n).$$

Ее называют *функцией отклика* или просто *откликом*. Геометрическую интерпретацию этой функции называют *поверхностью отклика*.

Рассмотрим вначале требования к факторам, которые могут быть количественными и качественными. Количественные факторы должны быть **легко и точно** измеримы. Если можно измерить величину фактора разными способами, то выбирают наиболее простой. Например, для измерения твердости металлов можно использовать способ Шора, но способ Роквелла и проще, и точнее. Факторы должны быть **управляемыми**, т.е. надо иметь возможность поддерживать их значение на выбранном уровне или в нужном интервале значений. Точность измерения фактора должна быть высокой, но не чрезмерной, ибо за высокую точность и платить придется больше. Факторы должны быть **однозначно определяемы**, т.е. не быть функцией других факторов, или, иначе, *независимы*.

Качественным факторам присущи некоторые особенности, связанные с тем, что их трудно измерить. Так, при термообработке, литье, обработке металлов давлением очень важный фактор – скорость охлаждения, которую желательно поддерживать на определенном уровне, допустим 100 °/с. Принципиально это возможно, но слишком сложно и, значит, дорого. Но можно, например, при получении отливок использовать разный материал кристаллизаторов и таким образом фиксировать определенный уровень скорости охлаждения.

Еще одной важной проблемой очень часто является слишком большое количество действующих факторов, и возникает проблема их отбора, т.к. от удачного выбора зависит успех решения задачи. Суть проблемы в том, что если упустить важный фактор, то можно вообще не решить задачу. Если же количество факторов слишком велико, то задача может вырасти до неуправляемых размеров. Возникает проблема отсеивания факторов до приемлемого их количества. Это можно сделать методом случайного баланса [10]. Возмо-

жен и неэкспериментальный подход, который опирается на опрос специалистов – априорное ранжирование факторов (a priori – вне опыта) [11]. Суть метода в том, что спрашивают возможно большее количество специалистов и просят их проранжировать выбранные факторы, т.е. расположить их в порядке важности, присвоив им определенный ранг. После этого ранги складывают и оставляют самые важные. Конечно, при этом возможны ошибки, но чем больше количество специалистов, тем ошибки менее реальны.

2.2. Предварительная технологическая оценка работы

Акуля, Акуля! Что шьешь не оттуля?
– А я, маменька, еще пороть буду.

Пословица

В соответствии с поставленными задачами перед началом эксперимента строят его *план*, т.е. подробно разрабатывают *схему постановки опытов*. В этот план в общем случае, например для химико-термической обработки, могут входить следующие элементы: насыщаемые материалы, способы их обработки, составы насыщающих сред, режимы обработки, оцениваемые параметры и методы их оценки, необходимое оборудование, способы обработки получаемой информации и т.д. В результате оценки этих моментов следует решить вопрос о привлечении соответствующих методов постановки эксперимента – пассивного, активного или их комбинации.

План эксперимента можно представить в виде *схемы*. Такой план-схема может помочь лучше представить определенные этапы работы, оценить их трудоемкость и предусмотреть возможные варианты ее проведения. Пример такого плана-схемы приведен на рисунке 2.

План-схема может быть построен в более общем виде и разбит на несколько частных планов. В заключение укажем, что план эксперимента не *догма*. Накопление информации в процессе исследования может привести к его значительной корректировке.

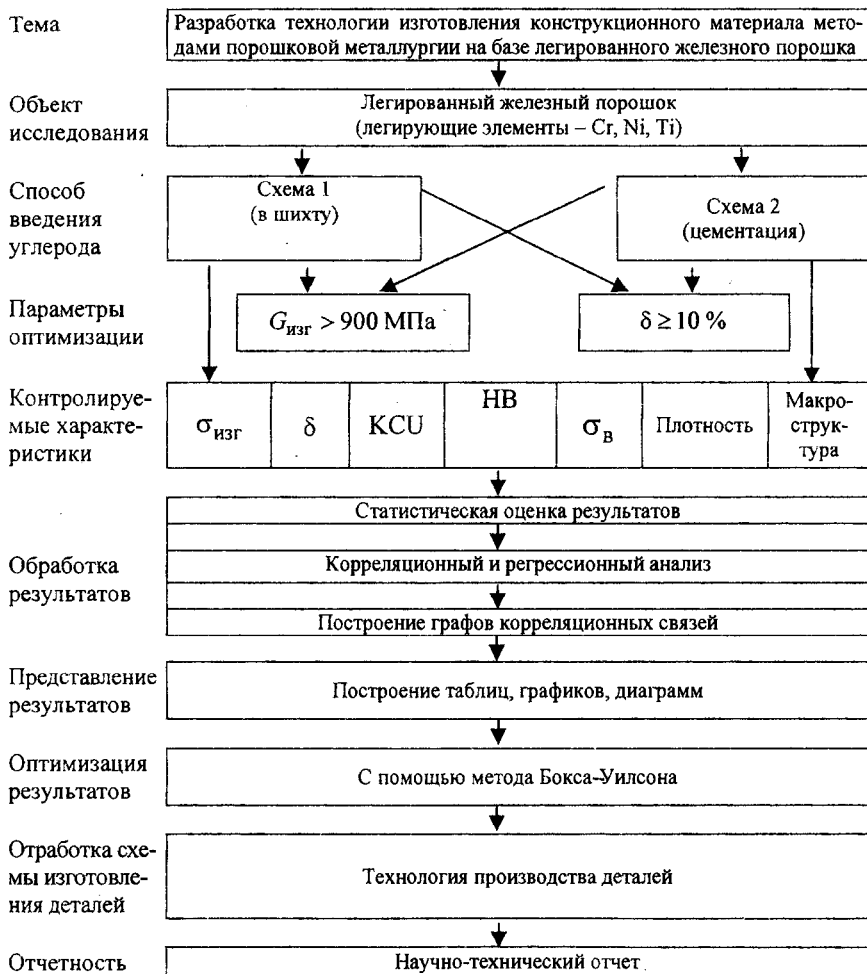


Рисунок 2 – План-схема выполнения научно-исследовательской работы

2.3. Методическое обеспечение

Семь раз отмерь – один отрежь.

Русский афоризм

Привлечение определенных методов (методик) исследования отдельных параметров диктуется задачами исследования, планом экс-

перимента, необходимой точностью измерений и, наконец, возможностями экспериментатора. В свою очередь определяют характеристики используемого оборудования и материалов.

2.3.1 Выбор методов исследования и аппаратуры

Укажем некоторые общие требования к выбору методов измерений и приборов для исследований:

- если их несколько, то выбирается наиболее простой, но обеспечивающий необходимую точность метод измерений (прибор);
- необходимо внимательно ознакомиться с инструкцией или стандартом. Несоблюдение какой-либо *мелочи* может испортить весь эксперимент;
- нельзя превышать необходимую точность измерений. Чем измерение точнее, тем сложнее и дороже эксперимент. Точность измерений должна быть не более чем на порядок выше точности опыта. Этого достаточно для оценки его точности.

Выбрав метод исследований, следует внимательно с ним ознакомиться. Метод может иметь несколько вариаций – методик. Как правило, большинство испытаний регламентировано стандартом, где оговорены условия испытаний, применяемая аппаратура, типы образцов для испытаний, методика оценки результатов и т.д. Большинство приборов требует обязательной периодической поверки Госстандарта.

2.3.2. Государственные стандарты

Выбрав метод испытаний следует обратиться в кабинет стандартов библиотеки БНТУ (ул. Якуба Коласа, 16). В каталоге стандартов [12] следует найти необходимый стандарт и внимательно его изучить. В качестве примера укажем, что оговаривается в ГОСТ 28426–90 [13] «Термодиффузионное упрочнение и защита металлических изделий»:

- общие положения;
- требования к обрабатываемым изделиям;
- требования к технологическим материалам;
- требования к проведению технологического процесса;
- требования к оснастке и оборудованию;

- требования к контролю качества;
- требования безопасности и экологии.

В таблице III приложений приведен перечень стандартов, наиболее часто используемых в материаловедении и металлургии.

Государственные стандарты, как правило, пересматриваются с периодичностью в 10 лет. При этом они либо заменяются, либо продляются на очередной срок, либо дополняются. Поэтому надо внимательно ознакомиться с дополнениями и изменениями.

Следует обратить внимание, что в технических стандартах обычно приводят данные в двух системах единиц: СИ (международной) и МКГСС (технической). Соответственно ранее в отчетах допускалось применение обеих систем единиц измерений. В настоящее время действует ГОСТ 8.417–2002 [14], согласно которому «подлежат обязательному применению единицы СИ», т.е. международной системы единиц, в которой основными являются длина – m (м), масса – kg (кг), время – s (с).

Допускается применять единицы, не входящие в систему СИ, в соответствии с пп. 3.1 и 3.2 данного стандарта, их сочетание с единицами СИ, а также доли от этих единиц и производные от них (таблица 1). Обозначения единиц дают с пробелом после цифр, за исключением тех, которые подняты вверх, например, $10\ m$, но 20° .

Таблица 1 – Допустимые к использованию единицы, производные от единиц СИ

Физическая характеристика	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	
	международное	русское	международное	русское
1	2	3	4	5
Площадь	–	–	m^2	m^2
Объем	–	–	m^3	m^3
Скорость	–	–	m/s	m/c
Плотность	–	–	kg/m^3	$кг/м^3$
Удельный объем	–	–	m^3/kg	$м^3/кг$
Сила (вес)	N^*	H	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	$m \cdot кг \cdot c^{-2}$

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
Давление (механическое напряжение, модуль упругости)	Pa*	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	$M^{-1} \cdot кг \cdot c^{-2}$
Энергия (работа, количество теплоты)	J*	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	$M^2 \cdot кг \cdot c^{-2}$
Мощность (поток энергии)	W*	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	$M^2 \cdot кг \cdot c^{-3}$
Масса	t*	Т	10^3 kg	10^3 кг
Время	min*	мин	60 s	60 c
	h*	ч	3600 s	3600 c
	d*	сут	24 h	24 ч
Объем	l*		$10^{-3} m^3$	$10^{-3} M^3$

*Примечания: здесь соответственно: N – ньютон, Pa – паскаль, J – джоуль, W – ватт, t – тонна, min – минута, h – час, d – сутки, l – литр.

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

«Авось», да «небось» совсем брось.
Все вешай, меряй да считай, да записать не забывай.

Русский афоризм

3.1. Оформление текущих результатов

Оформление результатов начинают с момента записи первого из них и ведут параллельно с их получением. Если с первого дня придерживаться этого правила, то заключительная стадия исследований — написание и оформление работы — превратится в приятную стадию подведения итогов. И, наоборот, оформление результатов после окончания эксперимента приводит к слишком позднему выявлению неувязок, неточностей, промахов в постановке эксперимента и, как следствие, к излишней спешке в заключительной фазе исследований и плохому представлению возможно отличных результатов.

3.2. Формы записи

При записи результатов не следует опасаться записать **лишнее**. Хуже, если что-то упущено или забыто. Записи необходимо вести так, чтобы студенту и его руководителю можно было при необходимости быстро найти нужный результат.

Наиболее удобной формой записи является рабочий журнал — тетрадь большого формата. Вторая форма записей — отдельные листы, которые могут брошюроваться в папку по мере их заполнения. При ведении рабочего журнала полезно соблюдать следующие рекомендации:

— использовать тетрадь в клетку (удобнее для ведения записей и оформления иллюстраций);

— пронумеровать страницы; по мере получения результатов вести оглавление;

— использовать страницы парами: одна страница — для черновых записей, измерений, вычислений, парная ей — для иллюстраций, выводов, подытоживающих записей.

Попутно заметим, что понятие черновика у настоящего исследователя в корне отличается от студенческого понятия. *Черновик* – это не хаос беспорядочных записей и результатов, а *последовательная* запись всех промежуточных результатов, вычислений, необходимых данному конкретному исследователю. При таком подходе к черновику всегда легко вернуться к нужному результату или вычислению и проверить их. При записи условий проведения очередного опыта обязательно ставится *дата*. В этом случае выявление впоследствии неполадок в работе использованной аппаратуры всегда позволит отсеять и проверить сомнительные опыты.

3.3. Порядок записей

Записи необходимо вести сразу в *рабочем журнале*. Никаких дополнительных черновиков! Не следует производить вычислений в уме, считывание результатов и их запись надо вести только в единицах шкалы прибора. Запись рядов цифр ведется столбиком, это позволяет легче сопоставлять и обрабатывать их. Не следует нагромождать записи друг на друга. Запись результатов и вычислений удобнее вести в *рабочих таблицах* (таблица 2). При записи и вычислениях возможны ошибки. Их исправляют только зачеркиванием и сверху надписывают новый результат. Зачеркивать следует так, чтобы всегда можно было прочесть старое число, оно может впоследствии оказаться верным. Необходимо использовать малейшую возможность промежуточной обработки результатов и вычисления оценок, итогов. **Итоговые результаты надо выделять.** Очень полезно иллюстрирование промежуточных результатов. Рисунки в виде схем, диаграмм, графиков позволяют лучше оценить результаты, сопоставить их, выявить какую-либо закономерность, скорректировать план исследований. Большая часть рисунков, возможно, в несколько измененном виде, пригодится при оформлении научно-технического отчета.

По мере выполнения работы надо составлять *оглавление* рабочего журнала, в котором фиксируются этапы исследований и все рисунки и таблицы. В этом случае в поисках нужного результата не надо будет каждый раз перелистывать весь журнал.

Таблица 2 – Жаростойкость хромированной стали 08кп (цикл испытаний 10 ч)

Номер опыта	Номер образца	Исходная масса m_1 , г	Площадь образца $F \cdot 10^{-4}$, м ²	1-й цикл испытаний (10 ч)				2-й цикл	
				m_2 , г	$\Delta m_1 = m_2 - m_1$, г	$\Delta m/F$, г/м ²	$\Delta m/F\tau$, г/м ² ч	m_3 , г	Δm_2 , г
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1								
	2								
	3								
Сумма									
Средняя оценка									
2	4								
	5								

Примечания:

1. Если образцы имеют одинаковую площадь, то графу «4» можно исключить.
2. Строку, указывающую номера вертикальных граф, вводят, если таблица потребует продолжения на другой странице. Тогда на следующей странице головку таблицы не приводят, а только номера вертикальных граф.

3.4. Оформление численных данных

Согласно ГОСТ 7.54–88 [15] экспериментальные численные данные должны быть представлены расчетными и аналитическими выражениями и таблицами. При представлении численных данных должна быть приведена оценка их достоверности и выделены случайная и систематическая погрешность (ошибки). Численные данные должны быть приведены с количеством значащих цифр, соответствующих точности расчета (определения). Оформление таблиц регламентировано ГОСТ 2.105–95 [16].

Различают таблицы рабочие и окончательные. Принципиальная разница между ними состоит в том, что в первых приводят данные, необходимые данному исследователю, в том числе – расчетные графы, во вторых оставляют только графы, несущие важную для читателя информацию.

Таблица состоит из трех обязательных элементов: порядкового номера, названия и собственно таблицы. Собственно таблица состоит из следующих частей: *головки, боковика, основной части* (вертикальных граф и строк) (рисунок 3,а).

Если по табличным данным строится график, то при этом следуют требованиям ГОСТ 7.32–2002 (рисунок 3,б).

№ таблицы – Название таблицы	
Заголовок боковика	Заголовок основной части
Боковик	Собственно таблица
Примечания (поясняющий текст)	

а

Собственно рисунок

Подрисуночная (поясняющая подпись)

№ рисунка – Название рисунка

б

а – таблицы, б – рисунки

Рисунок 3 – Макеты расположения отдельных элементов иллюстраций

Рассмотрим представление результатов в рабочей (см. таблицу 2) и окончательной (таблица 3) таблицах на примере определения жаростойкости.

Таблица 3 – Жаростойкость хромированной стали 08кп

Режим хромирования		Жаростойкость m/F , г/м ² , в зависимости от времени испытаний, ч				
Температура, °С	Время, ч	10	20	30	40	50
900	1					
	2					
	3					
1000	1					
	2					
	3					

Примечания:

1. В окончательной таблице исключена вся промежуточная информация (см. таблицу 2). В строках приводят только средние оценки. Шифрованные условия эксперимента в рабочей таблице (графа 1 таблицы 2) заменены конкретными условиями хромирования.

2. Стандартом не допускается:

- 1) деление головки таблицы по диагонали;
- 2) включать в таблицу графу № п/п.

По требованиям государственного стандарта (ГОСТ):

– количество значащих цифр в измерениях должно быть согласовано с точностью измерений;

– цифры в вертикальных рядах должны быть записаны строго по разрядам.

Таблицу следует составлять так, чтобы данные, подлежащие суммированию, сопоставлению и другой обработке, располагались по вертикали. Если значения, приводимые в какой-либо графе, имеют большое количество значащих цифр, то в обозначение графы вводится множитель, например, «Скорость коррозии · 10⁻⁵, г/сут».

3.5. Статистическая обработка результатов эксперимента

Даже сильная вера должна быть подкреплена статистическим критерием.

В. Фоллер

3.5.1. Проведение измерений и запись результатов

При технических исследованиях проводят измерения различных параметров и характеристик исследуемого объекта. *Измерение* — это сравнение измеряемой величины с *эталоном*. Ни одно измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Оно всегда выполняется с определенной ошибкой. В *задачу измерений* входит измерение, оценка допущенной погрешности и вероятности её возникновения. За *истинное значение* измеряемой величины принимают ее *среднеарифметическое значение*.

При проведении измерений неизбежно возникает вопрос об их *точности*. Хорошо, когда *точность регламентирована ГОСТом*. Это самый лучший и простой вариант. В остальных случаях надо исходить из того, какая *аппаратура* используется, ибо измерительный прибор сам лимитирует возможную точность измерений. Погрешность прибора указана в его инструкции. Если ее нет, то исходят из шкалы прибора, ибо погрешность равна цене минимального деления шкалы. Поэтому отсчет можно делать с точностью до 0,5 цены деления.

Запись результатов связана с *точностью* измерений. Если проводят ряд однородных измерений, то соблюдают следующие правила:

- запись результатов ведется столбиком;
- согласно ГОСТ 7.54–88 [15] количество значащих цифр, определенных одним методом, должно совпадать и соответствовать точности измерений;
- разряды чисел по вертикали должны совпадать.

Встает еще один вопрос – как записать? Допустим, что получены значения 5,6 и 7,0. Казалось бы, второе число можно записать просто 7. **Нельзя!** Таким образом точность измерений **занижается** на

порядок. Но и записать 7,00 тоже нельзя, так как в этом случае точность измерений **завышена** на порядок.

Количество измерений связано с тем, какая ошибка является определяющей – систематическая или случайная. Существует следующее простое правило: «**Если определяющей является систематическая ошибка, то измерение можно выполнить один раз, если случайная – то несколько**». В последнем случае количество измерений должно быть таким, чтобы снизить случайную ошибку до уровня систематической (ошибки прибора). В заключение укажем, что если позволяет метод, то измерение надо произвести хотя бы два раза. Тогда резкое расхождение результатов этих измерений покажет, что с ними не все в порядке, и заставит исследователя поискать **причину** этого.

Для того чтобы правильно указать **окончательный результат**, надо знать еще и ошибку измерений. Поэтому остановимся на некоторых элементах теории ошибок.

3.5.2. Элементы теории ошибок

Горький опыт: тот, кто ставит эксперимент без анализа ошибок, будет жертвой собственной самонадеянности.

М. Штремель

В зависимости от причин появления ошибок их принято делить на три группы:

1) *систематические* – ошибки, вызванные причинами, действующими по определенным законам и одинаково при многократном повторении. К таким ошибкам относятся прежде всего ошибки приборов. Систематические ошибки выявляют, оценивают их величину и, при невозможности уменьшить, учитывают при измерениях;

2) *случайные* – ошибки, складывающиеся из множества различных причин, не контролируемых при эксперименте, но влияющих на его результат. Это главный тип ошибок. Их определяют путем повторения измерений, опытов. Оценку проводят по так называемой среднеквадратичной ошибке σ :

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_Y;$$

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^n (Y_u - \bar{Y}_u)^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где n – количество дублей опыта, измерения;

u – номер дубля;

Y_u – значение опыта (измерения) в u -м дубле;

\bar{Y}_u – среднее арифметическое результатов всех дублей.

Величину S_Y называют *стандартом отклонения*, но часто на нее переносят название ее предела – σ . Квадрат σ называют *дисперсией* (σ^2). Дисперсия характеризует рассеяние измеряемой величины относительно ее математического ожидания. *Число степеней свободы* в математической статистике определяют как разницу между числом опытов и числом оценок, уже сделанных по этим опытам. В формуле (1) вычтена единица, т.к. одна степень свободы использована на определение \bar{Y}_u . Таким образом из формулы (1) следует *простое правило* – чем **точнее** исследователь хочет знать случайную ошибку, тем **больше дублей** опытов придется сделать, причем в геометрическом соотношении: если необходимо повысить точность в два раза, то число дублей придется увеличить в четыре и т.д.;

3) *грубые* – ошибки, вызванные в основном неаккуратностью и невнимательностью исследователя. Их еще называют промахами. Реже, но бывает, что промахи вызываются объективными причинами. В материаловедении к таким причинам можно отнести, например, наличие внутреннего дефекта в образце, часто не выявляемого и после испытаний. Характерным признаком промаха является **резкое** отличие результата в выполненном ряде измерений.

Прوماхи принято отбрасывать, т.е. исключать из ряда измерений. Но при этом действовать надо крайне осторожно, т.е. только при условии, что однозначно установлена причина промаха. Если количество измерений (опытов) меньше **трех-четырёх**, то отбрасывать подозрительный результат нельзя. Требуется его проверить.

3.5.3. Выявление и исключение промахов

Ошибки, которые не исправляются – вот настоящие ошибки.

Русский афоризм

Существуют аналитические методы, позволяющие отсеять подозрительные результаты, т.е. перевести их в разряд промахов, на основе законов математической статистики. Ниже приведем один из них, рекомендуемый А.Н. Зайделем [17]. Суть метода заключается в том, что оценивают, насколько невероятен подозрительный результат. Если вероятность его появления меньше некоторой условной критической величины, то его отбрасывают.

Обычно число производимых измерений не очень велико – сравнительно редко оно превышает 10–20. При этом точное значение σ неизвестно, поэтому просто отбрасывать измерения, отличающиеся от среднего менее чем на 3σ , нельзя. Укажем, что доверительному интервалу $\pm 3\sigma$ соответствует вероятность 0,997, или в процентах 99,7 %.

Для оценки вероятности β случайного появления подозрительных значений в ряду измерений (для $n < 25$) на основании результатов, даваемых теорией вероятностей, была составлена таблица П2. Последовательность операций следующая. Вначале необходимо вычислить среднее арифметическое \bar{Y} и среднюю квадратичную погрешность S_n из всех измерений n , включая подозреваемое Y_i которое, на наш взгляд, недопустимо велико или мало.

Вычисляем относительное отклонение этого измерения v_{\max} от среднего арифметического, выраженное в долях средней квадратичной ошибки.

По таблице П2 находим, какой вероятности соответствует полученное значение v_{\max} . Разумеется, следует договориться, при каких значениях будут отбрасываться измерения. Таблица составлена так, что наименьшее помещенное в ней значение равно 0,01. Оставлять измерения, вероятность появления которых меньше этой величины, нецелесообразно.

После того как выявлены и отброшены промахи, необходимо заново определить \bar{Y} и S_n .

3.5.4. Вероятностная оценка ошибок измерений

Остается решить последний вопрос задачи измерений – какова вероятность при очередном измерении (опыте) получить тот же или близкий к нему результат. Для этого существует понятие доверительного интервала, под которым понимают интервал значений измеренной величины от $\bar{Y} - \Delta Y$ до $\bar{Y} + \Delta Y$ (рисунок 4).

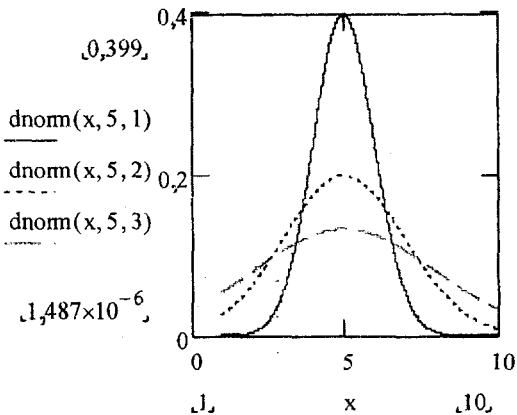


Рисунок 4 – Доверительный интервал

Далее надо оценить вероятность β попадания в доверительный интервал. Для этого Лаплас вывел формулу, позволяющую рассчитать вероятность, и составил таблицу, которая приведена в издании [17]. Позаимствуем из нее три значения:

$$\Delta Y_1 = \pm\sigma, \quad \Delta Y_2 = \pm 2\sigma, \quad \Delta Y_3 = \pm 3\sigma.$$

Соответственно получим

$$\beta_1 = 0,680 \text{ (68,0 \%)}; \quad \beta_2 = 0,950 \text{ (95,0 \%)}; \quad \beta_3 = 0,997 \text{ (99,7 \%)}.$$

Мы уже довольно много работали с числами. Остановимся на этом вопросе подробнее.

3.5.5. Работа с числами

Техническая НИР постоянно связана с измерениями, вычислениями, оценками, т.е. неизбежна работа с числами. Остановимся на некоторых моментах этих процедур, оставшихся неосвещенными. Количество измерений редко единично, поэтому надо вычислить их среднюю оценку и согласовать запись результата с ошибками измерений, т.к. точность измерений и вычислений **взаимосвязаны**.

Существует простое правило: *«вычисления производят на порядок точнее, но окончательный результат надо округлить до точности измерений (величины ошибки)»*. Это значит, что количество значащих цифр в окончательном результате и ошибке эксперимента **должно быть согласовано**. *Значащими цифрами* считают числа от 1 до 9. **Нуль** может быть **значащим**, если он стоит в середине (204) или в конце числа (240), и **незначащим**, если он стоит в начале (слева) десятичной дроби и только подчеркивает разряд остальных цифр (0,204). В целой части числа разряды считают слева от запятой (единицы, десятки, сотни), в дробной вправо (десятые, сотые). Таким образом, если оценка вычислена и равна 17,24, а ошибка $\pm 0,3$, то окончательный результат надо записать так: $17,2 \pm 0,3$. То есть ошибку приводят с тем же количеством десятичных знаков, что и окончательное значение числа.

При **округлении** чисел надо убирать лишний разряд, т.е. число 21,33 записать 21,3, а число 21,37 – 21,4. Если вычисленный результат заканчивается на «5», то округляют до ближайшей четной цифры, т.е. вместо 21,15 пишут 21,2. Причина одна – с четными числами легче работать.

В результате измерений и вычислений получают **приближенные** значения искомых физических величин. При записи таких чисел надо учитывать, что цифры, составляющие их, могут быть верными, сомнительными и неверными. *Цифра верна*, если абсолютная ошибка числа меньше одной единицы разряда этой цифры (слева от нее все цифры будут верными). *Сомнительной* называют цифру, стоящую справа от верной, еще правее – *неверными*. Их надо сразу отбросить и в **исходных** данных, и в **окончательном** результате. Разряд *старшей цифры ошибки* показывает разряд **сомнительной** цифр-

ры в числе. Так, число $75,6 \pm 3,1$ следует записать $75 \pm 3,1$ (75 ± 3), а цифру 6 отбросить, как неверную, цифра 5 – сомнительна.

Результаты записывают только **значащими** цифрами. Запятую ставят сразу после отличной от нуля цифры, а число умножают на десять в соответствующей степени. **Нули**, стоящие в начале или конце числа, обычно **не записывают**. Так, числа 0,00536 и 1.34.000 записывают соответственно $5,36 \cdot 10^{-3}$ и $1,34 \cdot 10^5$. Такая форма записи упрощает дальнейшие вычисления.

Всегда полезно производить округления, иначе возникает *ложное впечатление* о большей, чем в действительности, точности результата. Отбрасываем все цифры, стоящие справа от разряда, до которого производим округление. *Последнюю* остающуюся цифру увеличиваем на единицу, если старшая отбрасываемая цифра равна или больше 5, если меньше, предыдущую цифру не изменяем. Так, число 212 600 лучше записать $2,13 \cdot 10^5$, а число 212 400 – как $2,12 \cdot 10^5$.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Критерием истины является опыт.

Т. Кампанелла

Ничто не в состоянии заменить практического опыта, хотя опыт без осмысливания – это медленный и трудный способ приобретения знаний.

Под *экспериментом* подразумевается общий процесс научного исследования и получения новых данных об объекте исследования. В настоящем пособии авторы преследуют цель познакомить студентов с общими принципами инженерного эксперимента и остановиться на некоторых широко применяемых методах его постановки. Инженерный эксперимент ведет к определенному действию – принятию решения, продолжению испытаний или признанию неудачи.

В любом эксперименте прежде всего надо определиться со *стратегией* эксперимента. Еще совсем недавно такой проблемы не существовало, так как все исследователи использовали одну стратегию – пассивного эксперимента.

Пассивный эксперимент – это традиционный метод проб и ошибок. Главная суть этого метода заключается в его однофакторности, т.е. исследователь последовательно изучает влияние на параметр оптимизации одного из факторов, а затем пытается оценить суммарное влияние всех факторов и характер их взаимодействия. Этот метод имеет право на существование, но неэффективен.

Во второй половине XX века была предложена новая стратегия постановки эксперимента – *активный* эксперимент или математическое планирование эксперимента (МПЭ).

Математическое планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Остановимся сначала на некоторых методах пассивного эксперимента.

4.1. Корреляционный анализ

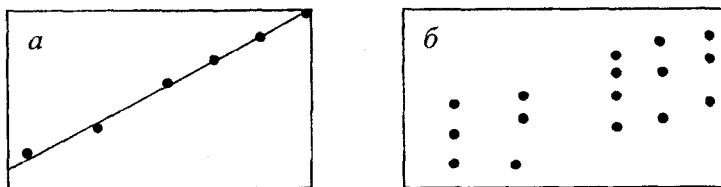
Истина в конце концов не остается скрытой.

Леонардо да Винчи

Весьма частой задачей в металлургических экспериментах является поиск связи между двумя рядами величин, определенных независимо друг от друга. Например, наиболее часто употребляемой контрольной характеристикой в термообработке является **твердость**. Причиной является то, что твердость опосредствованно – через структуру материала – связана с другими свойствами металлических материалов, или, как говорят, коррелирует с ними. Зная характер зависимости и тесноту этой связи, можно, построив градуировочный график, легко и быстро по твердости материала определять другие его характеристики. Такая задача решается с помощью корреляционного и регрессионного анализа.

Второй стороной применения этих видов статистического анализа в металлургии является следующая. Известно, что материаловедение базируется на схеме (см. рисунок 1): состав материала и обработка, которой он был подвергнут, определяют его *структуру*, структура же определяет *свойства*. Таким образом, справедливо и обратное – по структуре можно судить о свойствах материала. Необходимо лишь знать характер и тесноту связи.

В задачу корреляционного анализа входит установление наличия и тесноты связи между двумя рядами независимо определенных величин. Принципиально различают два вида связи между ними – функциональную и стохастическую (рисунок 5).



а – функциональная связь; б – стохастическая связь

Рисунок 5 – Типы связи между переменными

При функциональной (однозначной) связи значению переменной X соответствует определенное значение другой переменной Y . При стохастической (статистической, вероятностной) связи значению X может соответствовать несколько значений Y , что связано с определяющей ролью случайных ошибок. Типично стохастическая зависимость – корреляционная. Например, на рисунке 5,б каждому значению X соответствует несколько значений Y . И хотя ясно, что в целом видна зависимость – большему X соответствует большее значение Y – пользоваться этим рисунком неудобно. Встает задача замены совокупности экспериментальных точек на рисунке 5,б линией. Вначале стремятся заменить эту совокупность прямой линией. Необходимо лишь решить вопрос, как ее провести. Ответ дает метод наименьших квадратов.

4.1.1. Понятие о методе наименьших квадратов

Задача проведения прямой заключается в нахождении коэффициентов a и b ее уравнения

$$Y = a + bX.$$

Лежандр и Гаусс в начале XIX века вывели требование, обеспечивающее оптимальное положение прямой:

$$\sum_{u=1}^n [Y - (a + bX)]^2 = \min.$$

Данная формула утверждает, что **оптимально** такое положение прямой линии, при котором *сумма квадратов отклонений* измеренных величин (экспериментальных точек) от соответствующих им точек на искомой прямой должна быть **минимальна**. На базе этой зависимости выведены формулы для расчета коэффициентов регрессии искомого уравнения прямой.

4.1.2. Коэффициент корреляции

Наличие, тесноту и направление связи между двумя рядами переменных величин оценивают с помощью коэффициента корреляции

ляции. При относительно небольшом количестве переменных в сопоставляемых рядах ($n < 50$) Госстандарт [18] рекомендует использовать для расчета коэффициента корреляции следующую формулу:

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{u=1}^n X_u Y_u - \sum_{u=1}^n X_u \sum_{u=1}^n Y_u}{\sqrt{n \sum_{u=1}^n X_u^2 - \left(\sum_{u=1}^n X_u \right)^2} \sqrt{n \sum_{u=1}^n Y_u^2 - \left(\sum_{u=1}^n Y_u \right)^2}},$$

где u – номер опыта;

n – количество опытов.

Расчеты удобно вести, используя таблицу 4.

Таблица 4 – Последовательность расчета коэффициента корреляции

Номер опыта	X_u	Y_u	$X_u Y_u$	X_u^2	Y_u^2
...
...
Суммы	$\sum_{u=1}^n X_u$	$\sum_{u=1}^n Y_u$	$\sum_{u=1}^n X_u Y_u$	$\sum_{u=1}^n X_u^2$	$\sum_{u=1}^n Y_u^2$

Полученный коэффициент корреляции сравнивают с *критическим* значением (таблица ПЗ) с целью проверки его статистической значимости. Число степеней свободы оценивают по формуле

$$f = n - 2. \quad (2)$$

В формуле (2) двойка вычтена потому, что по результатам опытов уже определены две базовые суммы: $\sum_{u=1}^n X_u$ и $\sum_{u=1}^n Y_u$.

При проведении корреляционного анализа следует соблюдать известную осторожность при толковании его результатов. Отсутствие

линейной связи не означает, что ее вообще нет. Она может быть нелинейной или многомерной (многофакторной). Тем более не следует говорить о ее причинной обусловленности [19].

Если коэффициент корреляции оказывается больше или равен критическому значению, то наличие связи между переменными не отвергается. Если коэффициент корреляции оказывается равен «1», то это означает, что связь между переменными функциональная, если равным «0» – линейной связи вообще нет. Знак коэффициента характеризует направление связи.

4.2. Регрессионный анализ

Ищущий – найдет.

Пословица

После проверки статистической значимости коэффициента корреляции определяют характер связи между переменными X и Y . В данном пособии ограничимся лишь описанием метода оценки линейной регрессии. При этом ищут параметры *прямой* линии.

Оценки коэффициентов уравнения регрессии a и b определяют с помощью метода наименьших квадратов.

Формулы для расчета коэффициентов регрессии имеют вид

$$a = \frac{\sum_{u=1}^n Y_u \sum_{u=1}^n X_u^2 - \sum_{u=1}^n X_u \sum_{u=1}^n Y_u X_u}{n \sum_{u=1}^n X_u^2 - \left(\sum_{u=1}^n X_u \right)^2};$$

$$b = \frac{n \sum_{u=1}^n Y_u X_u - \sum_{u=1}^n X_u \sum_{u=1}^n Y_u}{n \sum_{u=1}^n X_u^2 - \left(\sum_{u=1}^n X_u \right)^2}.$$

Нетрудно заметить, что все суммы, необходимые для расчета коэффициентов, уже есть в таблице 4. Имея подобное уравнение, в дальнейшем можно по полученному X_u предсказать значение Y_u . Для удобства пользования полученной зависимостью обычно строят *градуировочные* графики

$$Y = f(X).$$

4.3. Математическое планирование эксперимента

Физику мы переводим на язык математики, результат – снова на язык физики.

С. Лем. Сумма технологий

В металлургии широко распространены задачи *оптимизации*, в которых требуется получить *экстремальное* значение какого-либо свойства материала в зависимости от воздействующих на него факторов (состава, условий обработки и т.д.). *Факторы – это варьируемые в задаче переменные, которые влияют на изменение параметра оптимизации – оптимизируемого свойства.*

При решении задач оптимизации хорошие результаты дает метод Бокса–Уилсона.

4.3.1. Суть метода Бокса–Уилсона

Метод Бокса–Уилсона включает два этапа:

1. В локальной области изменения факторов вокруг центра (основного уровня) начального эксперимента с помощью метода дробных реплик строят линейную математическую модель процесса.

2. В случае успеха первого этапа по *градиенту* полученной модели осуществляют крутое восхождение к области оптимума.

На рисунке 6 показана схема достижения области оптимума.

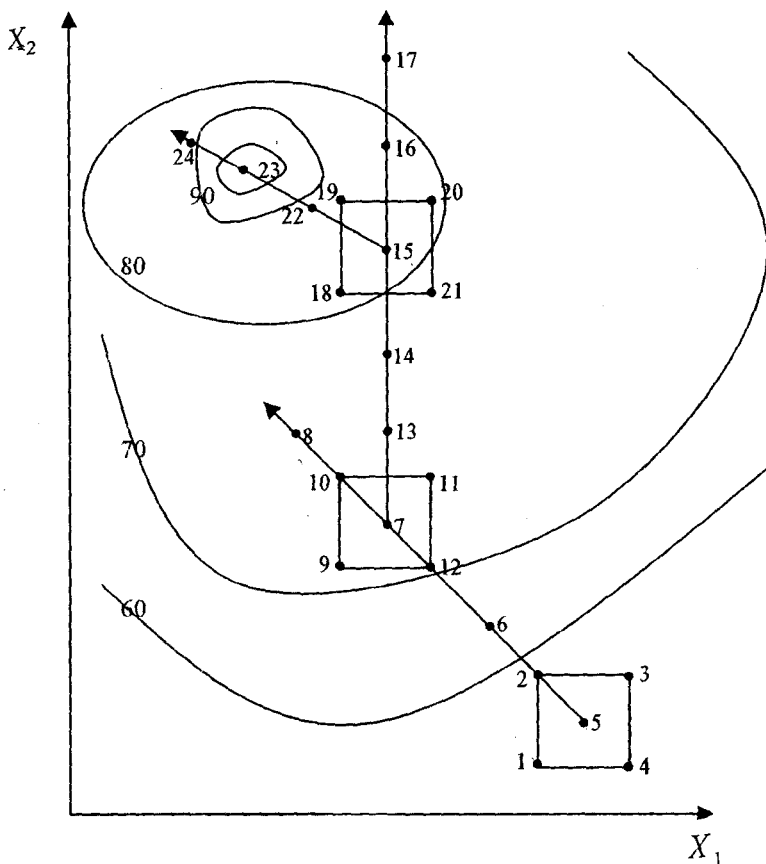


Рисунок 6 -- Схема планирования опыта для поиска экстремума методом круглого восхождения (Бокса-Уилсона)

Остановимся подробнее на некоторых моментах применения метода. Выбираем *основной уровень* начального плана эксперимента, затем *интервалы варьирования факторов*, т.е. значения, на которые производим их изменение вверх и вниз по шкале.

Предположим, при решении какой-то задачи факторы принимают всего два значения (уровня варьирования). Например, температура нагрева под закалку 900 и 950 °С. Тогда значение 900 °С называют нижним уровнем фактора, 950 °С – верхним, 925 °С – основным или нулевым. Соответственно интервалом варьирования в данном случае будет ± 25 °С.

Если реализовать все возможные сочетания факторов и их уровней, то в данном случае число необходимых опытов составит

$$N = 2^z,$$

где z – число факторов;

2 – число уровней.

Такой эксперимент называют *полным факторным (ПФЭ)*.

ПФЭ позволяет **независимо** друг от друга оценить все коэффициенты модели (их называют коэффициентами регрессии) – от линейных до коэффициентов самого высокого порядка, т.е. **раздельно** оценить силу и направление влияния каждого фактора и всех их взаимодействий.

Неприятным моментом применения ПФЭ является катастрофическое возрастание числа опытов при увеличении количества факторов. Нетрудно заметить, что оно возрастает в геометрической прогрессии числа уровней факторов, а именно: для $Z = 1, 2, 3, 4, 5$, оно составляет соответственно **2, 4, 8, 16, 32** опыта.

Поэтому трудоемкость решения задач резко возрастает. Результат применения ПФЭ – построение модели вида

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i < j < l \leq k} b_{ijl} X_i X_j X_l + \dots,$$

где $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijl}$ – оценки коэффициентов регрессии.

На первом этапе не требуется подробное изучение процесса, а **локальную** область эксперимента вокруг *основного* уровня используют обычно лишь как трамплин для движения к области экстремума. Поэтому вначале можно вместо ПФЭ использовать *дробный факторный эксперимент (ДФЭ)* и с его помощью оценить лишь линейные члены уравнения, т.е. b_i и b_0 . План ДФЭ называют *дробной репликой* от ПФЭ. Реплики обозначают: полуреплика – 2^{z-1} , четвертьреплика – 2^{z-2} и т.д. Таким образом, дробная реплика 2^{5-1} означает полуреплику ($2^4 = 16$) от ПФЭ 2^5 (32 опыта).

Дробные реплики строят по определенным правилам. Примеры некоторых наиболее часто используемых реплик приведены в приложении (таблица П4). При выборе реплики следует помнить, что

число опытов в ней должно быть по крайней мере на два больше числа факторов. Последнее условие вытекает из необходимости иметь хотя бы одну степень свободы при проверке *адекватности* полученной модели.

После получения уравнения с помощью ПФЭ или ДФЭ его анализируют с целью найти направление перемещения в область оптимума. Метод Бокса–Уилсона обычно применяют при решении *экстремальных* задач, например, при поиске составов и условий обработки сплавов, обеспечивающих заданные свойства; оптимизации режимов термической, химико-термической обработки и т.д. ПФЭ и ДФЭ можно использовать и для получения *моделей описания исследуемых процессов* в интересующей области (области *факторного* пространства), например, для описания влияния технологических факторов на формирование диффузионных слоев при химико-термической обработке.

4.3.2. Последовательность решения задачи

Ничто не убеждает лучше примера.

Французская пословица

Для решения задач оптимизации используют схему, приведенную на рисунке 7.

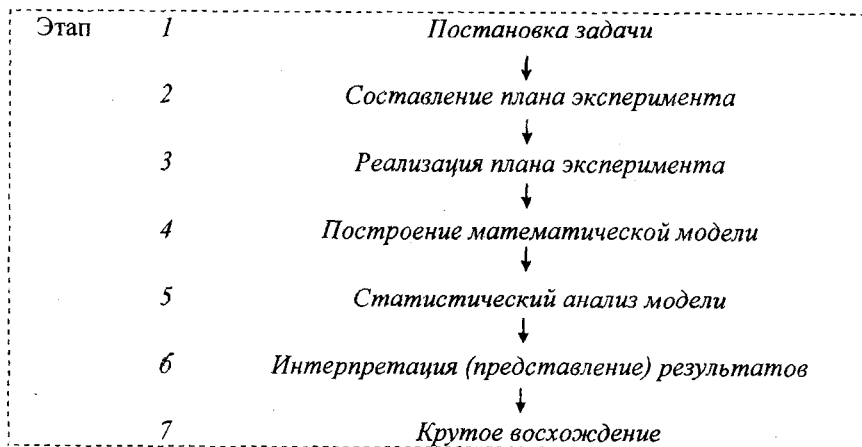


Рисунок 7 – Общая схема решения задачи методом Бокса–Уилсона

Остановимся подробнее на отдельных этапах решения задачи.

Начинают с формулировки цели исследования, по возможности **количественной**. Формулировка цели предполагает прежде всего выбор параметра оптимизации. Если приходится оптимизировать одновременно несколько характеристик, то либо сводят несколько параметров оптимизации к одному, либо решают *компромиссную* задачу.

Затем выбирают факторы. Часто это довольно сложная проблема. Если факторов много (8–10 и более), то часть их отсеивают экспериментальным или априорным путем. Далее выбирают основной (нулевой) уровень и интервалы варьирования факторов. Одна из рекомендаций заключается в том, что интервал варьирования должен быть больше удвоенной среднеквадратической ошибки в определении фактора.

Факторы кодируют следующим образом:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i},$$

где x_i – кодированное, а X_i натуральное значение i -го фактора;

X_{i0} – натуральное значение i -го фактора на основном уровне;

ΔX_i – натуральный интервал варьирования i -го фактора.

Кодирование позволяет представить верхний уровень фактора в виде +1, нижний в виде –1, а основной уровень – нулем. Или еще проще соответственно +, 0, –. Кодирование позволяет сопоставить силу влияния *разнородных* факторов на параметр оптимизации.

Схема кодирования факторов представлена на рисунке 8.

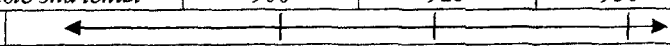
	<i>Нижний уровень</i>	<i>Нулевой (основной) уровень</i>	<i>Верхний уровень</i>
<i>Натуральные значения</i>	900	925	950
			
<i>Кодированные значения</i>	–1	0	+1
	–	0	+

Рисунок 8 – Схема кодирования факторов

Поясним метод решения задачи на конкретном примере.

Пр и м е р. Требуется выбрать режим термообработки стареющего сплава на основе меди с целью обеспечения твердости деталей не менее 350 НВ.

Параметр оптимизации (Y) – твердость сплава. Исследуемые факторы и характер их изменения приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Исследуемые факторы и интервалы их варьирования

Характеристика	Факторы			
	Температура нагрева под закалку, °С	Время выдержки, с	Температура старения, °С	Время старения, мин
Код	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень	800	150	350	40
Интервал варьирования	25	50	50	10

4.3.3. Составление плана эксперимента

Алгоритм – это программа действий, в которой все заранее предусмотрено.

С. Лем. Сумма технологий

При составлении плана ПФЭ надо следить, чтобы не было повторов опытов. При небольшом числе опытов это несложно, при возрастании их количества – затруднительно. Чтобы избежать повторов, можно воспользоваться принципом, приведенным в таблице 6.

При выборе дробной реплики следует учитывать ограничение, приведенное в пункте 4.3.1, а именно: число опытов в ней должно быть больше числа факторов хотя бы на два. Готовые дробные реплики можно взять из приложений (таблица П4). Условия проведения опытов закодированы следующим образом:

– факторы обозначены буквами латинского алфавита a, b, c, d, e и т.д. (таблица П4);

– если в условиях проведения опыта буква, кодирующая данный фактор, есть, то его берут на верхнем уровне, если отсутствует – на нижнем;

– если в опыте все факторы на нижнем уровне, то опыт обозначают (1).

Такой способ кодирования матрицы позволяет представить ее в весьма компактном виде. Сопоставьте таблицу 6 и ДФЭ, представленные в таблице П4.

Таблица 6 – Матрицы полного факторного эксперимента от 22 до 25

План	Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
	1	+	+	+	+	+
	2	-	+	+	+	+
	3	+	-	+	+	+
	4	-	-	+	+	+
2^3	5	+	+	-	+	+
	6	-	+	-	+	+
	7	+	-	-	+	+
	8	-	-	-	+	+
2^4	9	+	+	+	-	+
	10	-	+	+	-	+
	11	+	-	+	-	+
	12	-	-	+	-	+
	13	+	+	-	-	+
	14	-	+	-	-	+
	15	+	-	-	-	+
	16	-	-	-	-	+
2^5	17	+	+	+	+	-
	18	-	+	+	+	-
	19	+	-	+	+	-
	20	-	-	+	+	-
	21	+	+	-	+	-
	22	-	+	-	+	-
	23	+	-	-	+	-
	24	-	-	-	+	-
	25	+	+	+	-	-
	26	-	+	+	-	-
	27	+	-	+	-	-
	28	-	-	+	-	-
	29	+	+	-	-	-
	30	-	+	-	-	-
	31	+	-	-	-	-
	32	-	-	-	-	-
Кодирование факторов при свернутой форме записи матрицы		a	b	c	d	e

Пример. Из таблицы П4 выбираем дробную реплику 2^{4-1} следующего вида: *a, b, c, d, abd, acd, abc, bcd*. Записываем дробную реплику в развернутом виде (см. таблицу 7) или иначе в виде матрицы. Она содержит восемь опытов, что больше числа факторов на четыре, т.е. условие п. 4.3.1 выполняется.

Проверяем правильность заполнения таблицы. Условие симметрии реплики требует, чтобы в каждом столбце содержалось равное число минусов и плюсов. Условие выполняется.

Таблица 7 – Условия проведения опытов (план эксперимента)

Номер опыта	Значение фактора в кодированном виде				
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4
1	+	+	-	-	-
2	+	-	+	-	-
3	+	-	-	+	-
4	+	-	-	-	+
5	+	+	+	-	+
6	+	+	-	+	+
7	+	+	+	+	-
8	+	-	+	+	+

Примечание. Фактор, обозначенный « X_0 » (так называемую фиктивную переменную), вводят для расчета свободного члена искомой модели – коэффициента « b_0 ».

4.3.4. Реализация плана эксперимента

В общем случае опыты рекомендуют проводить рандомизированно по времени, т.е. в случайном порядке. Однако для сокращения времени эксперимента опыты иногда группируют, т.е. несколько опытов проводят одновременно. Например, при химико-термической обработке в печь можно установить несколько тиглей, сгруппировав опыты по температуре ХТО.

Для определения ошибки эксперимента опыты следует дублировать. Чаще дублируют не все опыты, а только опыты на основном уровне. В этом случае расчет дисперсии опыта S_y^2 проводят по формуле

$$S_Y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (Y_{0u} - \bar{Y}_0)^2}{n_0 - 1},$$

где n_0 – количество дублей на основном уровне;

u – номер дубля;

Y_{0u} – значение параметра оптимизации в u -м дубле;

\bar{Y}_0 – среднее арифметическое результатов всех дублей;

$f_1 = n_0 - 1$ – число степеней свободы.

Единицу вычли, так как уже оценили среднее значение \bar{Y}_0 .

П р и м е р. Для определения дисперсии опыта реализованы опыты 9–11 на основном уровне. При этом получены следующие значения параметра оптимизации: опыт 9 – 300 НВ; 10 – 298 НВ; 11 – 305 НВ.

Определяем S_Y^2 . Составляем расчетную таблицу (таблица 8).

Таблица 8 – Расчетная таблица для определения S_Y^2

Опыт	Y_u	$\Delta Y_u = Y_{0u} - \bar{Y}_0 $	ΔY_u^2
9	300	1	1
10	298	3	9
11	305	4	16
–	$\bar{Y}_0 = 301$		$\sum_{u=1}^{n_0} \Delta Y_{0u}^2 = 26$

Тогда $S_Y^2 = \frac{26}{f_1 = 3 - 1} = 13,0$; $S_Y = \pm 3,6$.

4.3.5. Построение математической модели

После реализации всех опытов матрицы планирования по их результатам строят математическую модель изучаемого процесса. Для

этого при использовании ПФЭ и ДФЭ коэффициенты регрессии уравнения рассчитывают по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{N}, \quad (4)$$

где b_i – значение i -го коэффициента регрессии ($i = 0, 1, 2, \dots, k$);

X_{iu} – значение i -го фактора в u -м опыте в кодированном виде;

Y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте;

N – число опытов в матрице планирования.

В результате получают модель, имеющую следующий общий вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_i X_i.$$

П р и м е р. В реализуемой матрице планирования получены следующие результаты (таблица 9).

Таблица 9 – Результаты опытов

Опыт	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат Y_u	300	280	320	290	315	305	335	280

По формуле (4) рассчитываем коэффициенты регрессии искомой модели. Для примера рассчитаем коэффициент b_1 . Для этого мы должны взять из таблицы 7 значения фактора X_{1u} в кодированном виде + 1 или - 1 и перемножить на соответствующие значения Y_u , взятые из таблицы 9. Подставив эти значения, получим:

$$b_1 = \frac{1}{8} [(+1)300 + (-1)280 + (-1)320 + (-1)290 + (+1)315 + (+1)305 + (+1)335 + (-1)280].$$

Аналогично определяем остальные коэффициенты:

$$b_0 = 303,1; \quad b_1 = +10,6; \quad b_2 = -0,6; \quad b_3 = +6,9; \quad b_4 = -5,6.$$

Таким образом, полученная линейная модель имеет следующий вид:

$$Y = 303,1 + 10,6X_1 - 0,6X_2 + 6,9X_3 - 5,6X_4.$$

4.3.6. Статистический анализ модели

Успехов без неудач не бывает.

Афоризм

Целью анализа является проверка пригодности модели для ее использования при описании исследуемого объекта (процесса, сплава, технологии и т.д.), иначе, ее *адекватности*.

Этот анализ состоит из двух этапов. На первом проверяют статистическую значимость коэффициентов регрессии. Обычно это делают с помощью статистического критерия Стьюдента (*t*-критерия). Для этого рассчитывают *доверительный интервал коэффициентов*:

$$\Delta b_i = \pm t_{\alpha, f_1} S_{b_i},$$

где t_{α, f_1} – значение *t*-критерия для уровня значимости α и числа степеней свободы f_1 ; критерий Стьюдента t_{α, f_1} берут из таблицы П5;

S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка;

α – *уровень значимости* – величина, характеризующая, какова вероятность того, что полученный результат неверен. В технических экспериментах α обычно принимают равным 0,05, или в процентах 5 %, иногда 0,1 или 0,01.

Среднеквадратичную ошибку в определении коэффициентов регрессии вычисляют по формуле

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{S_Y^2}{N}}.$$

Коэффициенты регрессии сравнивают с Δb_i и те значения, которые оказываются по абсолютной величине меньше доверительного интервала, исключают из уравнения. То есть считают, что соответствующие факторы в исследованных пределах слабо влияют на параметр оптимизации.

На втором этапе окончательно полученное уравнение проверяют на *адекватность*, т.е. его пригодность для описания объекта исследования. Последовательность проверки такова:

- по полученной модели поочередно для всех опытов матрицы планирования определяют расчетные значения параметра оптимизации ($Y^{\text{расч}}$). Для этого в уравнение подставляют значение факторов в кодированном виде;

- вычисляют оценку *дисперсии неадекватности* по формуле

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (Y_u^{\text{расч}} - Y_u^{\text{эксп}})^2}{f_2},$$

где $f_2 = N - k'$ – число степеней свободы;

k' – число коэффициентов модели, включая b_0 .

Определяют расчетное значение F -критерия по формуле

$$F_{f_2, f_1}^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_Y^2}.$$

Полученное значение F -критерия (критерия Фишера) сравнивают с **табличным**, которое выбирают из таблицы Пб с учетом уровня значимости α и числа степеней свободы f_1 и f_2 . В случае если расчетное значение окажется не больше табличного, модель признают адекватной. Это значит, что ее можно использовать для описания объекта исследования в **изученных** пределах изменения факторов. Таким образом, если надо получить значение параметра оптимизации Y при интересующих значениях факторов, то для этого

достаточно подставить их значения (в кодированном виде) в полученное уравнение. Формула кодирования факторов (3) приведена в п. 4.3.2.

Пример. Рассчитываем доверительный интервал коэффициентов регрессии Δb_i . Для этого вначале определяем S_{b_i} :

$$S_{b_i} = \frac{13,0}{8} = \pm 1,62.$$

Из таблицы П5 выбираем для $\alpha = 0,05$ и $f_1 = 2$ значение критерия Стьюдента, равное 4,3. Определяем

$$\Delta b_i = \pm 4,3 \cdot 1,62 = \pm 7,0.$$

Таким образом, в полученном уравнении коэффициенты b_2 и b_4 оказались статистически незначимы. Коэффициент b_3 весьма близок к доверительному интервалу (расхождение 1,4 %), поэтому решено его все же включить в окончательное уравнение, которое приобретает следующий вид:

$$Y = 303,1 + 10,6X_1 + 6,9X_3. \quad (5)$$

Теперь проверяем адекватность полученной модели в целом. Для этого подставляем в полученное уравнение последовательно для всех опытов значения X_i в кодированном виде, которые берем из таблицы 8. Например,

$$Y = 303,1 + 10,6(+1) + 6,9(-1) = 307.$$

Аналогично определяем все остальные Y_1 (от Y_2 до Y_3). Для определения дисперсии неадекватности составляем расчетную таблицу 10.

Таблица 10 – Расчет дисперсии неадекватности

Опыт	Значения Y		$ \Delta Y $	ΔY^2
	экспериментальное	расчетное		
1	300	307	7	49
2	280	286	6	36
3	320	299	21	441
4	290	286	4	16
5	310	307	3	9
6	310	321	11	121
7	335	321	14	196
8	280	299	19	361
Сумма	–	–	–	$\Sigma = 1229$

Определяем $S_{\text{неад}}^2 = \frac{1229}{5} = 245,8$. Теперь можно определить

$$F_{5,2}^{\text{расч}} = \frac{245,8}{13,0} = 18,9.$$

Тогда по таблице П6 для $\alpha = 0,05$; $f_2 = 5$ и $f_1 = 2$ находим табличное значение критерия Фишера, равное 19,3. Таким образом, условие адекватности модели

$$F^{\text{расч}} \leq F^{\text{табл}}$$

выполняется, и ею можно пользоваться для расчета значений твердости стареющего медного сплава данного состава в зависимости от условий термообработки. Для этого надо в уравнение (5) подставить значение фактора в кодированном масштабе. При этом следует помнить, что полученная модель описывает процесс термообработки сплава только в изученных пределах варьирования факторов. Например, необходимо определить, какую твердость приобретет сплав при следующих параметрах термообработки:

$$X_1 = 810 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad X_2 = 120 \text{ с}; \quad X_3 = 325 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad X_4 = 50 \text{ мин.}$$

Определяем значения факторов по формуле (3).

Коэффициенты b_2 и b_4 статистически незначимы, поэтому изменение факторов X_2 и X_4 в пределах интервалов их варьирования можно не учитывать.

Подставляем:

$$Y = 303,1 + 10,6 (+ 0,4) + 6,9(-0,5) = 310,8.$$

После учета S_y и округления $Y = 310,8 \pm 3,6$, т.е. значение твердости должно попасть в пределы 307–314 НВ.

4.3.7. Интерпретация результатов

Всякая форма есть выражение какого-то внутреннего содержания.

Р. Роллан

Полученная адекватная модель позволяет рассчитать значения параметра оптимизации для любой точки изученного факторного пространства.

Кроме того, полученную зависимость можно представить графически в виде влияния отдельных факторов на параметр оптимизации. При этом обычно строят зависимости $Y = f(X)$ при условии, что все остальные факторы фиксируют на постоянном уровне.

Предположим, получено уравнение регрессии

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_3 X_3. \quad (6)$$

Представим графически зависимость $Y = f(X_1)$ для случая, когда все остальные факторы находятся на нижнем уровне. Тогда подставляем в данное уравнение значение фактора X_3 в кодированном виде (со знаком «-»). Затем в преобразованное (упрощенное) уравнение подставляем последовательно значения фактора X_1 на нижнем, основном и верхнем уровнях, т.е. $-1, 0, +1$ и получаем искомый график.

Пример. Представим графически зависимость твердости сплава от температуры старения (фактора X_3), когда $X_1 = 0$. Тогда уравнение (6) принимает вид

$$Y = 303,1 + 6,9X_3.$$

Теперь в преобразованное уравнение последовательно подставляем значения X_3 , равные $-1, 0, +1$, и получаем график, представленный на рисунке 9. Аналогично можно придать X_1 значения -1 и $+1$, получить два новых упрощенных уравнения и, повторив процедуру с X_3 , получить на данном графике еще две линии.

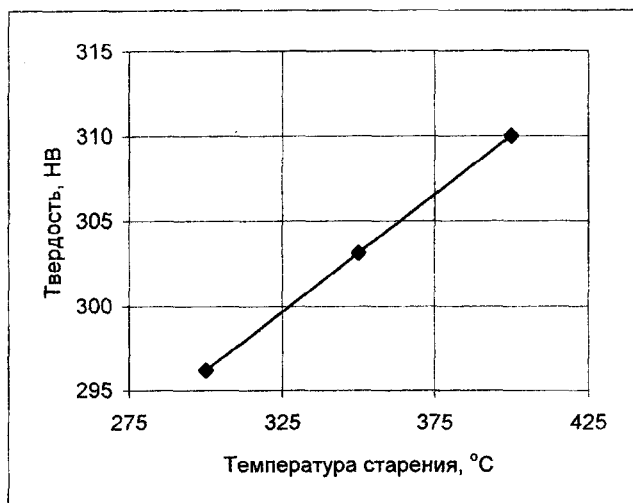


Рисунок 9 – Влияние температуры старения на твердость медного сплава

4.3.8. Крутое восхождение

Никакая цель невыполнима без движения к ней.

К. Федин

При решении экстремальных задач полученную линейную модель используют для *крутого* восхождения к области экстремума (оптимума).

Для того чтобы восхождение действительно шло по *градиенту* модели, значения факторов необходимо изменять пропорционально величинам соответствующих коэффициентов регрессии с учетом их знаков.

Последовательность реализации данного этапа следующая:

1) от кодированных значений факторов переходят к натуральным и вычисляют значения произведений коэффициентов на соответствующие интервалы варьирования $b_u \Delta X_u$;

2) для одного из факторов выбирают шаг для движения по градиенту и вычисляют шаги для остальных факторов, беря их пропорционально произведениям $b_u \Delta X_u$;

3) рассчитанные значения шагов последовательно прибавляют или вычитают (в зависимости от знака коэффициента регрессии) к основному уровню и тем самым получают ряд мысленных опытов. Если в силу каких-либо ограничений (например, температура закалки превышает солидус сплава) далее изменять некоторые факторы оказывается невозможным, их фиксируют на достигнутом уровне, продолжая движение по остальным факторам;

4) часть полученных опытов реализуют, и если результаты удовлетворяют исследователя или достигнут экстремум, то решение задачи прекращают.

В противном случае ставят новый план, в качестве которого выбирают *лучший* опыт реализованной задачи либо переходят к изучению области экстремума более сложными, чем линейная, моделями.

Пр и м е р. В решаемой в качестве примера задаче требовалось достичь твердости деталей 350 НВ. Ни в одном из опытов матрицы планирования этот уровень твердости достигнут не был. Поэтому производим крутое восхождение к области оптимума. Для этого выполняем перечень операций 1–3. Сводим полученные расчеты в таблицу 11.

Так как факторы b_2 и b_4 статистически незначимы, то надо решить, что делать с факторами X_2 и X_4 . Логика рассуждений здесь может быть различной, часто, например, в этом случае оставляют эти факторы на основном уровне. В нашем случае можно решить иначе. С учетом того, что по абсолютному значению коэффициент b_2 близок к нулю, оставляем значение фактора X_2 на основном уровне. Коэффициент b_4 близок к Δb , при-

чем имеет отрицательное значение, поэтому фактор X_4 оставляем на нижнем уровне.

Таблица 11 – Крутое восхождение к области оптимума

Характеристика	Факторы				Параметр оптимизации Y
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	2	3	4	5	6
b_i	+10,6	-0,6	+6,9	-5,6	
ΔX_i	25	50	50	10	
$b_i \cdot \Delta X_i$	+265,0	-	+345,0	-56,0	
Шаг	+7,7	-	+10,0	-1,6	
Округленный шаг	+8,0	-	+10,0	-1,5	
Опыты	12	808	150	360	30
	13	816	150	370	30
	14	824	150	380	30
	15	<u>832</u>	<u>150</u>	<u>390</u>	<u>30</u>
	16	840	150	400	30
	17	848	150	410	30

Теперь проводится процедура выбора шага для движения по факторам X_1 и X_3 . Допустим, шаг по температуре старения удобно выбрать равным 10 °С. Шаг по фактору X_1 должен быть выбран пропорционально с учетом произведения $b_1 \cdot \Delta X_1$. Вычисляем коэффициент пропорциональности, деля произведение $b_3 \cdot \Delta X_3$ на выбранный шаг. Он будет равен $345,0/10 = 34,5$. Делим 265,0 на 34,5 и получаем шаг для X_1 , равный +7,7. Для удобства округляем его до +8,0.

Рассчитываем условия проведения опытов крутого восхождения, добавляя шаг к основному уровню фактора.

Реализацию опытов крутого восхождения имеет смысл начинать с того опыта, в котором мы хотя бы по одному фактору выходим за исследованную область факторного пространства. В данном случае это опыт 15. Опыты 12–14 входят в уже исследо-

ванное факторное пространство, и их результаты могут быть рассчитаны по имеющейся модели этого пространства.

Нам повезло! Модель оказалась адекватной. Так бывает не всегда. Рассмотрим возможные выходы из ситуации, когда модель неадекватна.

4.3.9. Принятие решений при неадекватной модели

Умный в гору не пойдет – умный гору обойдет.

Народный фольклор

Вариантов решений – множество. Поэтому остановимся на нескольких, которые наименее трудоемки и дешевы. Для этого проведем хотя бы элементарный анализ того, что мы уже получили:

1) расчетный коэффициент Фишера значительно превышает критический. Это может быть потому, что большинство факторов не работает (коэффициенты b_i статистически незначимы), т.е. модель плохо описывает даже тот ограниченный участок поверхности отклика, который мы исследовали вначале.

Это может свидетельствовать о том, что:

- плохо выбрали нулевую точку (основной уровень);
- интервалы варьирования факторов слишком узки или широки;
- поверхность отклика не так проста, как казалось;

2) коэффициент Фишера близок к критическому.

Дела обстоят не так уж плохо. А теперь внимательно посмотрим на расчетные формулы, которые использовали, чтобы понять, что можно изменить, не производя дополнительных опытов или производя их минимум.

Изменим уровень значимости (α) – возьмем его более грубым (например 0,1 вместо 0,05). Изменяются критерий Стьюдента и соответственно доверительный интервал коэффициентов регрессии Δb_i . Возможно включение новых факторов, которые стали статистически значимы. Если это сработало, то следует смириться с тем, что модель грубее будет предсказывать моделируемый процесс. Надо только учесть, что изменится и критерий Фишера.

Можно перейти к более сложной модели – рассчитать коэффициенты взаимодействия. Для этого в матрице планирования следует перемножить соответствующие столбцы, допустим попарно, т.е. b_1b_2 , b_1b_3 и т.д., и получить их значения. Если какие-то из них окажутся значимыми, то включаем их в модель и снова ее проверяем.

Если два предыдущих варианта не сработали, то можно уточнить ошибку эксперимента S_Y^2 , проведя еще один-два опыта на основном уровне. Это дополнительные, но минимальные затраты. При этом изменится среднее значение параметра оптимизации \bar{Y}_0 и число степеней свободы f_1 , а значит, изменятся критерии Стьюдента и Фишера.

Если не получена адекватная модель, то ситуация усложняется, растут и затраты. Можно, например, пересмотреть заново весь эксперимент, изменить основной уровень, одновременно попытаться понять, почему не работают некоторые факторы, и расширить или сузить интервалы их варьирования. При переносе основного уровня, возможно, в качестве него стоит выбрать лучший опыт предыдущей серии.

Вероятны и другие варианты, но ограниченность издания не позволяет их рассмотреть. Подчеркнем лишь, что идея трансформации решаемой задачи заключается в том, чтобы не потерять ни крупицы уже имеющейся информации.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Всем нравится, когда то, что они читают, написано ясно и интересно, а не путано и скучно.

Дж. Сквайрс

Отчет пишут в прошедшем времени, множественном числе, безличной форме.

Оформление результатов научных исследований регламентировано ГОСТ 7.32–2002 «Отчет о научно-исследовательской работе» [2]. Отчет о НИР – научно-технический документ, который содержит исчерпывающие систематизированные сведения о выполненной работе. Ниже приведены и прокомментированы основные положения по оформлению отчета.

5.1. Структура отчета

Порядок оформления отчета следующий: титульный лист; список исполнителей; реферат; содержание; введение; литературный обзор; постановка задачи; экспериментальная часть, которая включает, в свою очередь, методику исследований, результаты исследований, анализ полученных результатов; заключение; список литературы (литературу), приложения. **Литературный обзор, методика и результаты исследований, специальные разделы могут делиться на подразделы и пункты.**

Список исполнителей дают, если их количество больше трех.

Форма титульного листа представлена на рисунке 10. Он является первым листом отчета, но не нумеруется. Следующие листы нумеруют с учетом титульного листа.

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Материаловедение в машиностроении»

УДК.....
№ гос. рег.....

«Утверждаю»
зав. кафедрой «МвМ»
_____ (Ф.И.О.)
«__» _____ 200__ г.

ОТЧЕТ

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДАМИ
Порошковой МЕТАЛУРГИИ НА БАЗЕ ЛЕГИРОВАННОГО
ЖЕЛЕЗНОГО ПОРОШКА»**

Руководитель НИР
доц., канд. техн. наук

(Ф.И.О.)
«__» _____ 200 г.

Исполнитель,
студент гр. _____

(Ф.И.О.)
«__» _____ 200 г.

Минск 200__

Рисунок 10 – Порядок оформления титульного листа отчета

Реферат составляют после полного оформления отчета. Его выполняют на втором листе. Реферат состоит из трех частей – количественных данных, ключевых слов и текста. Каждую часть начинают с абзаца, ключевые слова пишут заглавными буквами. Располагают их по важности, начиная с объекта исследования. Количество ключевых слов (словосочетаний) – от 5 до 15.

Ключевые слова должны в достаточной мере характеризовать содержание работы и обеспечивать возможность информационного поиска.

Текст реферата начинают с формулировки цели исследования, а затем кратко излагают суть выполненной работы. При этом следует помнить, что реферат должен заинтересовать потенциального заказчика, но **не должен** выдавать секретов технологии получения результатов, конечно, если они хоть по каким-то параметрам превосходят существующий уровень в данной области техники.

Общий объем реферата не должен превышать 850 знаков. При оформлении реферата отчета в качестве примера можно использовать реферат данного пособия (приложение 1), но необходимо помнить, что следует писать о *своей работе*.

Содержание должно включать все нумерованные части отчета. Порядок его оформления смотрите в содержании настоящего пособия.

Введение отчета должно содержать оценку современного состояния решаемой научно-технической проблемы и продемонстрировать актуальность темы исследований.

Основная часть отчета содержит литературный обзор, постановку задачи, экспериментальную часть. *Экспериментальная часть*, в свою очередь, должна содержать методику исследований, результаты исследований и их анализ. Заголовок «Основная часть» не пишут, а прямо после «Введения» помещают «Литературный обзор».

Литературный обзор – это *критический* обзор сведений, уже имеющихся в литературе по теме исследований.

Подробнее о его оформлении смотрите в разделе 1.

Постановка задачи должна включать обоснование *цели* исследований и вытекающих из нее *задач*. Постановка задачи либо завершает литературный обзор, либо ее дают отдельным разделом. По постановке задачи грамотный заказчик судит о компетентности исполнителя. Поэтому следует обратить внимание на четкость формулировки цели и каждой задачи.

Экспериментальная часть — главная часть отчета. В этом разделе подробно описывают построение исследования, полученные результаты, сделанные выводы. Начинается экспериментальная часть с описания методики постановки и проведения эксперимента. Эту часть отчета называют *методикой исследований* (см. раздел 4).

Методика исследований должна содержать краткое описание всех методов и методик исследования, измерений и расчетов, примененных в работе. Обязательно указывают методы оценки ошибок измерений и их величины. Подробное описание той или иной методики дают в том случае, если применяют оригинальный нестандартизованный метод исследований. В этом же подразделе приводят краткие сведения об использованной аппаратуре и классе точности (ошибках измерений) данных приборов. При использовании стандартов и других нормативных документов обязательны ссылки на них. Если стандарт дает возможность выбора, например, образца для проведения испытаний, то сделанный выбор должен быть **обоснован**. Напомним, что в госстандартах на испытания регламентируют количество образцов, измерений, порядок обработки результатов, их точность и т.д. (подробнее см. подраздел 2.3).

Результаты исследований. Сюда включают описание хода выполнения работы в целом и отдельных ее частей. Целесообразно при описании хода исследований начать с описания разработанной технологической схемы исследования (см. рисунок 2) и в дальнейшем руководствоваться ею. Затем идет текущий анализ всех полученных данных, методов их получения и обработки. Все расчеты можно не приводить, если их много, а привести пример расчета, остальные результаты дать в виде таблицы по ходу текста. В этом случае они могут быть дополнительно даны в приложениях. Здесь же приводят окончательные таблицы и иллюстрации и комментарии к ним.

Анализ результатов завершает этот раздел. В нем анализируют результаты, полученные по ходу выполнения всей работы.

Завершает отчет **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**, в котором даются ответы на вопросы, поставленные «Заказчиком» в техническом задании.

Если результат исследования сходится с тем, что ожидаешь, то это приятно, не сходится – интересно.

А. Белопольский

Заключение должно содержать краткие выводы по полученным результатам НИР; предложения по внедрению; оценку технико-экономической эффективности внедрения, народно-хозяйственную, экологическую либо научную ценность работы. Выводы не терпят многословия. Чем они короче, выразительнее и чем их меньше, тем лучше. В выводах, как и во всей работе, совершенно недопустимо искажение результатов или **умолчание об отрицательных**. В науке важны все результаты. Ибо **отрицательный** результат указывает, каким путем не следует идти в дальнейшем. Тем самым экономится труд и материальные ценности последующим исследователям данного вопроса.

Список использованных источников включает перечень всех литературных источников. Примеры оформления различных видов литературных источников приведены в подразделе 1.4. Также следует обратить внимание на оформление литературы в данном пособии.

Приложения включают вспомогательные материалы, использованные при выполнении работы, акты, протоколы, справочные таблицы и т.д.

5.2. Оформление текста отчета

Отчет оформляют на листах писчей бумаги форматом 298 × 210 мм с одной стороны листа, соблюдая поля (не менее): слева – 30, справа – 10, сверху, снизу – 20 мм. Рамка на листах не чертится.

Сокращение слов в отчетах – по ГОСТ 7.12–93. Целесообразно их вообще не сокращать. **Перенос слов в заголовках не допускается.**

Текст делят на разделы, подразделы, пункты. Заголовки выделяют следующим образом:

- делают отступ от предыдущего и последующего текста;
- заголовки разделов пишут **прописными** буквами, остальные строчными;
- заголовки нумеруют **арабскими** цифрами: *заголовки разделов* нумеруют **одной** цифрой; *подразделов* – **двумя**, из которых первая –

номер раздела; *пунктов* – **три**, из которых первая – номер раздела, вторая – подраздела;

- все заголовки располагают *с абзаца*;
- разделы начинают с новой страницы.

Реферат, содержание, введение, заключение, список использованных источников и приложения не нумеруют. Их заголовки пишут **прописными** буквами и отделяют от текста *отступами*; эти части отчета также помещают на отдельных листах отчета;

Страницы нумеруют арабскими цифрами по центру внизу листа.

Рекомендуем при оформлении отчета обращать внимание на оформление настоящего п о с о б и я. Не нумеруют, но учитывают титульный лист и реферат.

5.3. Оформление рисунков

Один рисунок лучше тысячи слов.

Китайская пословица

Инженерный язык – это прежде всего язык иллюстраций, позволяющий резко сократить описательный материал.

К рисункам относят собственно рисунки, схемы, чертежи, эскизы, графики, диаграммы, фотографии. Рисунок состоит из собственно рисунка, порядкового номера, названия и подрисуночной подписи (см. рисунок 3,б). Конкретно разновидность рисунка, если она не очевидна, оговаривают в его названии, например: Рисунок 3 – Схема прибора. Основными видами рисунков в материаловедческих исследованиях являются графики, диаграммы, фотографии. Остановимся подробнее на этих разновидностях.

Оформление рисунков частично описано в разделе 3. Здесь приведем некоторую дополнительную информацию.

Рисунки нумеруют арабскими цифрами. Нумерация – сквозная по всему отчету. Макет оформления их приведен на рисунке 3.

Стандарт рекомендует размещать рисунки и таблицы на **отдельных** листах, располагая их **сразу за ссылками** на них. При этом их можно группировать. Небольшие рисунки можно давать непосредственно в тексте, обязательно отделяя их от текста **отступами**.

Прочие рисунки, такие как чертежи и схемы изделий, должны быть выполнены в полном соответствии с правилами ЕСКД и ЕСТД.

5.3.1. Оформление графиков

Графики отражают функциональную зависимость одной величины от другой. К числу обязательных требований при выполнении графиков относят следующие:

- 1) нанесение всех экспериментальных точек;
- 2) заполнение (использование) всего поля рисунка, т.е. при необходимости начало осей координат надо перенести (рисунок 11);

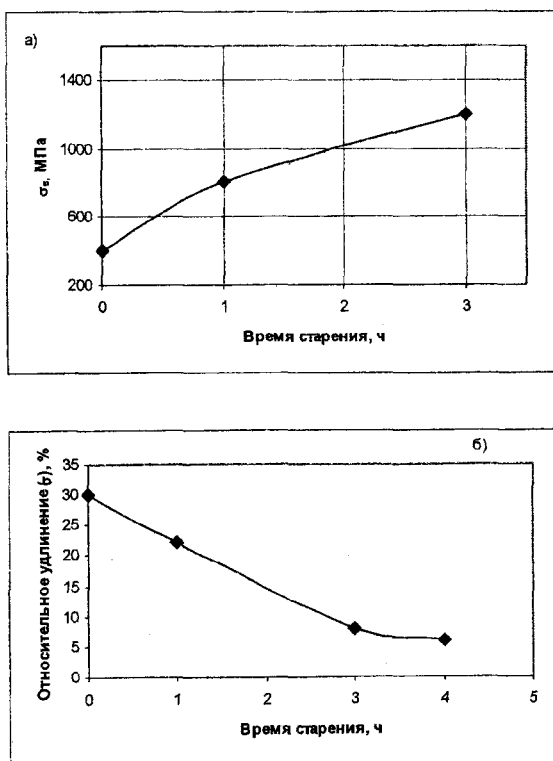


Рисунок 11 – Влияние старения на механические свойства бронзы БрБ2

3) проведение линии графика в виде плавной кривой между экспериментальными точками (метод графического усреднения результатов), так как большинство реальных (естественных) функций являются непрерывными. При этом следует лишь соблюсти условия проведения кривой в пределах поля ошибок экспериментальных точек. Если в пределах поля ошибок можно провести прямую линию, то ее и проводят.

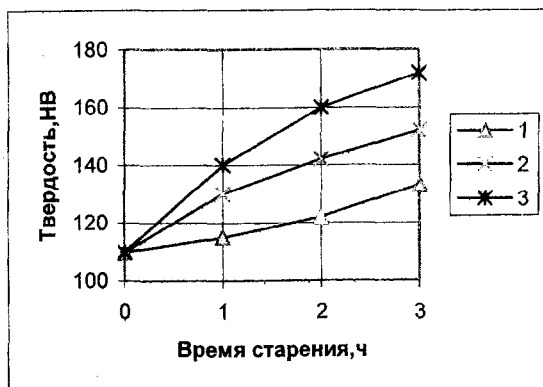
Остальные замечания носят характер рекомендаций. График лучше строить в виде рамки с сеткой (см. рисунок 11,а). Такая форма для использования удобнее, чем график, построенный с использованием лишь координатных осей (см. рисунок 11,б). Масштаб надо выбирать таким образом, чтобы экспериментальные точки не накладывались друг на друга. Толщину линий на графике целесообразно поддерживать примерно в следующем соотношении:

$$\text{сетка} : \text{рамка} : \text{функция} = 1 : 2 : 4.$$

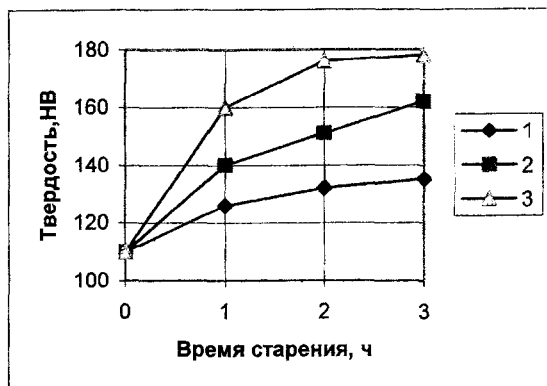
Пояснительные надписи на линиях функций допускаются, если число линий не больше двух. В противном случае линии следует нумеровать, а пояснения переносить в подрисуночные подписи (рисунок 12).

Если количество линий на графике велико и особенно если они пересекаются, то график разбивают на 2–3 части, сохранив для отдельных частей единый масштаб, разбивку сетки, обозначения осей и т.д. (рисунок 12). Часть обозначений можно поместить на поле графика. Это упростит подрисуночную подпись. Обозначения на осях лучше давать словами. Если они чересчур длинны, то следует их давать условными обозначениями, если эти обозначения международные или гостированные, например σ_v . При длинных цифровых записях в обозначениях на осях надо вводить десятичные множители (например, Рисунок 12 – Производство стали, $\cdot 10^7_T$).

Если экспериментальные значения отличаются на несколько порядков, то их удобнее представить в виде логарифмов соответствующих величин, а для построения графиков воспользоваться полулогарифмической или логарифмической осью (осями).



а



б

а – сплав Д16; б – сплав В95;

1, 2, 3 – соответственно температуры старения 20, 200, 250 °С

Рисунок 12 – Влияние старения на твердость алюминиевых сплавов

Графические схемы отличаются от графиков тем, что они отражают общий **качественный** характер зависимости и поэтому не содержат конкретных экспериментальных данных, а следовательно, таких элементов оформления графиков, как разбивка сетки, обязательное приведение экспериментальных точек и единиц измерений. Остальные требования сохраняются.

5.3.2. Оформление диаграмм

Диаграммы служат для отражения **нефункциональных** (скрытых функциональных) зависимостей. Чаще всего в материаловедении используют линейные (рисунок 13) и столбиковые (ленточные) (рисунок 14) диаграммы.

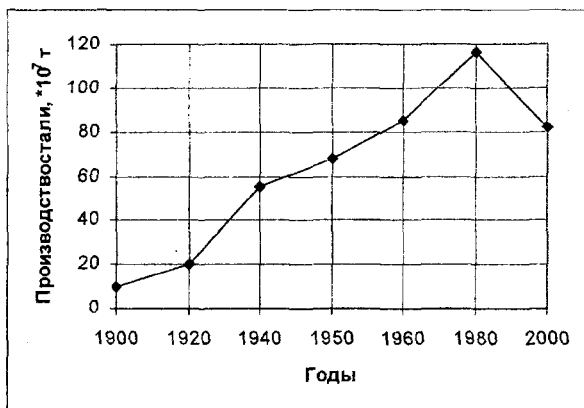
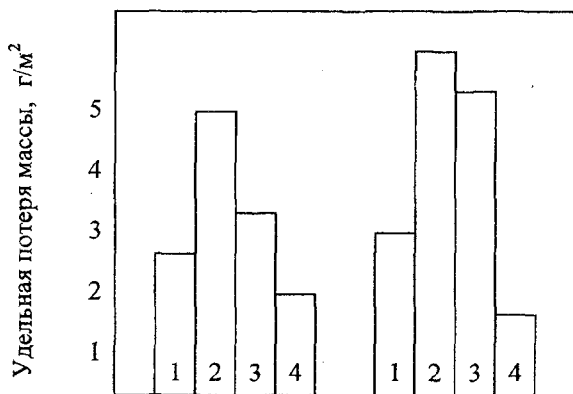


Рисунок 13 – Мировое производство стали в XX веке



1 – гальваническое хромирование; 2 – борирование;
3 – силицирование; 4 – диффузионное хромирование

Рисунок 14 – Коррозионная стойкость стали 20, защищенной покрытиями

Линейные диаграммы напоминают графики и поэтому имеют во встроенном модуле построения диаграмм MS Graph названия **график**

и **точечная** диаграмма. Требования к их оформлению в основном совпадают. Принципиальное отличие в оформлении заключается в том, что экспериментальные точки нужно соединять **ломаными** линиями.

Столбиковые диаграммы называются **гистограммы**. Их довольно часто строят для иллюстрации результатов коррозионных испытаний, испытаний на жаростойкость и т.д., если результаты трудно представить в виде графиков, а также для удобства сравнения большого количества результатов, полученных при фиксированном значении условий испытаний, например, чтобы отразить результаты испытаний в различных средах, для материалов разных классов и т.д. (см. рисунок 14).

5.4. Оформление формул

Приводимые в отчете формулы и уравнения оформляют в соответствии с ГОСТ 7.32–2002 [2]. Формулы располагают в тексте, отделяя отступами. Нумерация – сквозная по всему отчету. Номер размещают в крайнем правом положении, помещая его в круглые скобки. Примеры оформления см. в разделе 3 настоящего пособия. Для вставки формул используется специальный редактор формул MS Equation или MathType. В меню **Формат** выбирается команда **Объект**, затем в новом открывающемся списке – **MS Equation**.

5.5. Оформление таблиц

Экспериментальные и расчетные численные данные представляют в виде окончательных таблиц. Таблицы должны иметь сквозную нумерацию арабскими цифрами по всей записке. В тексте на таблицу должна быть ссылка, например «данные расчетов приведены в таблице 3», сразу за которой и размещают таблицу. Таблицы предпочтительно располагать на отдельных страницах, небольшие таблицы можно располагать по тексту, отделяя их от текста отступами. Если таблица не помещается на одной странице, то под ее головкой размещают горизонтальную графу с нумерацией вертикальных граф. В этом случае на следующей странице пишут «Продолжение таблицы ... », а вместо головки помещают только горизонтальную графу с номерами вертикальных граф (см. табл. П1).

Остальные требования подробно изложены в подразделе 3.4 настоящего пособия.

6. СИМПЛЕКС-ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Балаганов с уважением посмотрел на треугольник. Доводы Паниковского показались ему не особенно убедительными, но в треугольнике чувствовалась такая правдивая безнадежность, что Балаганов поколебался.

И. Ильф и Е. Петров. Золотой теленок

Наряду с уже описанным методом МПЭ (Бокса–Уилсона) хорошо оправдали себя при решении металлургических задач методы симплекс-планирования.

Симплекс – простейшая выпуклая геометрическая фигура, образованная множеством $(k + 1)$ точек в k -мерном пространстве и обладающая минимальным количеством вершин. *Вершины* – точки, образующие симплекс.

Авторы надеются, что уже усвоено, что для реализации любой научно-исследовательской задачи существуют два пути. Первый заключается в том, что последовательно решают два ее этапа:

- изучение механизма явления;
- целенаправленный поиск оптимального решения на основе установленного механизма явления.

Такой путь фундаментален и обещает большой процент успеха. Плохо только, что заранее придется смириться с тем, что ждать скорого результата неразумно из-за чрезвычайной трудоемкости такого пути.

К сожалению, в современном мире постоянный дефицит времени часто не дает роскоши идти этим путем. Методы симплекс-планирования позволяют сделать иначе – вести поиск оптимума без выяснения механизма с использованием регулярной процедуры, определяемой матрицей планирования. В данном случае реализуется принцип *черного ящика*, введенный в кибернетику Н. Винером [20] с целью показать, что оптимальное управление возможно и при неполной информации об объекте исследования.

6.1. Последовательное симплекс-планирование

Я скачу, но я скачу иначе –
По камням, по лужам, по росе.
Бег мой назван иноходью – значит:
По-другому, то есть – не как все.

В. Высоцкий. Бег иноходца

Последовательное симплекс-планирование (ПСП) в некотором роде можно считать переходным между методами симплекс-планирования и Бокса–Уилсона.

ПСП–метод нахождения экстремума функции, основанный на шаговом движении, путем *последовательного* отображения вершины регулярного симплекса в *факторном пространстве*. Главный его принцип – изучение поверхности отклика с одновременным движением по ней [21].

Продemonстрируем тактику метода на примере простого симплекса с тремя вершинами ($k = 3$). Следовательно, изучаемое факторное пространство будет двумерным и количество факторов тоже два. Задачу последовательно решают так (рисунок 15):

- в факторном пространстве X_1 – X_2 выбирают положение исходного симплекса, т.е. положение трех первых экспериментальных точек (1–2–3), образующих равносторонний треугольник;
- проводят три опыта в них определяют значение параметра оптимизации и выбирают **худший**;
- допустим, что это опыт 1;
- делаем его зеркальное отражение вокруг оси 2–3 и получаем точку 4 и соответственно формируем новый симплекс (2–3–4);
- движение по поверхности отклика продолжается до тех пор, пока симплекс не начинает вращаться вокруг точки 12 – закоривается, что является признаком достижения области оптимума.

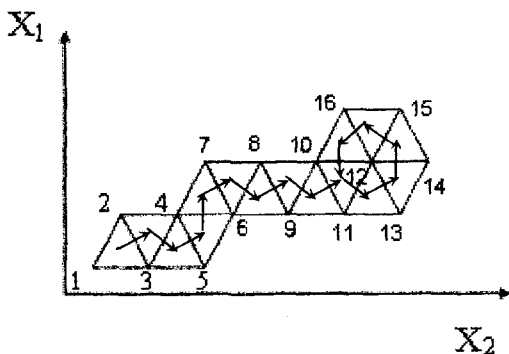


Рисунок 15 – Схема последовательного симплекс-планирования

Отметим основные особенности и достоинства метода ПСП:

- элементарная простота, которая в данном случае выражается в том, что не производилось никаких вычислений, а просто делался очередной опыт и вращался симплекс;

- заметим, что и при симплексах большего порядка формулы для расчета положения новой точки (опыта) чрезвычайно просты;

- вся предыдущая информация сохраняется: в новом симплексе появляется только одна новая точка, остальные берут из предыдущего;

- цепочка симплексов, хотя и, подобно альпинисту, перемещается зигзагом, но все же по пути, близкому к градиенту и, значит, – вершине (оптимуму);

- четкое указание на окончание процедуры исследования (достижения экстремума) – заякоривание симплекса;

- на взгляд авторов, **главное** достоинство заключается в том, что при этом методе *параметр оптимизации* может быть **качественным**, т.е. сравнение может быть по принципу «лучше–хуже», что совершенно невозможно при других методах МПЭ.

В заключение укажем, что ПСП было предложено в 1962 г. [21].

6.2. Построение диаграмм «состав–свойство» с помощью симплексных решеток

6.2.1. Диаграммы «состав–свойство»

Н. Курнаков и Матиссен в конце XIX века для двойных диаграмм состояния (ДС) системы сплавов обосновали существование вполне

определенных, соответствующих данному типу ДС диаграмм «состав–свойство» (ДСС) (рисунок 16).

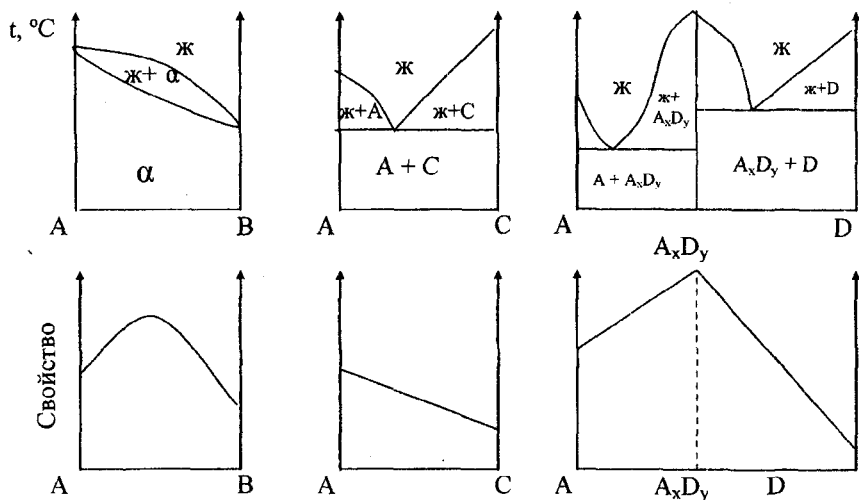


Рисунок 16 – Типичные ДС и соответствующие им диаграммы «состав–свойство»

Это утверждение базировалось на общей схеме материаловедения (см. рисунок 1). Таким образом они создали возможность построения для любой двойной ДС качественных зависимостей структурно-чувствительных свойств сплавов от их состава. Но если попробовать построить подобные зависимости хотя бы для трехкомпонентной системы, то задача сразу же резко усложняется, особенно если и сама ДС еще не существует.

При такой ситуации есть два пути решения задачи.

Первый состоит из двух этапов:

- построение диаграммы состояния и подробное изучение структур типичных сплавов;
- построение конкретной ДСС.

Второй путь заключается в том, что ДСС строят сразу, без предварительного построения ДС, что весьма трудоемко. Такая схема гораздо проще, но в случае возникновения неясных зависимостей, их объяснение потребует вернуться к первому варианту.

При планировании эксперимента на диаграммах «состав–свойство» задачи формулируются обычно как задачи описания, т.е. це-

лью исследования является получение уравнений (моделей) зависимости свойств сплавов от концентрации исходных компонентов.

Для решения подобных задач существует целый ряд планов, объединенных одним принципом, – экспериментальные точки располагают симметрично на симплексе. Очень подробно эти методы описаны в монографии [22]. Пионером в построении диаграмм «состав–свойство» с помощью так называемых *симплекс-решетчатых планов* был Шеффе [23].

Во второй половине XX века начали интенсивно строить тройные диаграммы состояния металлических систем. Рассмотрим применение планов Шеффе для построения соответствующих им ДСС, так как в данном случае использование метода можно продемонстрировать очень наглядно. Кстати, в последние годы таких тройных ДСС было построено десятки, если не сотни. При этом можно воспользоваться планами, которые представлены, например, на рисунке 17.

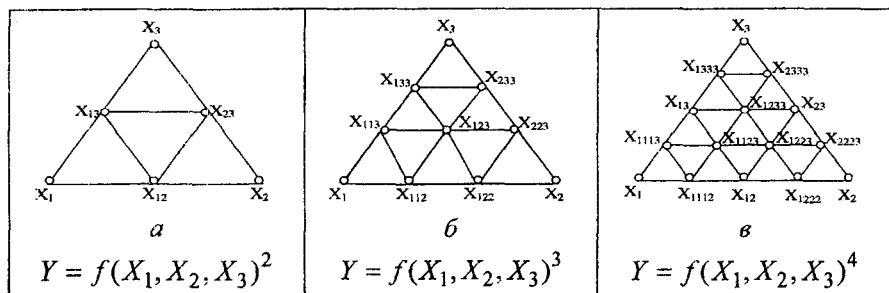


Рисунок 17 – Симплекс-решетчатые планы (Шеффе) для построения в трехкомпонентных системах моделей второй (а), третьей (б) и четвертой степени (в)

В качестве примера построим модель третьей степени. Через X обозначены смесевые переменные, которые в любой точке симплекса подчиняются условию

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1 \text{ (100 \%)}.$$

Через Y_i обозначаем значения параметра оптимизации. Проводим 10 опытов согласно плану б в узлах симплекса и получаем отклики – значения Y_i . Строим модель эксперимента в виде полинома:

$$\begin{aligned}
 Y = & B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_{12} X_1 X_2 + B_{13} X_1 X_3 + \dots + \\
 & + B_{23} X_2 X_3 + \gamma_{12} X_1 X_2 (X_1 - X_2) + \gamma_{13} X_1 X_3 (X_1 - X_3) + \dots + \\
 & + \gamma_{23} X_2 X_3 (X_2 - X_3) + \gamma_{123} X_1 X_2 X_3 + B_{123} X_1 X_2 X_3.
 \end{aligned}$$

Коэффициенты полинома определяем по следующим формулам:

$$B_1 = Y_1, \quad B_2 = Y_2, \quad B_3 = Y_3, \quad B_{12} = \frac{9}{4}(Y_{112} + Y_{122} - Y_1 - Y_2),$$

$$B_{13} = \frac{9}{4}(Y_{113} + Y_{133} - Y_1 - Y_3), \quad B_{23} = \frac{9}{4}(Y_{223} + Y_{233} - Y_2 - Y_3),$$

$$\gamma_{12} = \frac{9}{4}(3Y_{112} + 3Y_{122} - Y_1 - Y_2), \quad \gamma_{13} = \frac{9}{4}(Y_{113} + Y_{133} - Y_1 - Y_3),$$

$$\gamma_{23} = \frac{9}{4}(Y_{233} + Y_{233} - Y_2 - Y_3),$$

$$B_{123} = 27Y_{123} - \frac{27}{4}(Y_{112} + Y_{122} + Y_{113} + Y_{223} + Y_{233}) + \frac{9}{2}(Y_1 + Y_2 + Y_3).$$

Легко заметить, что расчеты коэффициентов модели элементарны. Надо просто подставить в соответствующую формулу значения параметра оптимизации в данной узловой точке. Они зашифрованы индексами, которые показывают, например, что X_{112} означает, что это точка симплекса, в которой $2/3X_1, 1/3X_2, 0X_3$.

Приведенные планы (см. рисунок 17) являются *насыщенными*, т.е. число экспериментальных точек в них равно количеству искомым коэффициентов модели. В такой ситуации следующий этап – проверка адекватности полученной модели – усложняется, так как для этого не остается степеней свободы. Выходы из создавшегося положения могут быть различными:

– первый заключается в том, что контрольные опыты ставят в используемом плане. Разумно, если дополнительные опыты располагают так, чтобы они входили в план более высокого порядка в качестве основных экспериментальных точек. Тогда, если модель окажется неадекватной, можно перейти к построению модели этого

плана, обладая большей частью необходимой экспериментальной информации;

– другой путь состоит в том, что часть опытов дублируют, иногда все опыты плана. Подробно различные варианты проверки адекватности моделей описаны в монографии Ф. Новика [22]. Там же приведен ряд примеров использования симплекс-симметричных планов для построения реальных ДСС.

Если искомая модель оказалась адекватной, можно переходить к следующему этапу – интерпретации модели. Сложность заключается в том, что поверхность отклика в данном случае является пространственной, что весьма неудобно при ее использовании. Из данного положения можно выйти, используя модель для построения изолиний в симплексном треугольнике по аналогии с изотермическими (горизонтальными) разрезами в тройных ДС.

6.2.2. Примеры применения симплексных решеток

Авторы работы [24] использовали описанный метод при изучении свойств диффузионных слоев, полученных насыщением из системы окислов $TiO_2 - Cr_2O_3 - V_2O_5$, на твердом сплаве Т15К6 (рисунок 18).

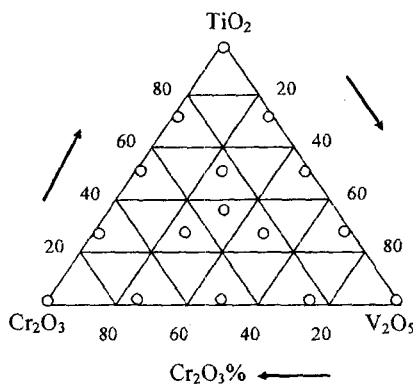
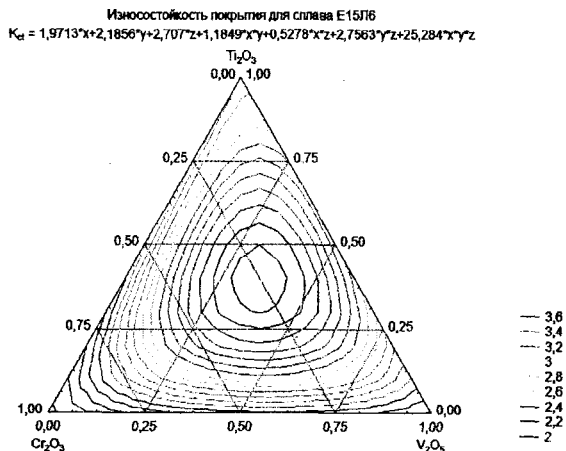


Рисунок 18 – План проведения эксперимента на сплаве Т15К6

Параметрами оптимизации являлись коэффициент стойкости инструментов (отношение времени работы твердосплавных пластин с диффузионным покрытием ко времени работы тех же пластин без

покрытия) и микротвердость диффузионного слоя. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на инденторе 0,1 кг. Коэффициент стойкости определяли на токарном станке при следующих параметрах резания: $t = 1$ мм, $S = 0,2$ мм/об, $V =$ мм/мин.

Результаты экспериментов, полученные в работе [26], обработаны программой Statistica и представлены на рисунке 19.



a – коэффициент износостойкости; b – микротвердость диффузионного слоя

Рисунок 19 – Примеры построения линий равных уровней свойств в программе Statistica

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Порядок проведения патентных исследований: ГОСТ 15.011–82. – М.: Изд-во стандартов, 1984.
2. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления: ГОСТ 7.32–2002. – М.: Изд-во стандартов, 2002.
3. Стали. Чугуны // Машиностроение: энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. II-2.
4. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы // Машиностроение: энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. II-3.
5. Технология заготовительных производств // Машиностроение: энциклопедия. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. III-2.
6. Технология изготовления деталей машин // Машиностроение: энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. III-3.
7. Машиностроение: терминологический словарь. – М.: Машиностроение, 1995.
8. Библиографическое описание документа: ГОСТ 7.1–2003. – М.: Изд-во стандартов, 2003.
9. Штремель, М.А. Разработка схемы эксперимента / М.А. Штремель. – М.: МИСиС, 1974.
10. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф.С. Новик. – М.: МИСиС, 1979.
11. Статистические методы анализа экспериментальных оценок / Д.С. Шмерлинг [и др.]. – М.: Наука, 1977.
12. Каталог технических нормативных правовых актов: в 4 т. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2007.
13. Термодиффузионное упрочнение и защита металлических изделий: ГОСТ 28426–90. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
14. Единицы физических величин: ГОСТ 8.417–2002. – М.: Изд-во стандартов, 2002.
15. Представление численных данных о свойствах веществ и материалов в научно-технических документах: ГОСТ 7.54–88. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
16. Общие требования к текстовым документам: ГОСТ 2105–95. – М.: Изд-во стандартов, 1995.

17. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – 3-е изд., испр. и доп. – Л.: Наука, 1968.
18. Статистические методы обработки экспериментальных данных: рекомендации / под ред. ВНИИМаш. – М.: Изд-во стандартов, 1978.
19. Штремель, М.А. Как написать отчет об исследовании / М.А. Штремель. – М.: МИСиС, 1977.
20. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – М.: Советское радио, 1958.
21. Новик, Ф.С. Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем / Ф.С. Новик. – М.: Metallurgia, 1985.
22. Шефе, Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Физматгиз, 1963.
23. Должанский, Ю.М. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации свойств сплавов / Ю.М. Должанский, Ф.С. Новик, Т.А. Чемлева. – М.: ОНТИ, 1974.
24. Применение ЭВМ для расчета термодинамических характеристик и параметров ХТО: в 2 ч. / Л.Г. Ворошнин [и др.]. – Минск, 1985. – Ч. 1: Построение диаграмм «состав–свойство» с использованием симплексных решеток.

РЕФЕРАТ

С. __, рис. __, табл. __, исп. ист. __.

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА, ЭКСПЕРИМЕНТ, ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ, ПАССИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ.

Цель данного пособия – помочь студентам освоить приемы постановки инженерного эксперимента, его организации и проведения, обработки полученных результатов и их оформления.

В пособии последовательно рассмотрены основные этапы инженерного эксперимента: предварительная организация эксперимента, поиск информации по теме исследований, статистическая обработка текущих и окончательных результатов, оформление результатов в отчете о научно-исследовательской работе.

Рассмотрены некоторые методы пассивного и активного эксперимента, достаточно широко применяемые при решении металлургических задач, и методика их использования. Приведены необходимые статистические таблицы и перечень наиболее широко используемых в металлургии государственных стандартов.

Таблица П1 – Перечень часто употребляемых в материаловедении государственных стандартов

Номер	Название стандарта
1	2
7564–97	Сталь. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов, механических и технологических испытаний
8233–56	Сталь. Эталоны микроструктуры
1778–70	Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений
10243–75	Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры
25536–82	Металлы. Масштабы изображений на фотоснимках при металлографических методах исследования
18295–72	Обработка упрочняющая. Термины и определения
19905–74	Упрочнение металлических изделий поверхности химико-термической обработкой. Состав общих требований
20495–75	Упрочнение металлических деталей поверхностной химико-термической обработкой. Характеристики и свойства диффузионного слоя. Термины и определения
28426–90	Термодиффузионное упрочнение и защита металлических изделий. Общие требования к технологическому процессу
380–94	Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки и технические требования
1050–88	Прокат сортовой калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия
4543–71	Сталь легированная конструкционная. Технические условия
5632–72	Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки и технические требования
801–78	Сталь подшипниковая. Технические условия
10994–74	Сплавы прецизионные. Марки

1	2
1435-90	Сталь нелегированная инструментальная. Технические условия
5210-95	Сталь инструментальная для напильников, рашпилей, зубил и крейцмейселей. Технические условия
1412-85	Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки
1215-79	Отливки из ковкого чугуна. Общие технические условия
7393-85	Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки
1585-85	Чугун антифрикционный для отливок. Марки
28394-89	Чугун с вермикулярным графитом для отливок. Марки
5657-69	Сталь. Методы испытания на прокаливаемость
5272-68	Коррозия металлов. Термины
6032-89	Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии
6130-71	Металлы. Методы определения жаростойкости
21910-76	Металлы. Характеристики жаростойкости. Наименование, определения, расчетные формулы и единицы величин
17367-71	Металлы. Метод испытаний на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы
25.503-97	Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на сжатие
1497-84	Металлы. Методы испытания на растяжение
9651-84	Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах
10145-81	Металлы. Метод испытаний на длительную прочность
14019-80	Металлы и сплавы. Методы испытаний на изгиб
9454-78	Металлы. Методы испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах
9012-59	Металлы. Методы испытаний. Измерение твердости по Бринеллю
9013-59	Металлы. Методы испытаний. Измерение твердости по Роквеллу

1	2
22975–78	Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по супер-Роквеллу)
2999–75	Металлы. Метод измерения твердости алмазной пирамидой по Виккерсу
9450–76	Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников
10145–81	Металлы. Метод испытания на длительную прочность
1150–84	Металлы. Метод испытания на растяжение при пониженных температурах
8.064–94	Государственная поверочная схема для средств и измерений твердости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла
1583–93	Сплавы алюминиевые литейные
4785–97	Алюминий и сплавы алюминиевые деформированные
859–78	Медь. Марки
5017–74	Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением. Марки
613–79	Бронзы оловянистые литейные
19738–74	Припой серебряные. Марки
21931–76	Припой оловянно-свинцовые в изделиях. Технические условия
23137–78	Припой медно-цинковые. Марки
493–79	Бронзы безоловянные литейные. Марки
15527–70	Латуни, обрабатываемые давлением. Марки
17711–80	Латуни литейные. Марки
18175–78	Бронзы безоловянные, обрабатываемые ОМД
3882–74	Сплавы твердые спеченные. Марки
26530–85	Сплавы твердосплавные безвольфрамовые. Марки
11069–74	Алюминий первичный. Марки
19807–91	Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки
26719–85	Материалы антифрикционные порошковые на основе меди. Марки
26802–86	Материалы антифрикционные порошковые на основе железа. Марки
492–73	Никель, сплавы. Марки
19241–80	Никель и низколегированные никелевые сплавы. Марки

1	2
2856-79	Сплавы магниевые литейные
14957-76	Сплавы магниевые деформируемые
25140-82	Сплавы цинковые литейные. Марки
14113-78	Сплавы алюминиевые антифрикционные. Марки
3594.6-93	Глины формовочные огнеупорные. Метод определения предела прочности при сжатии в сухом состоянии
3594.15-93	Глины формовочные огнеупорные. Метод определения потери массы при прокаливании
23409.6-78	Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения газопроницаемости
23409.7-78	Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе
9391-80	Сплавы твердые спеченные. Методы определения микроструктуры
18227-85	Материалы порошковые. Метод испытания на растяжение
18228-94	Материалы металлические спеченные, кроме твердых сплавов. Определение предела прочности при конечном изгибе
19440-94	Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Часть 1. Метод использования воронки. Часть 2. Метод волюмометра Скотта
20017-74	Сплавы твердые спеченные. Метод определения твердости по Роквеллу
25280-90	Порошки металлические. Метод определения уплотняемости
25283-93	Материалы спеченные проницаемые. Определение проницаемости жидкостей
25698-83	Порошковые изделия. Методы определения прочности
26528-85	Материалы порошковые. Метод испытания на ударный изгиб
26849-86	Материалы порошковые. Метод определения величины пор

Таблица П2 – Оценка подозрительных результатов измерений (опытов) [8]

Число измерений (опытов)	Вероятность β при уровне значимости α		
	0,10	0,05	0,01
3	1,41	1,41	1,41
4	1,65	1,69	1,72
5	1,79	1,87	1,96
6	1,89	2,00	2,13
7	1,97	2,09	2,27
8	2,04	2,17	2,37
9	2,10	2,24	2,46
10	2,15	2,29	2,54
11	2,19	2,34	2,61
12	2,23	2,39	2,66
13	2,26	2,43	2,71
14	2,30	2,46	2,76
15	2,33	2,49	2,80
16	2,35	2,52	2,84
17	2,38	2,55	2,87
18	2,40	2,58	2,90
19	2,43	2,60	2,93
20	2,45	2,62	2,96
21	2,47	2,64	2,98
22	2,49	2,66	3,01
23	2,50	2,68	3,03
24	2,52	2,70	3,05
25	2,54	2,72	3,07

Примечание. Если вычисленное значение относительного отклонения v_{\max} меньше табличного, то отбрасывать измерение не надо.

Таблица ПЗ – Критические значения коэффициента корреляции для разных уровней значимости

Число степеней свободы f	Уровни значимости α		
	0,10	0,05	0,01
1	0,988	0,997	1,000
2	0,900	0,950	0,990
3	0,805	0,878	0,959
4	0,729	0,811	0,917
5	0,669	0,754	0,874
6	0,621	0,707	0,834
7	0,582	0,666	0,798
8	0,549	0,632	0,765
9	0,521	0,602	0,735
10	0,497	0,576	0,708
11	0,476	0,553	0,684
12	0,457	0,532	0,661
13	0,441	0,514	0,641
14	0,426	0,497	0,623
15	0,412	0,482	0,606
16	0,400	0,468	0,590
17	0,389	0,456	0,575
18	0,378	0,444	0,561
19	0,369	0,433	0,549
20	0,360	0,423	0,537
40	0,257	0,304	0,393
50	0,231	0,273	0,354
100	0,164	0,195	0,254

Таблица П4 – Некоторые дробные реплики

Количество факторов	Дробная реплика	Опыты реплики
3	2^{3-1}	abc, c, a, b
4	2^{4-1}	(1), ab, ac, ad, bc, bd, cd, abcd
	2^{4-1}	a, b, c, d, abd, acd, abc, bcd
5	2^{5-2}	(1), ab, cd, ace, bce, ade, bde, abcd
	2^{5-1}	(1), ab, acde, bcde, ac, bc, d e, abde, ae, be, cd, abcd, ad, bd, ce, abce
6	2^{6-3}	(1),acf ad e, bce, bqf, abcd, abef, cdef
	2^{6-2}	(1), abce, abdf, cd ef, acd, aef, bcf, ad e, ab, ce, df, abcd ef, acf, ade, bcd, bef
7	2^{7-3}	(1), efq, abcd, abcd efq, abq, cdq, abef, cdef, acf, bdf, aceq, bdeq, ade, bce, dfq, bcfq

Таблица П5 – Критические значения f -критерия (критерия Стьюдента)

Число степеней свободы f	Уровень значимости α		
	0,1	0,05	0,01
1	6,31	12,70	63,66
2	2,92	4,30	9,93
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	1,90	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	1,80	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	1,75	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	1,73	2,08	2,85
21	1,72	2,08	2,83
22	1,72	2,07	2,82
23	1,71	2,07	2,81
24	1,71	2,06	2,80
25	1,71	2,06	2,79
26	1,71	2,06	2,78
27	1,70	2,05	2,77
28	1,70	2,05	2,76
29	1,70	2,05	2,76
30	1,70	2,04	2,75
∞	1,64	1,96	2,58

Таблица П6 – Значения критерия Фишера F для уровней значимости (0,1 – верхняя; 0,05 – средняя; 0,01 – нижняя строка)

Число степеней свободы в знаменателе f_1	Число степеней свободы в числителе f_2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	40,0	50,0	53,6	55,8	57,2	58,2	59,0	59,4	59,7	60,2
	161,0	200,0	216,0	225,0	230,0	234,0	237,0	239,0	241,0	242,0
	4052,0	4999,0	5403,0	5625,0	5764,0	5859,0	5981,0	5928,0	6022,0	6056,0
2	8,5	9,0	9,2	9,2	9,3	9,3	9,4	9,4	9,4	9,4
	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4
	98,5	99,0	99,2	99,2	99,3	99,3	99,3	99,4	99,4	99,4
3	5,5	5,5	5,4	5,3	5,3	5,3	5,3	5,2	5,2	5,2
	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,8	8,9	8,8	8,8	8,9
	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,7	27,3	27,3	27,2
4	4,5	4,3	4,2	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,9
	7,7	6,6	6,6	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0	6,0	6,0
	21,2	18,0	16,7	16,0	15,6	15,5	15,0	14,8	14,7	14,5
5	4,1	3,8	3,6	3,5	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	3,3
	6,6	5,8	5,4	5,2	5,0	5,0	4,9	4,8	4,8	4,7
	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	10,4	10,3	10,2	10,0
6	3,8	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9
	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,2	4,2	4,1	4,1
	13,7	10,9	10,0	9,2	8,8	8,5	8,3	8,1	8,0	7,9
7	3,6	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7
	6,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,8	3,7	3,7	3,6
	12,2	9,6	8,4	7,8	7,5	7,2	7,0	6,8	6,7	6,6

Окончание таблицы П6

Число степеней свободы в знаменателе f_1	Число степеней свободы в числителе f_2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	3,5	3,1	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5
	5,5	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3
	11,3	8,6	7,6	7,0	6,6	6,4	6,2	6,0	5,9	5,8
9	3,4	3,0	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4
	5,1	8,0	7,0	6,4	6,1	5,8	5,6	5,5	5,4	5,1
	10,6	8,0	7,0	6,4	6,1	5,8	5,6	5,5	5,4	5,3
10	3,3	2,9	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3
	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0
	10,0	7,6	6,6	6,0	5,6	5,4	5,2	5,1	5,0	4,8

Учебное издание

ПРОТАСЕВИЧ Георгий Федорович
МЕЛЬНИЧЕНКО Владимир Викторович
СМЕТКИН Валерий Александрович
МИХЛЮК Анатолий Игнатъевич

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей

1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка»
и 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»

В 2 частях

Часть 1

Редактор Т.Н. Микулик
Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

Подписано в печать 29.01.2009.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 5,41. Уч.-изд. л. 4,23. Тираж 100. Заказ 4.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.