

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра химии, технологии электрохимических производств  
и материалов электронной техники**

# **ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**Контрольные задания к практическим занятиям  
для студентов специальности 1-48 01 04  
«Технология электрохимических производств»**

Минск 2013

УДК 001.891+001.895](075.4)  
ББК 73:35.35я73  
О-75

Рассмотрены и рекомендованы редакционно-издательским советом университета

С о с т а в и т е л ь  
*В. Г. Матыс*

Р е ц е н з е н т  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры физики БГТУ *В. В. Поплавский*

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2013 год. Поз. 101.

Предназначены для студентов специальности 1-48 01 04 «Технология электрохимических производств».

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2013

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Издание предназначено для студентов IV курса специальности 1-48 01 04 «Технология электрохимических производств» для самостоятельной работы и проведения практических занятий по дисциплине «Основы научных исследований и инновационной деятельности».

Эффективное функционирование современного электрохимического производства невозможно без его систематического технического перевооружения. Последнее в свою очередь базируется на достижениях науки и техники. При этом элементы научного исследования все в большей мере входят в инженерную деятельность, так как разработка новых технологических процессов, расчет и проектирование оборудования для их реализации и, наконец, внедрение достижений науки в производство требуют постоянного поиска новых идей, проведения исследований работы аппаратов и технологических линий, выбора оптимальных параметров и режимов проведения процессов. Поэтому инженеру-технологу в области электрохимических производств необходимо владеть методикой научного поиска, уметь ставить задачи исследования, знать методы и средства измерения параметров электрохимических систем, обладать навыками проведения эксперимента, обработки, анализа и обобщения результатов исследования, владеть теорией принятия инженерных решений. Не меньшее значение в современном мире имеет инновационная деятельность как в области научных исследований, так и в технологическом производстве. Для успешного функционирования электрохимического производства необходим постоянный поиск, внедрение и адекватная оценка потенциала новых технологий, материалов, новых форм управления производством.

Представленные в издании контрольные задания помогут студентам в изучении вопросов дисциплины, а преподавателю – в проведении практических занятий.

# 1. ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1. Методологические основы научного познания и творчества

### Контрольные вопросы

1. Понятие о науке. В чем заключается многозначность этого понятия?
2. Классификация наук на основе специфических особенностей изучаемых объектов материального мира. Проблема классификации наук.
3. Классификация естественных, технических, гуманитарных и социальных наук.
4. Наука и псевдонаука. Принципиальные признаки науки как системы знаний.
5. Понятие научного знания и его отличительные признаки.
6. Познание. Связь познания и практики. Относительность познания.
7. Абсолютное и относительное научное знание.
8. Уровни познания.
9. Элементы чувственного познания.
10. Абстрактное мышление как форма рационального познания. Типы мышления.
11. Структурные элементы мышления.
12. Классификация понятий.
13. Классификация понятий по признаку отношений между ними. Объем и содержание понятия.
14. Определение понятия и его признаки.
15. Классификация суждений.
16. Классификация умозаключений.
17. Общие этапы научного исследования. Научная идея. Гипотеза.
18. Закон, его доказательство и парадоксы.
19. Законы формальной логики.
20. Теория и ее структура.
21. Творчество как высшая форма мышления. Понятие научно-технического творчества.
22. Логика и интуиция в научно-техническом творчестве.
23. Мотивационная структура творчества.

24. Воображение как наиболее важный для творчества вид мышления. Виды воображения.
25. Факторы, отрицательно влияющие на творческое мышление.
26. Системный подход к исследованию технических объектов.
27. Противоречия в технических системах как движущая сила постановки и решения технических задач.
28. Морфологический анализ технического объекта.
29. Ассоциативные и психологические методы активизации творческого мышления.

## **1.2. Информационный поиск**

### **1.2.1. Системы поиска научно-технической и патентной информации в сети Интернет**

Список научных журналов и электронных адресов для поиска информации в области электрохимии:

1. Электрохимия. 12 раз в год. Электронные версии на русском языке доступны через <http://elibrary.ru>. Полные тексты – платно; рефераты – бесплатно начиная с 2005 г.
2. Журнал прикладной химии. 12 раз в год (в [elibrary.ru](http://elibrary.ru) только рефераты начиная с 2005 г.).
3. Журнал физической химии. 12 раз в год (начиная с 1997 г.).
4. Успехи химии. Обзорные статьи. 12 раз в год. 6 статей в номере (с 1997 г. в [elibrary.ru](http://elibrary.ru)).
5. Доклады Национальной академии наук Беларуси. 6 номеров в год. <http://nasb.gov.by/rus/publications/dan/index.php> – содержание номеров + реферат.
6. Известия Национальной академии наук Беларуси. 4 раза в год. Издаются по сериям. В сети Интернет можно найти содержание номеров и рефераты статей:
  - серия химических наук:  
<http://nasb.gov.by/rus/publications/vestich/index.php>;
  - серия физико-технических наук:  
<http://nasb.gov.by/rus/publications/vestift/index.php>;
  - серия физико-математических наук:  
<http://nasb.gov.by/rus/publications/vestifm/index.php>.
7. Издательство Elsevier. Содержание научных журналов и рефераты доступны бесплатно через портал <http://www.sciencedirect.com/>.

- *Electrochimica Acta* (около 28 номеров в год);
  - *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 10 томов в год по 2 номера в томе;
  - *Electrochemistry communications*. Выходит с 1999 г. 12 номеров в год;
  - *Corrosion Science*. 12 номеров в год.
8. Издательство Springer. Содержание научных журналов и рефераты доступны бесплатно через портал <http://www.springerlink.com/>.
- *Journal of Applied Electrochemistry*. 12 номеров в год;
  - *Journal of Solid State Electrochemistry*. 12 номеров в год.
9. ACS (American Chemical Society). Содержание журналов и рефераты доступны бесплатно через портал <http://pubs.acs.org/journal/>.
- *The journal of physical chemistry B*. 52 номера в год;
  - *Journal of the American chemical society*. 52 номера в год.
10. База данных патентов США. Доступны полные тексты патентов. Расширенный поиск возможен по следующей ссылке: <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/search-adv.htm>.

### **1.2.2. Контрольные вопросы**

1. Понятие об информации, информационной системе, ресурсе, сети.
2. Научный документ. Классификация документов. Первичные и вторичные документы.
3. Первичные документы.
4. Вторичные документы.
5. Нормативно-техническая и патентная документация.
6. Библиографические классификации документов. УДК.
7. Государственная система и источники научно-технической документации в Республике Беларусь.
8. Патентная информация. Международная патентная классификация.
9. Рекомендуемый порядок ознакомления с литературными источниками по новой теме.
10. Библиотечные каталоги.
11. Составление собственной библиографии по теме. Библиографическая информация о документе.
12. Способы обработки информации при чтении.
13. Дифференциальный алгоритм для обучения более быстрому восприятию текста при чтении.
14. Интегральный алгоритм восприятия читаемого документа.

15. Техника быстрого чтения и способы ее развития.
16. Запоминание прочитанного текста.
17. Конспектирование и реферирование материала.
18. Научный обзор.

### **1.3. Теоретические и экспериментальные исследования**

#### **1.3.1. Техническое задание на проведение исследований**

Техническое задание (ТЗ) на прикладную НИР разрабатывают согласно СТБ 1080-97. ТЗ должно содержать необходимые и достаточные требования к объекту, предмету и содержанию предстоящих исследований, к создаваемой на их основе научно-технической продукции. Обычно ТЗ составляется до начала исследований. Иногда ТЗ может входить в состав выполняемых работ.

Пример оформления титульного листа ТЗ на УИРС приведен в приложении 1. Пример составления ТЗ на УИРС представлен в приложении 2. Все примеры составлены в соответствии с СТБ 1080-97.

ТЗ вместе с договором и календарным планом служит документом, определяющим требования к результатам исследований и условиям их получения, форму представления результатов, условия и размер оплаты.

#### **1.3.2. Контрольные вопросы**

1. Классификация научно-исследовательских работ.
2. Понятие о прикладных и фундаментальных исследованиях.
3. Понятие научного направления. Выбор направления исследований.
4. Структурные единицы научного направления.
5. Атрибуты научной и инновационной деятельности.
6. Понятие цели научного исследования. Формулировка цели исследования.
7. Понятие объекта и предмета исследования.
8. Выбор и обоснование темы исследования.
9. Понятие актуальности, новизны и значимости исследований.
10. Требования к заявке и к заданию на включение в состав государственной научно-технической программы.
11. Нормативные документы, регулирующие порядок выполнения НИР. Понятие технического задания.

12. Понятие эксперимента. Цели эксперимента.
13. Классификация экспериментов по отраслям наук, способу формирования условий и типу моделей.
14. Классификация экспериментов по организации проведения, структуре изучаемых объектов и целям.
15. Классификация экспериментов по характеру воздействий на объект и контролируемым величинам.
16. Классификация экспериментов по характеру объектов и числу варьируемых факторов.
17. Методика эксперимента.
18. План эксперимента: цели и задачи, варьируемые факторы.
19. План эксперимента: выбор и обоснование средств и методов измерений, обоснование числа опытов.
20. Обработка результатов эксперимента, статистические требования к результатам измерений.
21. Понятие измерения. Метрология. Метрологические стандарты.
22. Эталоны и меры.
23. Метрологическая служба. Государственная и ведомственная поверки средств измерений.
24. Прямые и косвенные, абсолютные и относительные измерения.
25. Классификация методов измерений.
26. Средства измерений и измерительные приборы. Классификация приборов.
27. Погрешности приборов: абсолютные, относительные и основные.
28. Диапазон измерений, размах, чувствительность, порог чувствительности и стабильность приборов.
29. Рабочая поверка средств измерений: регулировка «нуля» и чувствительности приборов.
30. Организация эксперимента: лаборатория, рабочее место, лабораторный журнал.
31. Систематические и случайные погрешности результатов эксперимента и их источники.

## **1.4. Элементы теории планирования эксперимента**

### **1.4.1. Обобщенный параметр оптимизации**

Часто возникает задача, когда необходимо множество параметров оптимизации обобщить в единый количественный признак. Поскольку каждый параметр имеет свой физический смысл и свою размерность,

то для каждого параметра вводят безразмерную шкалу, а затем параметры комбинируют в обобщенный по некоторому правилу. В качестве правила комбинирования безразмерных значений параметров в обобщенный часто используют среднее геометрическое.

**Простейший способ построения обобщенного отклика.** Выбирается безразмерная шкала, состоящая из двух значений: 0 – брак (неудовлетворительное качество) и 1 – годный продукт (удовлетворительное качество). Пусть объект исследования характеризуется  $n$  параметрами оптимизации  $y_1, y_2, \dots, y_n$ . Преобразованные в безразмерную шкалу параметры обозначим  $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n$ . Для построения обобщенного отклика  $Y$  используют формулу для среднего геометрического:

$$Y = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \tilde{y}_i}. \quad (1)$$

Это очень грубый и жесткий способ построения обобщенного параметра. В частности, значение обобщенного параметра будет равно 1 только в том случае, если значения всех частных параметров будут равны 1, т. е. будут соответствовать годному продукту или удовлетворительному качеству. Если хотя бы один из частных параметров будет равен 0, т. е. будет соответствовать браку или неудовлетворительному качеству, то и значение обобщенного параметра будет равно 0.

**Пример 1.** Процесс нанесения цинкового гальванического покрытия оценивается по четырем параметрам:  $y_1$  – коррозионная устойчивость (время до появления очагов коррозии в камере солевого тумана), ч;  $y_2$  – шероховатость поверхности, мкм;  $y_3$  – выход по току, %;  $y_4$  – электрическое сопротивление покрытия, мОм. Для получения безразмерных значений параметров используем следующие преобразования:

$$\tilde{y}_1 = \begin{cases} 1, & y_1 \geq 150 \text{ ч}, \\ 0, & y_1 < 150 \text{ ч}; \end{cases} \quad \tilde{y}_2 = \begin{cases} 1, & y_2 \leq 0,1 \text{ мкм}, \\ 0, & y_2 > 0,1 \text{ мкм}; \end{cases}$$

$$\tilde{y}_3 = \begin{cases} 1, & y_3 \geq 90\%, \\ 0, & y_3 < 90\%; \end{cases} \quad \tilde{y}_4 = \begin{cases} 1, & y_4 \leq 0,1 \text{ мОм}, \\ 0, & y_4 > 0,1 \text{ мОм}. \end{cases}$$

Для комплексной оценки процесса построим обобщенный параметр по формуле среднего геометрического:

$$Y = \sqrt[4]{\tilde{y}_1 \tilde{y}_2 \tilde{y}_3 \tilde{y}_4}.$$

При оптимизации процесса было получено 8 различных образцов, соответствующих различным условиям нанесения покрытия (например, состав растворов, температура, плотность тока и т. д.), для которых были определены значения частных параметров оптимизации (табл. 1). В представленной ниже таблице приведены значения преобразованных в двухбалльную шкалу параметров и значения обобщенного параметра оптимизации.

Таблица 1

**Построение простейшего обобщенного параметра оптимизации**

Номер образца	Натуральные параметры				Преобразованные параметры				Y
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$\tilde{y}_1$	$\tilde{y}_2$	$\tilde{y}_3$	$\tilde{y}_4$	
1	151	0,10	95	0,10	1	1	1	1	1
2	162	0,09	81	0,13	1	1	0	0	0
3	144	0,08	93	0,08	0	1	1	1	0
4	150	0,12	88	0,10	1	0	0	1	0
5	160	0,11	88	0,11	1	0	0	0	0
6	158	0,09	90	0,12	1	1	1	0	0
7	124	0,10	87	0,11	0	1	0	0	0
8	130	0,12	91	0,08	0	0	1	1	0

Таким образом, только образец № 1 отвечает требованиям удовлетворительного качества по всем четырем параметрам.

Наиболее удобным способом построения обобщенного отклика является *обобщенная функция желательности*. Натуральные значения параметров оптимизации преобразуются в безразмерную шкалу желательности. Шкала желательности – психофизическая шкала. Она устанавливает соответствие между физическими параметрами, характеризующими объект исследования, и психологическими предпочтениями, желательностью экспериментатора в отношении значений этих параметров. Шкала желательности имеет интервал от 0 до 1. Желательность для какого-то  $i$ -го параметра обозначим  $d_i$ . Значение  $d_i = 0$  соответствует абсолютно неприемлемому уровню данного параметра. Напротив, значение  $d_i = 1$  соответствует наилучшему уровню данного параметра. Для установления более точного соответствия между значениями желательности  $d_i$  и субъективными предпочтениями экспериментатора используют табл. 2.

Преобразование натуральных значений параметров  $y_i$  в значения желательности  $d_i$  проводят в два этапа. На первом этапе натуральные значения параметров преобразуют в условную кодированную шкалу  $y'$ ,

интервал которой выбирается в диапазоне от  $\pm 3$  до  $\pm 6$ . Выбор этого интервала задает чувствительность значений желательности к изменению значений натуральных параметров.

Таблица 2

**Стандартные отметки на шкале желательности**

Субъективные предпочтения	$d$	$y'$
Очень хорошо	1,0–0,80	(3–6)–1,50
Хорошо	0,80–0,63	1,50–0,78
Удовлетворительно	0,63–0,37	0,78–0
Плохо	0,37–0,20	0–(–0,48)
Очень плохо	0,20–0	(–0,48)–((–3)–(–6))

На втором этапе значения параметров в кодированной шкале  $y'$  преобразуются в значения желательности  $d$  с использованием следующей функции:

$$d = e^{-e^{-y'}}. \quad (2)$$

Такую функцию преобразования выбрали в результате наблюдений за реальными решениями экспериментаторов. Она обладает свойствами монотонности, непрерывности, гладкости и значительно большей чувствительностью к изменению значений  $y'$  в средней области желательности ( $0,2 < d < 0,8$ ), чем в областях желательности, близких к 0 или 1. График этой функции представлен на рис. 1.

Чтобы пользоваться такой схемой преобразования натуральных значений параметров в значения желательности, необходимо задать некоторые стандартные значения параметров, соответствующих субъективным предпочтениям «очень хорошо», «хорошо», «удовлетворительно», «плохо», «очень плохо» и соотнести их со стандартными отметками в шкале желательности  $d$  и в условной кодированной шкале  $y'$ , приведенными в табл. 2. Выбор в качестве стандартных значений в шкале желательности  $0,37 \approx e^{-1}$  и  $0,63 \approx 1 - e^{-1}$  обусловлен тем, что они определяют точки перегиба кривой (рис. 1).

Выбор стандартных значений натуральных параметров, соответствующих стандартным отметкам в табл. 2, делается исходя из опыта и интуиции экспериментатора. Часто такой выбор делается на основании согласованного мнения нескольких специалистов. При решении задач оптимизации желательности 0,37 (граница между «удовлетворительно» и «плохо») ставят в соответствие некоторое стандартное, существующее на данный момент, легко достижимое значение

натурального параметра. Например, выход по току процесса хромирования в 16–17% является стандартным, «нормальным» значением, и при оптимизации процесса хромирования это значение выхода по току можно ставить в соответствие желательности 0,37 и значению  $y' = 0$ .

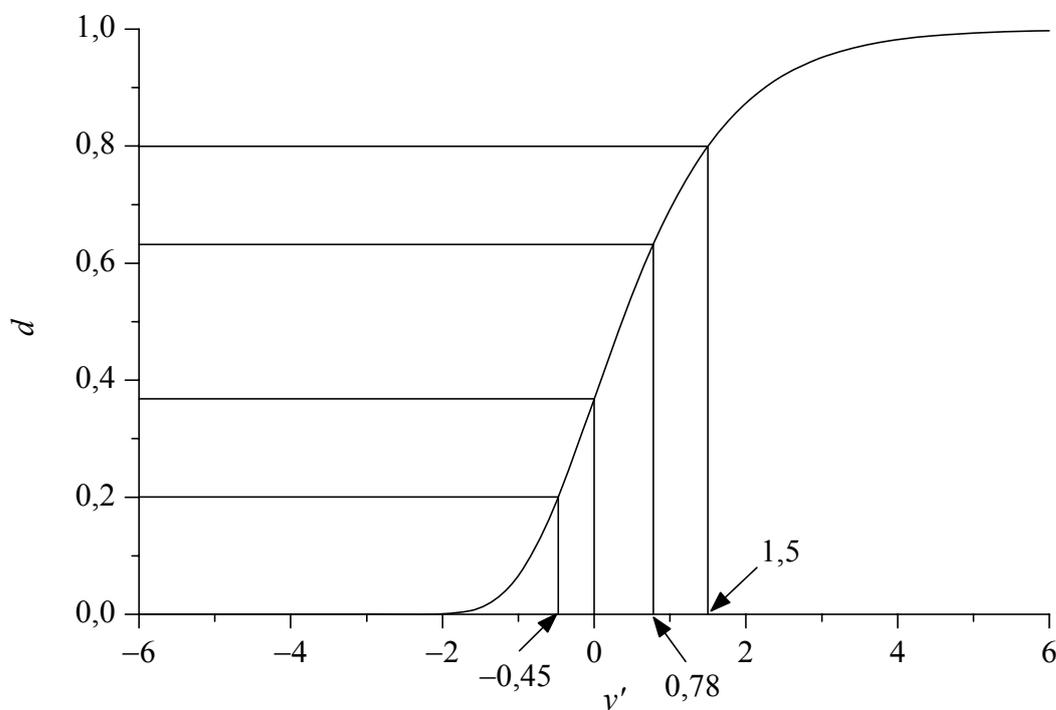


Рис. 1. График функции желательности

Шкала желательности есть попытка формализации представлений экспериментатора о важности тех или других значений частных откликов. Важность частного отклика можно повысить, уменьшая для этого отклика стандартные значения для желательностей 0,63 и 0,80 либо увеличивая стандартные значения других частных откликов для тех же желательностей. Выбор стандартных значений частных откликов является наиболее ответственной операцией при построении обобщенной функции желательности.

После того как натуральные параметры оптимизации  $y_i$  преобразованы в соответствующие желательности  $d_i$ , можно построить обобщенную функцию желательности по формуле среднего геометрического:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}. \quad (3)$$

Обобщенная функция желательности очень чувствительна к малым значениям  $d_i$ .

**Пример 2.** Используя исходные данные примера 1, построить частные и обобщенную функции желательности и рассчитать их значения для образцов № 1–8 (см. табл. 1 на с. 10).

*Решение.* Для преобразования натуральных значений параметров  $y_1, y_2, y_3, y_4$  в желательности необходимо задать стандартные значения этих параметров, соответствующих стандартным отметкам из табл. 2 (см. на с. 11). Выберем интервал условной кодированной шкалы от  $-3$  до  $3$ . Желательности  $0,37$  ( $y' = 0$ ) поставим в соответствие номинальные значения параметров из схемы преобразования примера 1 (табл. 3).

Таблица 3

**Стандартные значения параметров, соответствующие стандартным отметкам шкалы желательности**

$d$	$y'$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
1	3	200	0,03	100	0,01
0,80	1,5	180	0,05	95	0,05
0,63	0,78	160	0,08	92	0,08
0,37	0	150	0,1	90	0,1
0,20	-0,48	100	0,2	80	0,2
0	-3	0	10	0	10

При преобразовании натуральных значений параметров  $y_i$  в условную кодированную шкалу  $y'$  будем считать, что в интервале между соседними стандартными отметками связь между ними линейная. Для получения частных желательностей  $d_i$  будем использовать формулу (2). Например, значение параметра  $y_1 = 162$  для образца № 1 находится между стандартными отметками 160 и 180, которым соответствуют стандартные отметки условной кодированной шкалы  $y' = 0,78$  и  $1,5$  (см. табл. 3). Тогда значение параметра  $y_1 = 162$  можно перевести в условную кодированную шкалу по пропорции:

$$\frac{180 - 160}{1,5 - 0,78} = \frac{162 - 160}{y' - 0,78},$$

откуда  $y' = 0,869$ . Затем по формуле (2) находим частное значение желательности для параметра  $y_1 = 162$ :

$$d_1 = e^{-e^{-0,869}} = 0,65.$$

Результаты преобразований и расчетов представим в табл. 4.

Наибольшее значение обобщенного отклика получено для образца № 3, хотя этот образец и не удовлетворяет номинальному требованию

по коррозионной устойчивости, и в примере 1 для этого образца было получено нулевое значение обобщенного отклика. Образец № 1, единственный, который удовлетворяет номинальным требованиям по всем четырем параметрам, но в примере 1 по обобщенной желательности не лучший. Это связано с выбором стандартных значений параметров, соответствующих стандартным отметкам на шкале желательности.

Таблица 4

**Построение обобщенной функции желательности**

Номер образца	Натуральные параметры				Частные желательности				D
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	
1	151	0,10	95	0,10	0,40	0,37	0,80	0,37	0,46
2	162	0,09	81	0,13	0,65	0,51	0,21	0,32	0,39
3	144	0,08	93	0,08	0,35	0,63	0,70	0,63	0,56
4	150	0,12	88	0,10	0,37	0,33	0,33	0,37	0,35
5	160	0,11	88	0,11	0,63	0,35	0,33	0,35	0,40
6	158	0,09	90	0,12	0,59	0,51	0,37	0,33	0,44
7	124	0,10	87	0,11	0,28	0,37	0,32	0,35	0,33
8	130	0,12	91	0,08	0,30	0,33	0,51	0,63	0,42

Если повысить важность коррозионной устойчивости снижением стандартных значений для отметок желательностей 0,63 и 0,80 и уменьшить важность шероховатости и электрического сопротивления покрытий увеличением стандартных значений для тех желательностей, то можно получить для образца № 1 наибольшее значение обобщенной желательности.

**1.4.2. Полный факторный эксперимент  $2^k$**

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется *полным факторным экспериментом*. Если число варьируемых факторов равно  $k$ , и каждый фактор варьируется на  $n$  уровнях, то число возможных сочетаний уровней факторов или число опытов будет равно

$$N = n^k. \tag{4}$$

В частности, если каждый фактор варьируется на двух уровнях, то число возможных сочетаний уровней факторов равно  $2^k$ . Полный факторный эксперимент, в котором  $k$  факторов варьируются на двух уровнях, получил обозначение  $2^k$ .

В планировании эксперимента  $2^k$  используют кодированные уровни факторов +1 и -1. Условия эксперимента записывают в виде

таблицы, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы – значениям факторов. Такие таблицы называют **матрицами планирования**. Например, для эксперимента  $2^2$  матрица планирования будет иметь вид табл. 5.

Таблица 5

**Матрица планирования эксперимента  $2^2$**

Номер опыта	$x_1$	$x_2$
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Свойства матрицы планирования, определяющие качество эмпирической модели объекта исследования:

1) *симметричность* относительно центра эксперимента – алгебраическая сумма элементов каждого столбца равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 0, \quad (5)$$

где  $N$  – число опытов;  $i$  – номер строки матрицы планирования или номер опыта;  $j$  – номер фактора (столбца матрицы),  $j = 1, 2, \dots, k$ ;  $k$  – число факторов;

2) условие *нормировки* – сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 = N; \quad (6)$$

3) *ортогональность* – сумма почленных произведений любых двух столбцов матрицы равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}x_{iu} = 0, \quad (7)$$

где  $u \neq j$  – номер фактора (столбца матрицы),  $u = 1, 2, \dots, k$ .

Для проведения пошаговой оптимизации объекта исследования необходимо после каждого шага (серии опытов) строить эмпирическую модель (зависимость параметра оптимизации от факторов). Обычно для этой цели используют линейную модель. Например, для двух факторов  $x_1$  и  $x_2$  и параметра оптимизации  $y$  линейная модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (8)$$

где  $b_0, b_1, b_2$  – коэффициенты модели, которые определяют на основании результатов эксперимента.

Коэффициенты  $b_j$  указывают на силу влияния факторов. Для расчета коэффициентов линейной модели  $b_j$  применяют метод наименьших квадратов. В случае кодированных значений факторов и при использовании результатов экспериментов, полученных с применением матриц планирования, удовлетворяющих свойствам симметричности, ортогональности и условию нормировки, формула для расчета коэффициентов  $b_j$  имеет простой вид

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij}y_i}{N}, \quad (9)$$

где  $y_i$  – значения параметра оптимизации в  $i$ -м опыте;  $j$  – номер фактора, который принимает значения от 1 до  $k$ .

Коэффициент  $b_0$  линейной модели равен среднему арифметическому значений параметра оптимизации  $y_i$ . Чтобы унифицировать процедуру расчета коэффициента  $b_0$  в соответствии с формулой (9), в матрицу планирования вводят столбец фиктивного фактора  $x_0$ , который содержит +1 во всех строках.

В рамках полного факторного эксперимента  $2^k$  можно оценить эффект взаимодействия факторов, т. е. определить, как зависит влияние одного фактора от уровня другого. Для этого строят модель с учетом эффектов взаимодействия факторов. Для двух факторов такая модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (10)$$

где  $b_{12}$  – коэффициент, дающий оценку эффекта взаимодействия факторов.

При построении плана эксперимента стремятся эффекты взаимодействия факторов сделать как можно меньше (например, снижая интервалы варьирования факторов). Для расчета коэффициента  $b_{12}$  можно использовать формулу (9), для чего необходимо в матрицу планирования ввести еще один столбец  $x_1x_2$ , в который заносятся значения, получающиеся при перемножении соответствующих значений из столбцов  $x_1$  и  $x_2$ . Таким образом, матрица планирования с дополнительными столбцами для построения линейной модели с учетом эффекта взаимодействия факторов эксперимента  $2^2$  имеет вид табл. 6.

Таблица 6

**Матрица планирования эксперимента  $2^2$  с дополнительными столбцами для построения линейной модели с учетом эффекта взаимодействия факторов**

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y$
1	+1	-1	-1	+1	$y_1$
2	+1	+1	-1	-1	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	+1	+1	$y_4$

**Пример 3.** Построить линейную модель с учетом взаимодействия факторов для процесса электрохимического осаждения цинка на основании полного факторного эксперимента  $2^3$ . В качестве параметра оптимизации  $y$  выбран выход по току (%). В качестве варьируемых параметров приняты:  $x_1$  – содержание серной кислоты в растворе;  $x_2$  – содержание сульфата цинка в растворе;  $x_3$  – плотность тока. Оценить силу влияния указанных факторов на выход по току и эффект взаимодействия факторов для выбранных интервалов варьирования. Результаты эксперимента представлены в табл. 7

Таблица 7

**Матрица планирования эксперимента  $2^3$  с результатами определения выхода по току (%) процесса электрохимического осаждения цинка**

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
1	-1	-1	-1	89,8
2	+1	-1	-1	88,6
3	-1	+1	-1	90,3
4	+1	+1	-1	89,1
5	-1	-1	+1	91,7
6	+1	-1	+1	90,6
7	-1	+1	+1	92,1
8	+1	+1	+1	91,1

*Решение.* Линейная модель, учитывающая все эффекты взаимодействия трех факторов, имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Коэффициент  $b_{123}$  характеризует эффект взаимодействия сразу трех факторов (эффект взаимодействия второго порядка).

Построим матрицу планирования (аналогичную табл. 6) с дополнительными столбцами, необходимыми для расчета коэффициентов линейной модели с эффектами взаимодействия трех факторов (табл. 8).

**Матрица планирования эксперимента  $2^3$  с результатами определения выхода по току (%) процесса электрохимического осаждения цинка и дополнительными столбцами для построения линейной модели с учетом эффекта взаимодействия факторов**

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	89,8
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	88,6
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	90,3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	89,1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	91,7
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	90,6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	92,1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	91,1

Рассчитаем коэффициенты модели, используя формулу (9):

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{0i} = \frac{89,8 + 88,6 + 90,3 + 89,1 + 91,7 + 90,6 + 92,1 + 91,1}{8} = 90,4,$$

$$b_1 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1i} = \frac{-89,8 + 88,6 - 90,3 + 89,1 - 91,7 + 90,6 - 92,1 + 91,1}{8} = -0,56,$$

$$b_2 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{2i} = \frac{-89,8 - 88,6 + 90,3 + 89,1 - 91,7 - 90,6 + 92,1 + 91,1}{8} = 0,24,$$

$$b_3 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{3i} = \frac{-89,8 - 88,6 - 90,3 - 89,1 + 91,7 + 90,6 + 92,1 + 91,1}{8} = 0,96,$$

$$b_{12} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1x_2i} = \frac{89,8 - 88,6 - 90,3 + 89,1 + 91,7 - 90,6 - 92,1 + 91,1}{8} = 0,01,$$

$$b_{13} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1x_3i} = \frac{89,8 - 88,6 + 90,3 - 89,1 - 91,7 + 90,6 - 92,1 + 91,1}{8} = 0,04,$$

$$b_{23} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{2x_3i} = \frac{89,8 + 88,6 - 90,3 - 89,1 - 91,7 - 90,6 + 92,1 + 91,1}{8} = -0,01,$$

$$b_{123} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{1x_2x_3i} = \frac{-89,8 + 88,6 + 90,3 - 89,1 + 91,7 - 90,6 - 92,1 + 91,1}{8} = 0,01.$$

По значениям коэффициентов  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  можно заключить: 1) выход по току увеличивается с возрастанием плотности тока и содержания сульфата цинка в растворе и уменьшается с увеличением содержания серной кислоты в растворе; 2) при выбранных интервалах варь-

ирования факторов наибольшее влияние на выход по току оказывает изменение плотности тока, а наименьшее – изменение содержания сульфата цинка в растворе.

Эффекты взаимодействия факторов пренебрежимо малы по сравнению с основными эффектами факторов. Наибольший эффект взаимодействия наблюдается между содержанием серной кислоты в растворе и плотностью тока. Для уменьшения этого эффекта при составлении дальнейших планов эксперимента можно сократить интервалы варьирования этих факторов.

### **1.4.3. Контрольные вопросы и задания**

1. Возникновение теории планирования эксперимента. Планирование экстремального эксперимента.
2. Понятие планирования эксперимента. Задачи планирования эксперимента.
3. Понятия оптимизации, задачи оптимизации, экстремального эксперимента и его планирования.
4. Понятия объекта исследования, фактора, параметра оптимизации, функции отклика.
5. Понятие уровня фактора и состояние «черного ящика».
6. Требования к объекту исследования. Виды эксперимента по управляемости.
7. Виды параметров оптимизации. Требования к параметру оптимизации.
8. Обобщенный параметр оптимизации: общие принципы построения.
9. Обобщенный параметр оптимизации: простейший способ построения на основе двухбалльной шкалы.
10. Обобщенный параметр оптимизации: «близость к идеалу».
11. Функция желательности.
12. Обобщенная функция желательности.
13. Факторы, область определения фактора, классификация факторов.
14. Требования к факторам.
15. Геометрический аналог функции отклика. Поверхность отклика. Факторное пространство.
16. Свойства функции отклика.
17. Методы поиска оптимума. Шаговый принцип.
18. Модели функции отклика. Полиномиальные модели. Адекватность моделей.

19. Этапы поиска оптимума с помощью линейных моделей.
20. Оценка области определения факторов.
21. Выбор основного уровня факторов.
22. Выбор интервалов варьирования факторов. Кодирование факторов.
23. Требования к интервалу варьирования фактора.
24. Алгоритмы принятия решений для выбора интервалов варьирования фактора в зависимости от точности фиксирования факторов.
25. Полный факторный эксперимент  $2^k$ .
26. Матрица планирования эксперимента.
27. Буквенная запись матрицы планирования эксперимента  $2^k$ .
28. Свойства матрицы планирования эксперимента.
29. Определение коэффициентов линейной модели по результатам эксперимента.
30. Эффекты взаимодействия факторов в рамках полного факторного эксперимента.
31. Метод Йетса для расчета коэффициентов линейных моделей с учетом эффектов взаимодействия факторов.
32. Дробный факторный эксперимент.
33. Процесс электролитического получения хлора и щелочи мембранным методом оценивается по четырем параметрам:  $y_1$  – удельный расход электроэнергии, кВт · ч/т NaOH;  $y_2$  – содержание щелочи в католите, %;  $y_3$  – выход по току, %;  $y_4$  – содержание примесей хлоридов в щелочи, %. Постройте частные и обобщенную функции желательности и рассчитайте их значения для различных условий электролиза, представленных в табл. 9.

Таблица 9

**Результаты экспериментального исследования процесса электролитического получения хлора и щелочи мембранным методом**

Номер опыта	Натуральные параметры			
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
1	2420	27	90	0,08
2	2090	41	88	0,07
3	2150	26	99	0,11
4	2370	39	96	0,04
5	2330	32	98	0,06
6	2610	42	96	0,03
7	2010	31	95	0,12
8	2540	41	80	0,10

Для преобразования натуральных значений параметров в желательности используйте табл. 10.

Таблица 10

**Стандартные значения параметров процесса электролитического получения хлора и щелочи мембранным методом**

$d$	$y'$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
1	3	2000	45	100	0,00
0,80	1,5	2200	40	97	0,02
0,63	0,78	2300	38	95	0,03
0,37	0	2400	35	90	0,05
0,20	-0,48	2500	20	80	0,1
0	-3	3000	10	0	1

34. Постройте линейную модель с учетом взаимодействия факторов для процесса электролитического получения хлора и щелочи мембранным методом на основании полного факторного эксперимента  $2^3$ . В качестве параметров оптимизации используйте натуральные параметры и обобщенную функцию желательности из задания 33. В качестве варьируемых параметров приняты:  $x_1$  – плотность тока электролиза;  $x_2$  – содержание хлорида натрия в питающем рассоле;  $x_3$  – температура. Оцените силу влияния указанных факторов на параметры оптимизации и эффект взаимодействия факторов для выбранных интервалов варьирования. Матрица планирования для рассматриваемого эксперимента представлена в табл. 11. Значения параметров оптимизации для каждого опыта приведены в табл. 9 (см. на с. 20).

Таблица 11

**Матрица планирования эксперимента  $2^3$  исследования процесса электролитического получения хлора и щелочи мембранным методом**

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

## 1.5. Анализ и обработка результатов экспериментальных исследований

### 1.5.1. Первичная статистическая обработка выборки

Первичная обработка выборки включает в себя три операции: упорядочение, частотный анализ и группировку.

**Упорядочение выборки.** Статистические характеристики выборки не зависят от порядка самих значений. Упорядочение выборки проводится по возрастанию значений выборки:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n.$$

Упорядоченная выборка называется *вариационным рядом*. Разность между максимальным и минимальным значениями выборки называется *размахом выборки*:

$$w = x_n - x_1.$$

**Частотный анализ.** Если выборку представить в виде таблицы, содержащей только различные значения и соответствующие им числа, показывающие, сколько раз данное встречается в выборке, то получим таблицу, называемую *статистическим рядом*:

$$\begin{pmatrix} z_1 & z_2 & \dots & z_k \\ n_1 & n_2 & \dots & n_k \end{pmatrix},$$

где  $k$  – число различных значений в выборке;  $n_i$  – частота элемента выборки  $z_i$ . Очевидно, что сумма частот всех элементов выборки равна объему выборки:

$$\sum_{i=1}^k n_i = n.$$

Величина

$$v_i = \frac{n_i}{n} \tag{11}$$

называется *относительной частотой* элемента выборки  $z_i$ , которую можно считать оценкой вероятности обнаружения данного элемента в выборке. С помощью относительных частот можно построить выборочный закон распределения. Если значения выборки  $z_1, z_2, \dots, z_k$  упорядочены, тогда каждому элементу выборки можно приписать *накопленную частоту*

$$n'_i = \sum_{j=1}^i n_j \quad (12)$$

и относительную накопленную частоту

$$v'_i = \frac{n'_i}{n} = \sum_{j=1}^i v_j. \quad (13)$$

Последняя величина представляет собой вероятность обнаружения в выборке элементов, меньших или равных данному элементу  $z_i$ . Относительные накопленные частоты можно использовать для построения выборочной функции распределения в табличном виде.

**Пример 4.** В результате 20 опытов получена следующая выборка:

$x_i$ : 4, 1, 4, 5, 1, 13, 4, 10, 2, 4, 7, 2, 2, 4, 6, 4, 5, 6, 2, 4.

Построить вариационный ряд, определить размах выборки, построить статистический ряд, выборочный закон распределения и выборочную функцию распределения.

*Решение.* Вариационный ряд:

$x_i$ : 1, 1, 2, 2, 2, 2, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 6, 6, 7, 10, 13.

Размах выборки:  $w = 13 - 1 = 12$ .

Статистический ряд:

$$\begin{array}{l} z_i \\ n_i \end{array} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 10 & 13 \\ 2 & 4 & 7 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Выборочный закон распределения:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 10 & 13 \\ 0,1 & 0,2 & 0,35 & 0,1 & 0,1 & 0,05 & 0,05 & 0,05 \end{pmatrix}$$

Выборочная функция распределения:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 10 & 13 \\ 0,1 & 0,3 & 0,65 & 0,75 & 0,85 & 0,9 & 0,95 & 1 \end{pmatrix}$$

**Группировка.** При большом объеме выборки ее элементы объединяют в группы, представляя результаты опытов в виде группированного статистического ряда. Для этого диапазон значений выборки разбивают на  $k$  непересекающихся интервалов. Чаще всего используют равные интервалы. Число интервалов можно определить по формуле

$$k = 1 + 1,39 \ln n. \quad (14)$$

Если элемент выборки попадает ровно на границу интервала, его относят к интервалу с большими значениями. Последний интервал включает и правую границу. Затем подсчитывают частоты – число элементов выборки в данном интервале, находят середины интервалов, а также накопленные частоты. Результаты группировки оформляют в виде таблицы частот группированной выборки. Процесс построения такой таблицы называют *частотной табуляцией*.

**Пример 5.** Провести частотную табуляцию данной в примере 4 выборки. Построить полигон выборочной функции распределения и гистограмму выборочной плотности распределения.

*Решение.* Определим число интервалов

$$k = 1 + 1,39 \ln 20 \approx 5,164.$$

Поскольку элементы выборки являются целыми числами, для удобства интерпретации результатов необходимо, чтобы и интервалы выражались целыми числами. Вследствие того, что размах выборки равен 12, необходимо, чтобы число интервалов было делителем 12 и было ближайшим к числу 5,164. Таким образом, число интервалов примем равным 6.

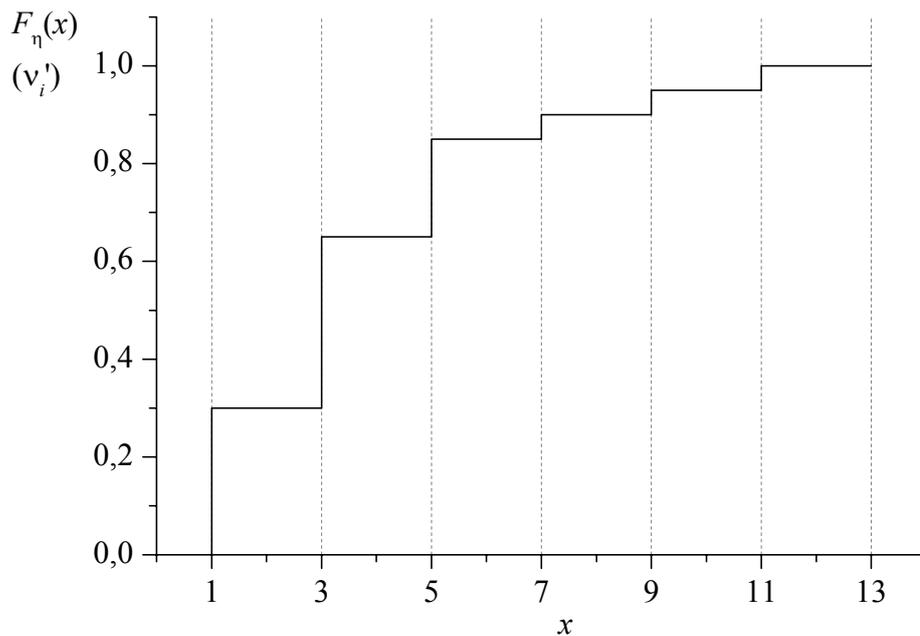
Частотная табуляция представлена в табл. 12.

Таблица 12

**Пример таблицы частот группированного ряда**

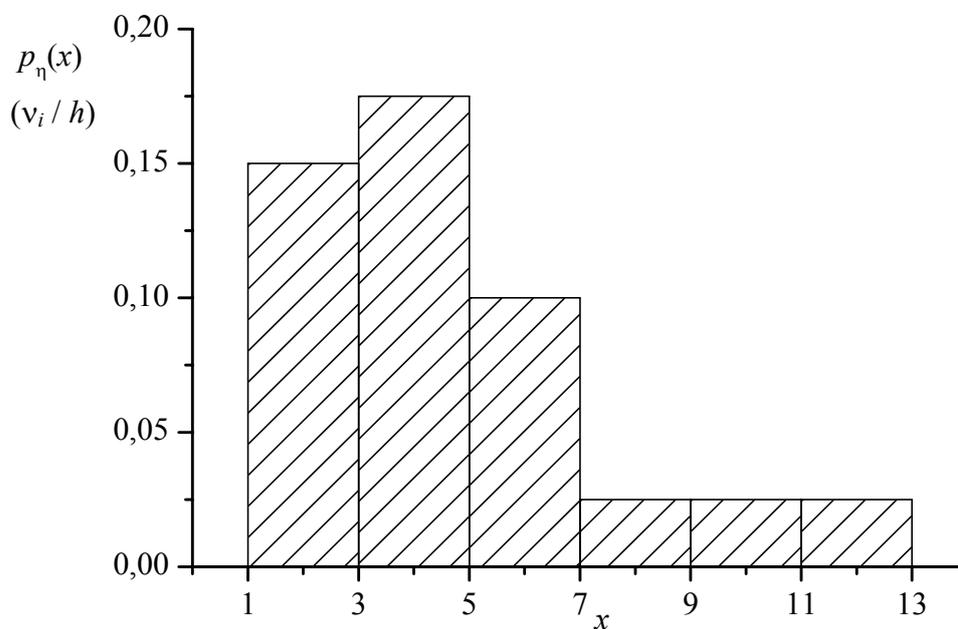
Номер интервала	Границы интервала	Середина интервала	Частота $n_i$	Накопленная частота $n'_i$	Относительная частота $v_i$	Относительная накопленная частота $v'_i$
1	1–3	2	6	6	0,3	0,3
2	3–5	4	7	13	0,35	0,65
3	5–7	6	4	17	0,2	0,85
4	7–9	8	1	18	0,05	0,9
5	9–11	10	1	19	0,05	0,95
6	11–13	12	1	20	0,05	1

Используя относительные накопленные частоты  $v'_i$  из таблицы частот группированного ряда, можно построить графически выборочную функцию распределения  $F_n(x)$ . Это построение проводят в виде полигона (рис. 2).



**Рис. 2.** Пример полигона выборочной функции распределения

На основании относительных частот можно графически представить выборочную плотность распределения в виде гистограммы (рис. 3). Чтобы площадь гистограмм равнялась единице, необходимо высоту гистограмм разделить на длину интервала  $h = 2$ .



**Рис. 3.** Пример гистограммы выборочной плотности распределения

### 1.5.2. Построение доверительных интервалов

**Выборочные оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения.** Выборочной оценкой математического ожидания является среднее арифметическое элементов выборки:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (15)$$

где  $n$  – объем выборки;  $x_i$  –  $i$ -й элемент выборки.

Выборочная несмещенная оценка дисперсии находится по формуле

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (16)$$

Выборочная смещенная оценка дисперсии вычисляется по следующей формуле:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (17)$$

Выборочными оценками среднеквадратичного отклонения будут  $S$  (несмещенная оценка) и  $s$  (смещенная оценка).

**Построение доверительных интервалов для параметров нормального распределения (определение случайных ошибок измерений).** Доверительный интервал для математического ожидания  $a$  нормальной случайной величины будет симметричен относительно наиболее вероятного значения, в качестве которого берется среднее арифметическое выборки. Доверительный интервал будет иметь вид

$$(\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta)$$

или

$$a = \bar{x} \pm \Delta, \quad (18)$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое выборки;  $\Delta$  – радиус интервала;  $a$  – математическое ожидание.

Радиус доверительного интервала служит мерой случайной ошибки измерений. Для построения доверительного интервала выбирают малое число  $\alpha$  – *уровень значимости* – и находят интервал, в который истинное значение параметра попадает с вероятностью  $1 - \alpha$ , называемой *доверительной вероятностью*. Обычно используют стандартные уровни значимости, равные 0,1, 0,05 или 0,01, которым отве-

чают доверительные вероятности 0,90, 0,95 или 0,99, а соответствующий доверительный интервал называют 90, 95 или 99%-ным.

Для расчета радиуса доверительного интервала при известной дисперсии используют формулу

$$\Delta = u_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (19)$$

где  $u_{1-\alpha/2}$  – квантиль уровня  $1-\alpha/2$  стандартного нормального распределения (табл. ПЗ.1);  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение;  $n$  – объем выборки.

При неизвестной дисперсии расчет радиуса доверительного интервала проводят по следующей формуле:

$$\Delta = t_{1-\alpha/2}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (20)$$

где  $t_{1-\alpha/2}(n-1)$  – квантиль уровня  $1-\alpha/2$  распределения Стьюдента с числом степеней свободы  $n-1$  (табл. ПЗ.2);  $S$  – выборочная несмещенная оценка среднее квадратичное отклонения.

**Пример 6.** В процессе цементационной очистки от Cu и Cd электролита, поступающего на электролиз для электроэкстракции Zn, исследовался химический состав медно-кадмиевого кека. Было проведено 5 параллельных опытов, в которых определено содержание Cu и Cd в кеке в процентах по массе (табл. 13).

Таблица 13

**Результаты определения содержания (% по массе) Cu и Cd в кеке**

Номер опыта	$\omega(\text{Cu})$	$\omega(\text{Cd})$
1	29,0	9,65
2	40,9	7,30
3	25,0	6,00
4	24,1	20,22
5	24,4	17,90

Построить соответственно 90 и 95%-ные доверительные интервалы для математического ожидания содержания Cu и Cd в кеке.

*Решение.* Находим средние значения для  $\omega(\text{Cu})$  и  $\omega(\text{Cd})$ :

$$\bar{\omega}(\text{Cu}) = \frac{29,0 + 40,9 + 25,0 + 24,1 + 24,4}{5} = 28,68,$$

$$\bar{\omega}(\text{Cd}) = \frac{9,65 + 7,30 + 6,00 + 20,22 + 17,9}{5} = 12,21.$$

Определяем несмещенную оценку среднеквадратичного отклонения для  $\omega(\text{Cu})$  и  $\omega(\text{Cd})$  с использованием формулы (16):

$$S(\text{Cu}) = \sqrt{\frac{(29,0 - 28,68)^2 + (40,9 - 28,68)^2 + \dots + (24,4 - 28,68)^2}{5 - 1}} = 7,11,$$

$$S(\text{Cd}) = \sqrt{\frac{(9,65 - 12,21)^2 + (7,30 - 12,21)^2 + \dots + (17,9 - 12,21)^2}{5 - 1}} = 6,44.$$

Число степеней свободы  $n - 1$  равно 4. Доверительные интервалы в 90 и 95% соответствуют уровням значимости 0,10 и 0,05 соответственно. Из табл. ПЗ.2 выбираем необходимые квантили распределения Стьюдента согласно формуле (20):

$$t_{1-0,1/2}(4) = t_{0,95}(4) = 2,132,$$

$$t_{1-0,05/2}(4) = t_{0,975}(4) = 2,776.$$

Рассчитываем радиусы доверительных интервалов для содержания Cu и Cd в кеке с доверительными вероятностями 90 и 95% по формуле (20):

$$\Delta_{90\%}(\text{Cu}) = 2,132 \cdot \frac{7,11}{\sqrt{5}} = 6,78, \quad \Delta_{95\%}(\text{Cu}) = 2,776 \cdot \frac{7,11}{\sqrt{5}} = 8,83;$$

$$\Delta_{90\%}(\text{Cd}) = 2,132 \cdot \frac{6,44}{\sqrt{5}} = 6,14, \quad \Delta_{95\%}(\text{Cd}) = 2,776 \cdot \frac{6,44}{\sqrt{5}} = 8,00.$$

*Ответ.* Таким образом, 90 и 95%-ные доверительные интервалы для математического ожидания содержания Cu и Cd в кеке будут иметь вид соответственно:

– с доверительной вероятностью 90%:

$$\omega(\text{Cu}) = (28,68 \pm 6,78) \%, \quad \omega(\text{Cd}) = (12,21 \pm 6,14) \%;$$

– с доверительной вероятностью 95%:

$$\omega(\text{Cu}) = (28,68 \pm 8,83) \%, \quad \omega(\text{Cd}) = (12,21 \pm 8,00) \%.$$

*Доверительный интервал для дисперсии* нормальной случайной величины имеет вид

$$\left( \frac{ns^2}{\chi_{1-\alpha/2}^2(n-1)}, \frac{ns^2}{\chi_{\alpha/2}^2(n-1)} \right), \quad (21)$$

где  $s^2$  – выборочная смещенная оценка дисперсии;  $\chi_{1-\alpha/2}^2(n-1)$  и  $\chi_{\alpha/2}^2(n-1)$  – квантили уровней  $1-\alpha/2$  и  $\alpha/2$  соответственно, распределения  $\chi^2$  с  $n-1$  степенью свободы (табл. ПЗ.3).

**Пример 7.** Построить 90 и 95%-ные доверительные интервалы для дисперсии содержания Cu и Cd в кеке. Исходные данные взять из примера 6.

*Решение.* Рассчитываем выборочные оценки дисперсии по формуле (17):

$$s^2(\text{Cu}) = \frac{(29,0 - 28,68)^2 + (40,9 - 28,68)^2 + \dots + (24,4 - 28,68)^2}{5} = 40,45,$$

$$s^2(\text{Cd}) = \frac{(9,65 - 12,21)^2 + (7,30 - 12,21)^2 + \dots + (17,9 - 12,21)^2}{5 - 1} = 33,15.$$

Из табл. ПЗ.3 выбираем квантили распределения  $\chi^2$  при числе степеней свободы, равном 4, и необходимых уровнях. Так, 90%-ному доверительному интервалу соответствует уровень значимости  $\alpha = 0,1$ , и, следовательно, необходимо выбрать квантили при уровнях 0,05 и 0,95:

$$\chi_{\alpha/2}^2(n-1) = \chi_{0,1/2}^2(5-1) = \chi_{0,05}^2(4) = 0,711,$$

$$\chi_{1-\alpha/2}^2(n-1) = \chi_{1-0,1/2}^2(5-1) = \chi_{0,95}^2(4) = 9,49.$$

Аналогично выбираем квантили, соответствующие доверительной вероятности 95% (уровень значимости 0,05):

$$\chi_{\alpha/2}^2(n-1) = \chi_{0,05/2}^2(5-1) = \chi_{0,025}^2(4) = 0,484,$$

$$\chi_{1-\alpha/2}^2(n-1) = \chi_{1-0,05/2}^2(5-1) = \chi_{0,975}^2(4) = 11,1.$$

Определяем доверительный интервал для дисперсии в соответствии с выражением (21).

*Ответ.* Доверительные интервалы в 90% для дисперсии содержания Cu и Cd в кеке будут выглядеть так:

$$\sigma^2(\text{Cu}) \in \left( \frac{5 \cdot 40,45}{9,49}, \frac{5 \cdot 40,45}{0,711} \right) \text{ или } (21,3, 284,5);$$

$$\sigma^2(\text{Cd}) \in \left( \frac{5 \cdot 33,15}{9,49}, \frac{5 \cdot 33,15}{0,711} \right) \text{ или } (17,5, 233,1).$$

Доверительные интервалы в 95% для дисперсии содержания Cu и Cd в кеке будут иметь следующий вид:

$$\sigma^2(\text{Cu}) \in \left( \frac{5 \cdot 40,45}{11,1}, \frac{5 \cdot 40,45}{0,484} \right) \text{ или } (18,2, 417,9);$$

$$\sigma^2(\text{Cd}) \in \left( \frac{5 \cdot 33,15}{11,1}, \frac{5 \cdot 33,15}{0,484} \right) \text{ или } (14,9, 342,5).$$

### 1.5.3. Исключение грубых ошибок

Исключение грубых ошибок (промахов) из выборки позволит значительно снизить случайную ошибку. Если в выборке имеется подозрительное значение ( $x^*$ ), сильно выпадающее из ряда, то используя специальный статистический критерий грубых ошибок, можно проверить, является ли это значение грубой ошибкой при выбранном уровне значимости. Критерий грубых ошибок вычисляют по следующей формуле:

$$\beta = \frac{|x^* - \bar{x}|}{s}, \quad (22)$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое выборки;  $s$  – выборочная смещенная оценка среднеквадратичного отклонения (находится по формуле (17)).

Максимально допустимое значение этого критерия ( $\beta_{\max}$ ), при котором еще можно считать подозрительное значение  $x^*$  следствием случайного статистического разброса, а не грубой ошибкой, приводится в таблицах для разных уровней значимости (табл. ПЗ.4).

**Пример 8.** В серии результатов определения содержания меди в кеке из примера 6 (см. табл. 13 на с. 27) имеется подозрительное значение (40,9), сильно отличающееся от остальных значений. Необходимо проверить при уровне значимости 0,05 (95%-ная доверительная вероятность), не является ли этот результат грубой ошибкой.

*Решение.* Рассчитываем критерий грубых ошибок по формуле (22), приняв в качестве  $x^* = 40,9$ . Среднее арифметическое для содержания меди было найдено в примере 6:  $\bar{x} = 28,68$ . Выборочная смещенная оценка дисперсии получена в примере 7:  $s^2 = 40,45$ . Откуда определяем  $s = \sqrt{40,45} = 6,36$ . Критерий грубых ошибок будет равен

$$\beta = \frac{|40,9 - 28,68|}{6,36} = 1,92.$$

Из табл. ПЗ.4 выписываем максимально допустимое значение критерия грубых ошибок при уровне значимости 0,05 и объеме выборки 5:  $\beta_{\max} = 1,87$ .

Поскольку  $\beta > \beta_{\max}$ , то значение 40,9 следует считать грубой ошибкой и исключить из выборки.

*Ответ.* Подозрительное значение является грубой ошибкой при уровне значимости 0,05.

#### 1.5.4. Оценка случайных ошибок косвенных измерений

Пусть некоторая величина  $U$  является функцией непосредственно измеряемых величин  $x$ ,  $y$  и  $z$ :

$$U = f(x, y, z).$$

Среднее значение величины  $U$  можно определить приближенно:

$$\bar{U} \approx f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}). \quad (23)$$

Случайную ошибку или радиус доверительного интервала для величины  $U$  можно приближенно выразить через дифференциал функции  $f$ :

$$\Delta U \approx \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})\right)^2 \Delta x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})\right)^2 \Delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})\right)^2 \Delta z^2}, \quad (24)$$

где  $\frac{\partial f}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial f}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial f}{\partial z}$  – частные производные функции  $f$  по переменным  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;

$\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – случайные ошибки (радиусы доверительных интервалов при одном и том же уровне значимости) для непосредственно измеряемых величин  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

**Пример 9.** Рассчитать случайную ошибку определения удельного расхода электроэнергии для процесса электролитического получения цинка, используя следующую формулу:

$$W = \frac{1000U}{m_{\text{Zn}}} I \tau$$

и результаты косвенных измерений четырех величин:

- массы катодного осадка цинка  $m_{\text{Zn}} = (0,0972 \pm 0,0011)$  г,
- напряжения на электролизере  $U = (2,91 \pm 0,03)$  В,
- времени  $\tau = (1 \pm 0,01)$  ч,
- тока электролиза  $I = (0,1 \pm 0,001)$  А.

Дано:  
 $\bar{m}_{Zn} = 0,0972$  г  
 $\bar{U} = 2,91$  В  
 $\bar{\tau} = 1$  ч  
 $\bar{I} = 0,1$  А  
 $\Delta m_{Zn} = 0,0011$  г  
 $\Delta U = 0,03$  В  
 $\Delta \tau = 0,01$  ч  
 $\Delta I = 0,001$  А

Решение. Рассчитываем среднее значение удельного расхода электроэнергии по соотношению (23), используя средние значения массы цинка, напряжения, времени и силы тока:

$$\bar{W} = \frac{1000\bar{U}}{\bar{m}_{Zn}} \bar{I} \bar{\tau} = \frac{1000 \cdot 2,91}{0,0972} \cdot 0,1 \cdot 1 = 2994 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$$

Находим случайную ошибку определения удельного расхода электроэнергии на основании соотношения (24). В данном примере удельный расход электроэнергии является функцией четырех переменных (массы цинка, напряжения, времени и силы тока):

$\bar{W}, \Delta W - ?$

$$W = f(U, m_{Zn}, I, \tau) = \frac{1000U}{m_{Zn}} I \tau.$$

Случайную ошибку определяем по формуле

$$\Delta W \approx \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial U}\right)^2 \Delta U^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial m_{Zn}}\right)^2 \Delta m_{Zn}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right)^2 \Delta I^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)^2 \Delta \tau^2.}$$

Выразим и рассчитаем частные производные функции  $f$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial U} &= \frac{1000}{m_{Zn}} I \tau = \frac{1000}{0,0972} \cdot 0,1 \cdot 1 = 1028,8, \\ \frac{\partial f}{\partial m_{Zn}} &= -\frac{1000}{m_{Zn}^2} I \tau = -\frac{1000}{0,0972^2} \cdot 0,1 \cdot 1 = -10\,584, \\ \frac{\partial f}{\partial I} &= \frac{1000U}{m_{Zn}} \tau = \frac{1000 \cdot 2,91}{0,0972} \cdot 1 = 29\,938, \\ \frac{\partial f}{\partial \tau} &= \frac{1000U}{m_{Zn}} I = \frac{1000 \cdot 2,91}{0,0972} \cdot 0,1 = 2993,8. \end{aligned}$$

Случайная ошибка будет равна:

$$\begin{aligned} \Delta W &\approx \sqrt{(1028,8 \cdot 0,03)^2 + (-10\,584 \cdot 0,0011)^2 + (29\,938 \cdot 0,001)^2 + (2993,8 \cdot 0,01)^2} = \\ &= \sqrt{(30,864)^2 + (-11,6424)^2 + (29,938)^2 + (29,938)^2} \approx 54 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.} \end{aligned}$$

Ответ:  $W = (2994 \pm 54) \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$

### 1.5.5. Определение минимального числа повторных опытов

Определение минимального числа повторных опытов для достижения требуемой точности измерения некоторой величины проводится с использованием соотношения (19). Согласно этому выражению, при увеличении числа повторных опытов случайная ошибка уменьшается. Помимо случайной ошибки измерений ( $\Delta$ ), существуют также систематические (приборные) ошибки ( $\theta$ ), которые нельзя снизить проведением повторных опытов. Поэтому минимальное число повторных опытов определяется из условия  $\Delta = \theta$ , откуда

$$n_{\min} = \frac{u_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2}{\theta^2}. \quad (25)$$

При этом необходимо знать дисперсию измерений  $\sigma^2$  и принять уровень значимости  $\alpha$ . В качестве дисперсии измерений можно выбрать ее выборочную оценку (16) при достаточно большом объеме выборки (20–50 повторных опытов). Уровень значимости обычно принимают равным 0,05 или 0,1.

**Пример 10.** Рассчитать минимально необходимое число опытов определения потенциала коррозии, чтобы снизить случайную ошибку до 10 мВ при уровнях значимости 0,1 и 0,05, если предварительно найденное значение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  для определения потенциала коррозии составляет 14 мВ.

<i>Дано:</i> $\sigma = 14$ мВ $\theta = 10$ мВ а) $\alpha = 0,1$ б) $\alpha = 0,05$ <hr/> $n_{\min} - ?$	<i>Решение.</i> Из табл. ПЗ.1 выбираем значения $u_{1-\alpha/2}$ : $u_{1-0,1/2} = u_{0,95} = 1,645$ и $u_{1-0,05/2} = u_{0,975} = 1,960$ . По формуле (25) рассчитываем $n_{\min}$ : а) $\alpha = 0,1$ , $n_{\min} = \frac{u_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2}{\theta^2} = \frac{1,645^2 \cdot 14^2}{10^2} \approx 5$ ; б) $\alpha = 0,05$ , $n_{\min} = \frac{u_{1-\alpha/2}^2 \sigma^2}{\theta^2} = \frac{1,960^2 \cdot 14^2}{10^2} \approx 8$ .
---	---

*Ответ:* а) 5; б) 8.

### 1.5.6. Оценка однородности дисперсий

Проверка однородности двух дисперсий может использоваться для оценки воспроизводимости измерений либо для сравнения точности измерений какой-то величины разными методами или приборами.

Пусть имеются выборки результатов измерения некоторой величины разными методами, приборами либо в различные периоды времени.

Для проверки однородности дисперсий используют критерий Фишера, который представляет собой отношение большей выборочной дисперсии к меньшей:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (26)$$

где  $S_1^2$  и  $S_2^2$  – выборочные несмещенные оценки дисперсии, рассчитываемые по формуле (16), для первой и второй выборок соответственно, причем  $S_1^2 > S_2^2$ .

Дисперсии считаются однородными, если

$$F < F_{\text{кр}}(\alpha, f_1, f_2), \quad (27)$$

где  $F_{\text{кр}}(\alpha, f_1, f_2)$  – критическое значение критерия Фишера, выбираемое из соответствующих таблиц при выбранном уровне значимости  $\alpha$  и числах степеней свободы  $f_1$  для первой выборки и  $f_2$  для второй выборки. Число степеней свободы равно

$$f = n - 1, \quad (28)$$

где  $n$  – объем выборки.

Для уровня значимости 0,05 критические значения критерия Фишера приведены в табл. ПЗ.5.

**Пример 11.** Рассчитать и оценить по критерию Фишера при уровне значимости 0,05 однородность дисперсий определения толщины покрытия гравиметрическим и радиометрическим методами на основании следующих выборочных результатов.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$d_1$ , мкм	11,9	12,5	12,4	9,5	14,2	12,9	10,5	13,1
$d_2$ , мкм	12,6	12,0	10,5	11,6	11,2	11,9	11,4	12,0

*Решение.* Находим средние арифметические значения и дисперсии в обеих выборках по формулам (15) и (16):

$$\bar{d}_1 = \frac{11,9 + 12,5 + 12,4 + 9,5 + 14,2 + 12,9 + 10,5 + 13,1}{8} \approx 12,13,$$

$$\bar{d}_2 = \frac{12,6 + 12,0 + 10,5 + 11,6 + 11,2 + 11,9 + 11,4 + 12,0}{8} = 11,65,$$

$$S_1^2 = \frac{1}{8}[(11,9 - 12,13)^2 + (12,5 - 12,13)^2 + (12,4 - 12,13)^2 + (9,5 - 12,13)^2 + (14,2 - 12,13)^2 + (12,9 - 12,13)^2 + (10,5 - 12,13)^2 + (13,1 - 12,13)^2] = 2,24,$$

$$S_2^2 = \frac{1}{8}[(12,6 - 11,65)^2 + (12,0 - 11,65)^2 + (10,5 - 11,65)^2 + (11,6 - 11,65)^2 + (11,2 - 11,65)^2 + (11,9 - 11,65)^2 + (11,4 - 11,65)^2 + (12,0 - 11,65)^2] = 0,40.$$

Рассчитываем критерий Фишера по формуле (26):

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{2,24}{0,40} = 5,6.$$

Критическое значение критерия Фишера выбираем из табл. ПЗ.5 при уровне значимости 0,05 и числах степеней свободы  $f_1 = 8 - 1 = 7$  и  $f_2 = 8 - 1 = 7$ :

$$F_{кр}(0,05; 7; 7) = 3,79.$$

Поскольку  $F > F_{кр}(0,05; 7; 7)$ , то дисперсии не являются однородными. Первая дисперсия значительно больше второй, и, следовательно, гравиметрический метод определения толщины покрытия менее точен, чем радиометрический.

*Ответ.* Дисперсии не однородны; радиометрический метод определения толщины покрытия следует считать более точным, чем гравиметрический.

### 1.5.7. Контрольные вопросы и задания

1. Понятие случайной величины.
2. Функция распределения и плотность распределения случайной величины.
3. Математическое ожидание случайной величины и его свойства.
4. Дисперсия случайной величины и ее свойства. Среднеквадратичное отклонение.
5. Нормальное распределение и его роль в обработке ошибок.
6. Понятие генеральной совокупности и выборки.
7. Выборочные оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения.
8. Упорядочение элементов выборки. Вариационный ряд и размах выборки.
9. Частотный анализ выборки: статистический ряд, частота, накопленная частота.

10. Группировка. Частотная табуляция. Гистограммы выборочной функции и плотности распределения.

11. Построение доверительного интервала для математического ожидания при известной дисперсии.

12. Построение доверительного интервала для математического ожидания при неизвестной дисперсии.

13. Доверительный интервал для дисперсии.

14. Определение минимального числа измерений.

15. Оценка случайных ошибок косвенных измерений.

16. Статистические распределения:  $\chi^2$ -распределение.

17. Статистические распределения: распределение Стьюдента.

18. Статистические распределения: распределение Фишера.

19. Выявление грубых ошибок: правило  $3\sigma$ .

20. Выявление грубых ошибок: критерий грубых ошибок.

21. Оценка воспроизводимости измерений: критерий Фишера.

22. Оценка воспроизводимости измерений: критерий Кохрена.

23. Оценка воспроизводимости измерений: критерий Бартлетта.

24. Проверка нормальности распределения.

25. При изучении процесса электроэкстракции цинка была проведена серия опытов, в которых определялась масса катодного осадка цинка  $m_{Zn}$ . Результаты опытов приведены ниже.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_{Zn}, \text{ г}$	0,0955	0,0976	0,0976	0,0981	0,0987	0,0958	0,0957	0,0985

Рассчитайте выборочную оценку математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для измеренных значений массы цинка. Постройте доверительный интервал для математического ожидания и определите случайную ошибку при уровне значимости 0,05.

26. При изучении процесса электроэкстракции цинка была проведена серия опытов, в которых фиксировалось напряжение на электролизере  $U$ . Результаты измерений представлены в виде таблицы.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U, \text{ В}$	2,87	2,92	2,85	2,87	2,94	2,96	2,94	2,92

Найдите выборочные оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для измеренных значений напряжения на электролизере. Постройте доверительный интервал для

математического ожидания и определите случайную ошибку при уровне значимости 0,05.

27. При изучении процесса электрорафинирования меди была проведена серия опытов, в которых определялась масса катодного осадка меди  $m_{Cu}$ . Результаты измерений приведены ниже.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_{Cu}$ , г	0,1122	0,1171	0,1137	0,1140	0,1143	0,1126	0,1126	0,1125

Рассчитайте выборочные оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для измеренных значений массы меди. Постройте доверительный интервал для математического ожидания и определите случайную ошибку при уровне значимости 0,05.

28. При изучении процесса электрорафинирования меди была проведена серия опытов, в которых фиксировалось напряжение на электролизере. Результаты измерений представлены в виде таблицы.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U$ , В	0,332	0,335	0,343	0,334	0,339	0,346	0,336	0,340

Найдите выборочные оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для измеренных значений напряжения. Постройте доверительный интервал для математического ожидания и определите случайную ошибку при уровне значимости 0,05.

29. При изучении процесса электрорафинирования никеля была проведена серия опытов, в которых фиксировалось напряжение на электролизере  $U$ . Результаты измерений приведены ниже.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U$ , В	2,44	2,46	2,52	2,46	2,49	2,50	2,54	2,47

Рассчитайте выборочные оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для измеренных значений напряжения на электролизере. Постройте доверительный интервал для математического ожидания и определите случайную ошибку при уровне значимости 0,05.

30. Вычислите и оцените однородность дисперсий для двух серий измерений напряжения на электролизере по критерию Фишера при уровне значимости 0,05. Результаты опытов представлены в виде таблицы.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_1, В$	0,371	0,374	0,383	0,374	0,379	0,380	0,386	0,376
$U_2, В$	0,332	0,335	0,343	0,334	0,339	0,346	0,336	0,340

31. Рассчитайте и определите однородность дисперсий для двух серий измерений напряжения на электролизере по критерию Фишера при уровне значимости 0,05. Результаты опытов приведены ниже.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_1, В$	2,05	2,07	2,12	2,06	2,09	2,10	2,14	2,08
$U_2, В$	0,332	0,335	0,343	0,334	0,339	0,346	0,336	0,340

32. Вычислите и сравните однородность дисперсий для двух серий измерений массы катодных осадков металлов по критерию Фишера при уровне значимости 0,05. Результаты опытов представлены в виде таблицы.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_1, г$	0,1900	0,1983	0,1926	0,1930	0,1936	0,1908	0,1906	0,1905
$m_2, г$	0,1122	0,1171	0,1137	0,1140	0,1143	0,1126	0,1126	0,1125

33. Рассчитайте и сравните однородность дисперсий для двух серий измерений массы катодных осадков металлов по критерию Фишера при уровне значимости 0,05. Результаты опытов приведены ниже.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_1, мг$	90,2	94,2	91,5	91,7	91,9	90,6	90,5	90,4
$m_2, мг$	103,6	108,1	105,0	105,3	105,5	104,0	103,9	103,8

34. При измерении шероховатости электроосажденного покрытия были проведены две серии измерений с использованием различных приборов. Получены следующие результаты.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1, мкм$	0,48	0,57	0,37	0,54	0,48	0,50	0,54	0,42	0,47
$R_2, мкм$	0,51	0,47	0,54	0,34	0,61	0,32	0,58	0,45	0,64

Вычислите и определите однородность дисперсий для двух серий измерений по критерию Фишера при уровне значимости 0,05. Имеется ли значимое отличие в точности приборов?

35. Оцените среднее значение и случайную ошибку определения выхода по току по результатам косвенных измерений массы цинка,

силы тока и времени электролиза. Выход по току находится с помощью следующей формулы:

$$Vm = \frac{m_{Zn}}{qI\tau}.$$

При расчетах учтите, что электролиз проводился при силе тока  $I = (100 \pm 1)$  мА в течение времени  $\tau = (1 \pm 0,01)$  ч, масса полученного цинка  $m_{Zn} = (96 \pm 2)$  мг. Электрохимический эквивалент цинка  $q$  составляет  $1,22$  г/(А · ч).

36. Оцените среднее значение и случайную ошибку определения удельного расхода электроэнергии для процесса электрохимического выделения цинка по результатам косвенных измерений напряжения на электролизере и выхода по току. Удельный расход электроэнергии рассчитывается по следующей формуле:

$$W = \frac{1000U}{q \cdot Vm}.$$

Примите значение напряжения равным  $U = (2,92 \pm 0,2)$  В, выход по току  $Vm = 0,91 \pm 0,02$ . Электрохимический эквивалент цинка  $q$  считайте равным  $1,22$  г/(А · ч).

37. Оцените среднее значение и случайную ошибку определения выхода по току щелочи по результатам косвенных измерений объемов растворов при титровании. Выход по току вычисляется по формуле

$$Vm = \frac{0,268V_T V_3}{I\tau},$$

где  $V_T$  – объем титранта, равный  $(6,7 \pm 0,3)$  мл;  $V_3$  – объем раствора в электролизере, принимаемый  $(0,1 \pm 0,001)$  л;  $I$  – сила тока, равная  $(0,2 \pm 0,001)$  А;  $\tau$  – время электролиза, принимаемое  $(1 \pm 0,01)$  ч.

38. Рассчитайте минимальное количество повторных опытов, необходимых для снижения случайной ошибки измерения напряжения до 10 мВ при уровне значимости 0,05, если среднеквадратичное отклонение напряжения в серии измерений составляет 30 мВ.

39. Найдите минимальное число повторных измерений шероховатости поверхности, необходимое для снижения случайной ошибки до 0,1 мкм при уровне значимости 0,1. Предварительно определенное значение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  составило 0,25 мкм.

40. При вычислении плотности тока обмена реакции выделения водорода на серебряном электроде получены следующие результаты.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lg i_0$	-5,79	-5,39	-5,76	-5,77	-5,72	-5,68	-6,60	-5,29

Проверьте с помощью критерия грубых ошибок при уровне значимости 0,05, не является ли подозрительное значение в 7-м опыте грубой ошибкой. При необходимости исключите грубую ошибку и рассчитайте случайную ошибку определения  $\lg i_0$  при уровне значимости 0,05.

41. Выполнено 6 повторных измерений шероховатости поверхности.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6
$R$ , мкм	0,44	0,49	0,49	0,54	0,72	0,36

Проверьте с помощью критерия грубых ошибок при уровне значимости 0,05, не является ли подозрительное значение в 5-м опыте грубой ошибкой. При необходимости исключите грубую ошибку и рассчитайте случайную ошибку определения  $R$  при уровне значимости 0,05.

42. Повторные измерения толщины гальванического покрытия показали следующие результаты.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7
$d$ , мкм	13,2	13,5	12,3	14,6	11,0	12,7	11,8

Проверьте с помощью критерия грубых ошибок при уровне значимости 0,05, не является ли результат 4-го опыта грубой ошибкой. При необходимости исключите грубую ошибку и рассчитайте случайную ошибку определения  $d$  при уровне значимости 0,05.

43. Оцените среднее значение и случайную ошибку толщины гальванически осажденного никеля по результатам косвенных измерений силы тока, времени, площади поверхности покрытия и выхода по току, используя следующую формулу:

$$d = \frac{I \tau g}{S \rho} Bm,$$

где  $I$  – сила тока, равная  $(0,4 \pm 0,01)$  А;  $\tau$  – время осаждения покрытия, принимаемое  $(900 \pm 5)$  с;  $g$  – электрохимический эквивалент никеля, принимаемый постоянным и равным  $3,04 \cdot 10^{-3}$  г/(А · с);  $S$  – площадь поверхности, принимаемая  $(10 \pm 0,14)$  см<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность никеля, равная  $8,90$  г/см<sup>3</sup>;  $Bm$  – выход по току, принимаемый  $0,9 \pm 0,01$ .

44. Рассчитайте минимально необходимое число повторных измерений  $pH$  для снижения случайной ошибки измерений до 0,05 при уровне значимости 0,1, если предварительно найденное значение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  составило 0,1.

45. Проведите первичную обработку выборки – частотную таблицу – мощностей заводов по производству хлора в Европе:

а) методом с ионообменной мембраной – мощности заводов (кТ/год): 70, 144, 174, 270, 75, 150, 20, 120, 215, 400, 330, 110, 250, 250, 45, 555, 88, 85, 260, 180, 50, 4, 20, 160, 9, 27, 20, 25, 150, 120, 633, 109, 89, 45, 10, 260, 48, 214, 26, 72, 105, 107, 16, 30, 55, 15, 400, 7;

б) методом с ртутным катодом – мощности заводов (кТ/год): 290, 170, 135, 61, 40, 72, 170, 166, 23, 240, 18, 170, 130, 125, 137, 149, 167, 40, 131, 42, 78, 186, 76, 48, 135, 34, 115, 31, 218, 63, 120, 27, 277.

Постройте выборочные функцию и плотность распределения.

## **1.6. Оформление результатов научных исследований**

### **1.6.1. Примерная структура отчета о научно-технических исследованиях**

Титульный лист.

Список исполнителей.

Реферат.

Содержание.

Перечень условных обозначений, символов, единиц и терминов.

Введение.

Основная часть:

- аналитический обзор литературы;
- объекты (методика) исследования;
- результаты исследований;
- обсуждение результатов.

Заключение.

Список использованных источников.

Приложения.

### **1.6.2. Контрольные вопросы**

1. Общие требования к научно-исследовательской работе.
2. Структура отчета о научно-исследовательской работе.
3. Содержание реферата.

4. Что должно содержать введение к отчету о НИР?
5. Содержание основной части отчета о НИР.
6. Что выносится в заключение при оформлении отчета о НИР?
7. Что может включаться в приложения к отчету о НИР?
8. Общие требования к правилам оформления отчета о НИР.
9. Нумерация страниц, разделов, подразделов, рисунков, таблиц и формул.
10. Требования к оформлению рисунков.
11. Требования к оформлению формул.
12. Требования к оформлению таблиц.
13. Содержание и оформление титульного листа.
14. Последовательность подготовки материалов исследования к опубликованию.
15. Что представляет собой научный стиль изложения материала?

## **2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛУ «ОСНОВЫ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ»**

### **2.1. Инновация как экономическая категория**

1. Сущность и содержание понятий «инновация», «инновационный процесс», «инновационная деятельность».
2. Предмет и место системы управления инновациями.
3. Понятие о теории инновационных процессов, или инноватике.
4. Классификация инновационных процессов и продуктов.
5. Связь научно-технологического развития и экономического роста.
6. Теория длинных волн Н. Д. Кондратьева.
7. Теория экономического развития Шумпетера.
8. Понятие технологического уклада.
9. Фазы развития технологического уклада.
10. Краткое содержание технологических укладов.

### **2.2. Инновационный процесс и инновационная деятельность**

1. Фундаментальные и прикладные НИР как основа инновационной деятельности.
2. Основные этапы инновационных процессов.
3. Поисковые НИР как начальный этап инновационного процесса.
4. Прикладные НИР как второй этап инновационного процесса.
5. Третий этап инновационного процесса.
6. Что входит в заключительный этап инновационного процесса?
7. Жизненный цикл инноваций.
8. Жизненные циклы спроса, технологий, товаров.
9. Виды технологий с точки зрения жизненных циклов спроса, технологии, товара.
10. Понятие инновационной цели.
11. Инновационный проект и его уровни научно-технической значимости.

12. Классификация инновационных проектов с точки зрения масштабности решаемых задач.
13. Виды инновационных проектов по степени охвата этапов инновационного процесса.
14. Инновационная программа как комбинация инновационных проектов.
15. Способы выделения инновационных структур в крупных компаниях.
16. Гибкие структуры сквозного управления инновационной деятельностью в крупных компаниях, использующие горизонтальные связи между подразделениями НИОКР, производства и сбыта.
17. Комплексная и техническая подготовка производства к освоению нового продукта, технологии.
18. Бригадное новаторство и временные творческие коллективы.
19. Формы малого инновационного предпринимательства.
20. «Фирмы-инкубаторы» как форма инновационной деятельности.
21. Малые инновационные предприятия как форма инновационной деятельности в Республике Беларусь.
22. Понятия бизнес-инкубатора и инновационного центра.
23. Научно-технологические парки и основные направления их деятельности.

### **2.3. Управление инновациями и инвестиции в инновационный процесс**

1. Общая характеристика методов и приемов управления инновациями.
2. Методы прогнозирования инноваций.
3. Методы поиска идей инноваций.
4. Инжиниринг и реинжиниринг инноваций.
5. Бенчмаркинг и исследование сравнительной конкурентоспособности компаний.
6. Брэнд-стратегия инноваций.
7. Ценовой прием управления инновациями.
8. Фронтирование рынка.
9. Сопротивление инновациям и его источники.
10. Методы управления сопротивлением инновациям.
11. Повышенные риски инвестиций в инновационный процесс.
12. Источники инвестиций в инновационный процесс.

13. Характеристика бюджетных ассигнований в инвестиционный процесс.

14. Формы иностранных инвестиций в инновационный процесс.

15. Собственные средства организаций как источник финансирования инновационной деятельности.

16. Факторы инвестиционной привлекательности инновационных проектов и программ.

## **2.4. Государственная инновационная политика**

1. Сущность государственной научно-технической и инновационной политики.

2. Основные принципы государственного системного подхода к инновационным процессам.

3. Цели и задачи инновационной политики государства.

4. Основные условия, необходимые для развития инновационной деятельности.

5. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь.

6. Методы реализации инновационной политики государства.

7. Приоритетные направления научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь.

8. Предпосылки инновационной политики Республики Беларусь.

9. Органы государственного управления в сфере научной и инновационной деятельности.

10. Субъекты инновационной инфраструктуры в Республике Беларусь.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Пример оформления титульного листа ТЗ на УИРС

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования «Белорусский государственный  
технологический университет»

Кафедра химии, технологии электрохимических производств  
и материалов электронной техники

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ РАБОТУ ПО ТЕМЕ «УСЛОВИЯ НАНЕСЕНИЯ ЦИНКОВЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ МАРКИ Д16»

СОГЛАСОВАНО

ИСПОЛНИТЕЛЬ  
Студент V курса 11 гр. ХТиТ

\_\_\_\_\_  
РУКОВОДИТЕЛЬ  
\_\_\_\_\_

Минск 20\_\_

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Пример составления ТЗ на УИРС

1. Основание для проведения исследований – учебный план специальности.

2. Сроки выполнения: начало \_\_\_\_\_, окончание \_\_\_\_\_.

3. Цель исследования – определение факторов для оптимизации процесса нанесения цинковых гальванических покрытий на алюминиевый сплав Д16.

4. Задачи исследования – выбор варьируемых факторов процесса нанесения цинковых гальванических покрытий на алюминиевый сплав Д16; выбор метода коррозионных испытаний; определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на коррозионную устойчивость покрытий.

5. Исходные данные – базовые учебники по гальванотехнике (также могут быть результаты предварительных исследований, известные составы растворов и последовательность операций осаждения цинка на аналогичные подложки, например на алюминий, и др.).

6. Этапы НИР.

6.1. Литературный поиск и выбор базовых составов растворов и условий для предварительной подготовки поверхности, гальванического осаждения и финишных операций нанесения цинковых покрытий на алюминиевый сплав Д16 или сходные материалы (раздел отчета – литературный обзор).

6.2. Выбор варьируемых факторов (содержание некоторых компонентов в растворе, температура, продолжительность операций и т. д.), по которым экспериментально будет определяться их влияние на коррозионную устойчивость, а также основного уровня и интервалов варьирования этих факторов, составление плана эксперимента (раздел отчета – экспериментальная часть, методика).

6.3. Выбор метода коррозионных испытаний и параметров коррозионной устойчивости, по которым будет проводиться оптимизация (раздел отчета – экспериментальная часть, методика).

6.4. Нанесение покрытий на образцы алюминиевого сплава Д16 с контролем толщины покрытий (гравиметрическим или другим методом), выхода по току и других параметров покрытия или условий нанесения покрытия (раздел отчета – экспериментальная часть, результаты).

6.5. Коррозионные испытания покрытий и определение параметров коррозионной устойчивости (раздел отчета – экспериментальная часть, результаты).

6.6. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований, сопоставление их с результатами, известными из литературных источников (раздел отчета – экспериментальная часть, результаты или обсуждение результатов).

6.7. Выбор факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметры коррозионной устойчивости покрытий (раздел отчета – заключение или выводы).

6.8. Выработка предложений по использованию полученных результатов, например, для дальнейшей оптимизации условий нанесения цинковых покрытий на алюминиевый сплав Д16 (раздел отчета – заключение или выводы).

6.9. Составление отчета о НИР, подготовка материалов для докладов или для публикации в печати.

7. Требования к результатам.

Параметры коррозионной устойчивости должны быть получены в соответствии со стандартами или другими нормативно-техническими документами.

Уровни варьируемых факторов и интервалы варьирования должны соответствовать точности используемых методов контроля и поддержания (например, температура, время или состав раствора).

8. Способ реализации результатов – использование для дальнейших исследований и др.

9. Перечень документации, предъявляемой по результатам исследования, – отчет о НИР согласно ГОСТ 7.32-2001 (проект технического задания на другую НИР, например для детальной оптимизации процесса по выбранным факторам).

10. Требования к обеспечению коммерческой тайны – необходимы ли разрешения (руководства БГТУ или предприятия-заказчика) на опубликование результатов.

11. Порядок рассмотрения, сдачи и приемки результатов.

Этапы НИР рассматриваются в соответствии с календарным графиком проведения исследований. Сдача и защита отчета о НИР происходит в установленные сроки.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Статистические таблицы

Таблица П3.1

Квантили  $u_q$  стандартного нормального распределения при некоторых уровнях  $q$

$q$	0,95	0,975	0,995
$u_q$	1,645	1,960	2,576

Таблица П3.2

Квантили  $t_q(n-1)$  распределения Стьюдента с  $n-1$  степенью свободы при некоторых уровнях  $q$

$n-1$	$q$		
	0,95	0,975	0,995
1	6,314	12,706	63,657
2	2,920	4,303	9,925
3	2,353	3,182	5,841
4	2,132	2,776	4,604
5	2,015	2,571	4,032
6	1,943	2,447	3,707
7	1,895	2,365	3,499
8	1,860	2,306	3,355
9	1,833	2,262	3,250
10	1,812	2,228	3,169
$\infty$	1,645	1,960	2,576

Таблица П3.3

Квантили  $\chi_q^2(n-1)$  распределения  $\chi^2$  с  $n-1$  степенью свободы при некоторых уровнях  $q$

$n-1$	$q$					
	0,05	0,95	0,025	0,975	0,005	0,995
1	$3,93 \cdot 10^{-3}$	3,84	$9,82 \cdot 10^{-4}$	5,02	$3,93 \cdot 10^{-5}$	7,88
2	0,103	5,99	0,0506	7,38	0,0100	10,6
3	0,352	7,81	0,216	9,35	0,0717	12,8
4	0,711	9,49	0,484	11,1	0,207	14,9
5	1,15	11,1	0,831	12,8	0,412	16,7
6	1,64	12,6	1,24	14,4	0,676	18,5
7	2,17	14,1	1,69	16,0	0,989	20,3

Окончание табл. ПЗ.3

$n - 1$	$q$					
	0,05	0,95	0,025	0,975	0,005	0,995
8	2,73	15,5	2,18	17,5	1,34	22,0
9	3,33	16,9	2,70	19,0	1,73	23,6
10	3,94	18,3	3,25	20,5	2,16	25,2

Таблица ПЗ.4

**Максимальные значения критерия грубых ошибок  $\beta_{\max}$  при разных уровнях значимости  $\alpha$  и в зависимости от объема выборки  $n$**

$n$	$\alpha$			$n$	$\alpha$		
	0,1	0,05	0,01		0,1	0,05	0,01
3	1,41	1,41	1,41	15	2,33	2,49	2,80
4	1,64	1,69	1,72	16	2,35	2,52	2,84
5	1,79	1,87	1,96	17	2,38	2,55	2,87
6	1,89	2,00	2,13	18	2,40	2,58	2,90
7	1,97	2,09	2,26	19	2,43	2,60	2,93
8	2,04	2,17	2,37	20	2,45	2,62	2,96
9	2,10	2,24	2,46	25	2,54	2,72	3,07
10	2,15	2,29	2,54	30	2,61	2,79	3,16
11	2,19	2,34	2,61	35	2,67	2,85	3,22
12	2,23	2,39	2,66	40	2,72	2,90	3,28
13	2,26	2,43	2,71	45	2,76	2,95	3,33
14	2,30	2,46	2,76	50	2,80	2,99	3,37

Таблица ПЗ.5

**Критические значения критерия Фишера при уровне значимости 0,05 и различных числах степеней свободы  $f_1$  и  $f_2$**

$f_2$	$f_1$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,39	19,40
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
10	4,97	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98

# ЛИТЕРАТУРА

## ***Основная литература***

1. Основы научных исследований: учебник для технических вузов / В. И. Крутов [и др.]; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М.: Высш. шк., 1989. – 399 с.
2. Ставров, В. П. Основы научной и инновационной деятельности / В. П. Ставров. – Минск: БГТУ, 2010. – 319 с.
3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
4. Жарский, И. М. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие / И. М. Жарский, Б. А. Коледин, И. Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2003. – 179 с.
5. Потапов, В. М. Химическая информация: где и как искать химику нужные сведения / В. М. Потапов, Э. К. Кочетова. – М.: Химия, 1988. – 223 с.
6. Кудашов, В. И. Управление интеллектуальной собственностью: учеб. пособие / В. И. Кудашов. – 2-е изд. – Минск: ИВЦ Минфина, 2008. – 359 с.
7. Практикум по электрохимии: учеб. пособие / Б. Б. Дамаскин [и др.]; под ред. Б. Б. Дамаскина. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.
8. Ильенкова, С. Д. Инновационный менеджмент: учебник для вузов / С. Д. Ильенкова, Л. М. Гохберг, С. Ю. Ягудин; под ред. С. Д. Ильенковой. – М.: Банки и биржи: ЮНИТИ, 1997. – 328 с.
9. Мясникович, М. В. Государственное регулирование инновационной деятельности: учеб. пособие / М. В. Мясникович, Н. Б. Антонова, Л. Н. Нехорошева. – Минск: Академия управления при Президенте Респ. Беларусь, 2005. – 235 с.

## ***Дополнительная литература***

10. Рузавин, Г. И. Концепции современного естествознания: учебник для вузов / Г. И. Рузавин. – М.: ЮНИТИ, 2005. – 288 с.
11. Рузавин, Г. И. Методы научного исследования / Г. И. Рузавин. – М.: Мысль, 1974. – 237 с.

12. Канке, В. А. Концепции современного естествознания: учебник для вузов / В. А. Канке. – М.: Логос, 2002. – 368 с.
13. Гоберман, В. А. Технология научных исследований – методы, модели, оценки: учеб. пособие / В. А. Гоберман, Л. А. Гоберман. – М.: МГУЛ, 2004. – 390 с.
14. Налимов, В. В. Логические основания планирования эксперимента / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 151 с.
15. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.
16. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери; пер. с англ. В. А. Коняева. – Л.: Судостроение, 1980. – 383 с.
17. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высш. шк., 1991. – 399 с.
18. Бояринов, А. И. Методы оптимизации в химической технологии: учеб. пособие / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1975. – 574 с.
19. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
20. Марченко, В. М. Методы оптимизации и статистической обработки результатов измерений: учеб. пособие / В. М. Марченко. – Минск: БГТУ, 2007. – 140 с.
21. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
22. Капица, П. Л. Эксперимент. Теория. Практика: статьи и выступления / П. Л. Капица. – 4-е изд. – М.: Наука, 1987. – 494 с.
23. Гамидов, Г. С. Основы инноватики и инновационной деятельности / Г. С. Гамидов, В. Г. Колосов, Н. О. Османов; под ред. Г. С. Гамидова. – СПб.: Политехника, 2000. – 234 с.
24. Балабанов, И. Т. Инновационный менеджмент: учеб. пособие / И. Т. Балабанов. – СПб.: Питер, 2001. – 303 с.
25. Никитенко, П. Г. Инновационная деятельность и устойчивое развитие: теория и методология / П. Г. Никитенко, А. В. Марков; Ин-т экономики НАН, Белорус. ин-т правоведения. – Минск: БИП-С, 2003. – 93 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Основы научных исследований.....	4
1.1. Методологические основы научного познания и творчества.....	4
Контрольные вопросы.....	4
1.2. Информационный поиск.....	5
1.2.1. Системы поиска научно-технической и патентной информации в сети Интернет.....	5
1.2.2. Контрольные вопросы.....	6
1.3. Теоретические и экспериментальные исследования.....	7
1.3.1. Техническое задание на проведение исследований.....	7
1.3.2. Контрольные вопросы.....	7
1.4. Элементы теории планирования эксперимента.....	8
1.4.1. Обобщенный параметр оптимизации.....	8
1.4.2. Полный факторный эксперимент $2^k$ .....	14
1.4.3. Контрольные вопросы и задания.....	19
1.5. Анализ и обработка результатов экспериментальных исследований.....	22
1.5.1. Первичная статистическая обработка выборки.....	22
1.5.2. Построение доверительных интервалов.....	26
1.5.3. Исключение грубых ошибок.....	30
1.5.4. Оценка случайных ошибок косвенных измерений.....	31
1.5.5. Определение минимального числа повторных опытов.....	33
1.5.6. Оценка однородности дисперсий.....	33
1.5.7. Контрольные вопросы и задания.....	35
1.6. Оформление результатов научных исследований.....	41
1.6.1. Примерная структура отчета о научно-технических исследованиях.....	41
1.6.2. Контрольные вопросы.....	41
2. Контрольные вопросы по разделу «Основы инновационной деятельности».....	43
2.1. Инновация как экономическая категория.....	43
2.2. Инновационный процесс и инновационная деятельность.....	43

2.3. Управление инновациями и инвестиции в инновационный процесс .....	44
2.4. Государственная инновационная политика .....	45
Приложение 1. Пример оформления титульного листа ТЗ на УИРС .....	46
Приложение 2. Пример составления ТЗ на УИРС .....	47
Приложение 3. Статистические таблицы .....	49
Литература .....	51

# ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Составитель **Матыс** Владимир Генрихович

Редактор *Е. С. Ватеичкина*  
Компьютерная верстка *Е. С. Ватеичкина*  
Корректор *Е. С. Ватеичкина*

Издатель:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.