

# **ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Допущено Федеральным учебно-методическим объединением  
в системе высшего образования по укрупненной группе  
специальностей и направлений подготовки  
«Авиационная и ракетно-космическая техника»  
в качестве учебника для студентов и аспирантов,  
обучающихся по основным образовательным программам  
высшего образования по направлению подготовки  
«Авиационная и ракетно-космическая техника»

**Б И Б Л И О Т Е К А**  
Учреждения образования  
"Гомельский государственный  
технический университет  
имени П.О. Сухого" №

Старый Оскол  
ТНТ  
2022

**Планирование и обработка результатов эксперимента** : учебник / [С. В. Бочкарев и др.]. — Старый Оскол : ТНТ, 2022. — 507 с. : ил., табл. — Библиогр. : с. 506—507.

ББК 72.5я73

**Абонемент уч. лит. — 3 экз.**

**Чит. зал №1 — 2 экз.**

Представлены материалы, которые условно разделены на четыре основные части, соответствующие главным методам научного исследования в технике: методология научного исследования, теория подобия, теория математического планирования и обработки результатов инженерного эксперимента, читаемых в соответствующих дисциплинах. Рассмотрены логика научного исследования (постановка задачи, основные этапы исследования, их структура и содержание), основные признаки подобных систем (виды подобия, константы и критерии подобия), приведены основные теоремы теории подобия. Показано, как можно понизить размерность задачи и сделать обобщающие выводы для исследуемой группы подобных объектов или явлений, принципы построения экспертных систем. Изложены основные принципы построения плана эксперимента, как для линейных, так и нелинейных моделей, включая квадратичные модели. Рассмотрены основные алгоритмы проведения эксперимента при поиске оптимальных условий. Показано, как необходимо обрабатывать результаты экспериментов, чтобы получать достоверные характеристики на основе данных, имеющих погрешности. Представлено большое количество практических примеров, способствующих более глубокому пониманию и освоению теоретических разделов изучаемых дисциплин.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Аббревиатура .....	9
Введение .....	11
<b>ГЛАВА 1. ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>14</b>
1.1. Основные понятия методов экспериментального исследования .....	14
1.2. Задачи теоретических и экспериментальных исследований ...	21
1.3. Классификация экспериментальных исследований .....	24
Контрольные вопросы .....	29
<b>ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>30</b>
2.1. Основные понятия и определения в измерительной технике ...	30
2.2. Классификация измерений .....	31
2.3. Методы измерений .....	33
2.4. Погрешности измерений .....	38
2.5. Погрешность и неопределенность .....	42
2.6. Правила округления результатов измерений .....	45
2.7. Классы точности средств измерений .....	48
Контрольные вопросы .....	52
<b>ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>53</b>
3.1. Функциональная схема экспериментального исследования ...	53
3.2. Назначение систем автоматизации экспериментальных исследований .....	55
3.3. Основные требования и принципы построения системы автоматизации экспериментальных исследований .....	56

3.4.	Слагаемые экспериментального исследования.....	58
3.4.1.	Патентное исследование .....	58
3.4.2.	Техническое задание (ТЗ) .....	59
3.4.3.	Обзор результатов предыдущих исследований .....	59
3.4.4.	Выбор метода и средства экспериментального исследования .....	60
3.4.5.	Планирование эксперимента .....	60
3.4.6.	Безопасность труда и охрана окружающей среды .....	61
3.4.7.	Выбор уровня автоматизации .....	62
3.4.8.	Поиск оптимальных решений .....	63
3.4.9.	Анализ полученных результатов.....	64
3.4.10.	Отчет о научно-исследовательской работе .....	64
	Контрольные вопросы .....	65
<b>ГЛАВА 4.</b>	<b>ОПИСАТЕЛЬНАЯ СТАТИСТИКА .....</b>	<b>66</b>
4.1.	Количественный анализ .....	67
4.2.	Генеральная совокупность и случайная выборка .....	68
4.3.	Отбор выборок штучной продукции .....	70
4.4.	Дискретные случайные величины .....	73
4.4.1.	Числовые характеристики дискретных случайных величин .....	75
4.5.	Непрерывные случайные величины .....	79
4.5.1.	Функция распределения и плотность распределения случайной величины .....	80
4.5.2.	Меры расположения и рассеяния кривой распределения... ..	85
4.6.	Категории средних величин .....	87
4.7.	Структурные средние.....	95
4.8.	Мера рассеяния случайной величины .....	99
4.9.	Начальные и центральные моменты .....	102
4.10.	Коэффициенты относительного рассеяния и относительной асимметрии.....	109
4.11.	Интервальные оценки истинного значения .....	111
4.12.	Квантили распределения .....	115
	Контрольные вопросы .....	119
<b>ГЛАВА 5.</b>	<b>КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ .....</b>	<b>120</b>
5.1.	Правило сложения дисперсий .....	120
5.2.	Анализ результатов эксперимента .....	124
5.2.1.	Определение объема выборки .....	124
5.2.2.	Ошибки выборки .....	128
5.2.3.	Случайная выборка .....	133
5.2.4.	Серийная выборка .....	136

5.3. Характеристика видов связей между рядами наблюдений ...	139
5.4. Корреляционная зависимость между случайными величинами .....	142
5.5. Построение уравнения степенной регрессии.....	154
5.6. Многофакторные уравнения регрессии .....	155
5.7. Критерий Дарбина-Уотсона .....	156
5.8. Выборочный коэффициент ранговой корреляции Спирмена ...	156
5.9. Корреляция рангов Кендалла .....	161
5.10. Коэффициент конкордации .....	167
5.11. Метод наименьших квадратов .....	173
Контрольные вопросы .....	187
<b>ГЛАВА 6. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ .....</b>	<b>188</b>
6.1. Эмпирическая линия регрессии .....	188
6.2. Кольцевая или круговая диаграмма .....	189
6.3. Диаграмма с областями .....	190
6.4. Z-образный график .....	192
6.5. Столбчатый график.....	194
6.6. Лепестковая, радиальная, лучевая или радиационная диаграммы .....	195
6.7. Карта сравнения плановых и фактических показателей .....	197
6.8. Точечные диаграммы.....	198
6.9. Практические кривые распределения размеров .....	200
6.10. Полигон распределения.....	203
Контрольные вопросы .....	205
<b>ГЛАВА 7. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ .....</b>	<b>206</b>
7.1. Закон нормального распределения (закон Гаусса).....	207
7.2. Закон модуля разности.....	214
7.3. Типовые законы распределения .....	219
7.3.1. Геометрическое распределение .....	220
7.3.2. Биномиальное распределение .....	220
7.3.3. Распределение Пуассона .....	221
7.3.4. Равномерное распределение .....	222
7.3.5. Показательное (экспоненциальное) распределение ...	223
7.4. Проверка статистических гипотез .....	224
7.5. Критерий Кохрена .....	243
7.6. Критерий согласия Пирсона .....	247
7.7. Критерий Мизеса .....	254
7.8. Распределение Стьюдента .....	255
7.9. Критерий согласия Романовского.....	257
7.10. Критерий согласия Колмогорова.....	258

7.11. Критерий Ястремского .....	261
7.12. Критерий Смирнова .....	261
Контрольные вопросы .....	262
<b>ГЛАВА 8. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ .....</b>	<b>263</b>
8.1. Понятие подобия .....	263
8.2. Подобие физических процессов (объектов) .....	268
8.3. Виды подобия .....	269
8.4. Теория размерности .....	272
8.4.1. Основные положения теории размерности .....	272
8.4.2. Линейные комбинации .....	276
8.4.3. Линейная зависимость и независимость .....	277
8.5. Критерии подобия .....	282
8.6. Определение критериев подобия .....	283
8.6.1. Определение критериев подобия при известном математическом описании .....	284
8.6.2. Определение критериев подобия при неизвестном математическом описании .....	288
8.7. Применение первой теоремы подобия для определения критериев подобия.....	295
8.7.1. Определение критериев подобия по уравнениям процессов .....	296
8.7.2. Определение критериев подобия процессов на основе уравнений с однородными функциями .....	297
8.7.3. Определение критериев подобия процессов на основе уравнений с неоднородными функциями.....	304
8.8. Преобразование критериев подобия.....	305
8.9. Методика определения критериев подобия способом интегральных аналогов .....	306
8.10. Применение второй теоремы подобия для определения критериев подобия ( $\mu$ -теорема) .....	309
8.11. Методика определения критериев подобия на основе анализа размерностей .....	311
8.12. Применение третьей теоремы подобия для установления условий подобия .....	319
8.13. Формулировка третьей теоремы, отвечающая реальным условиям задачи .....	320
8.14. Автомодельность .....	322
8.15. Масштабные уравнения.....	327
8.16. Дополнительные положения о подобии .....	329
8.16.1. Первое дополнительное положение о подобии сложных систем.....	329

8.16.2. Второе дополнительное положение о подобии систем с нелинейными или переменными параметрами .....	332
8.16.3. Третье дополнительное положение о подобии анизотропных или неоднородных систем.....	333
8.16.4. Четвертое дополнительное положение о подобии физических процессов при отсутствии геометрического подобия .....	334
8.16.5. Пятое дополнительное положение о подобии при вероятностном характере процесса.....	334
8.17. Подобное моделирование .....	335
Контрольные вопросы .....	338

## **ГЛАВА 9. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА КАК СРЕДСТВО ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ .....**

9.1. Общие вопросы теории планирования эксперимента .....	340
9.1.1. Историческая справка .....	340
9.1.2. Основные понятия и определения .....	342
9.1.3. Представление результатов экспериментов .....	351
9.1.4. Разложение функции отклика в степенной ряд, кодирование факторов .....	352
9.1.5. Определение коэффициентов уравнения регрессии .....	354
9.2. Выбор факторов .....	355
9.3. Выбор нулевой точки .....	356
9.4. Выбор интервалов варьирования .....	357
9.5. Полный факторный эксперимент .....	358
9.5.1. Свойства полного факторного эксперимента .....	362
9.5.2. Параллельные опыты. Рандомизация .....	363
9.5.3. Модель полного факторного эксперимента .....	364
9.6. Дробный факторный эксперимент .....	369
9.6.1. Процедура построения полуреплик .....	371
9.6.2. Анализ разрешающей способности полуреплик .....	373
9.6.3. Обобщающий определяющий контраст .....	375
9.6.4. Метод перевала .....	378
9.6.5. Реплики большой дробности .....	379
9.7. Анализ факторных экспериментов .....	383
9.8. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий .....	390
9.8.1. Метод покоординатной оптимизации .....	390
9.8.2. Метод крутого восхождения .....	391
9.8.3. Симплексное планирование .....	394

9.9. Пример построения математической модели технологического процесса методом планирования эксперимента.....	399
9.10. Планирование эксперимента при определении режима электрической системы синхронного генератора .....	407
Контрольные вопросы .....	410
<b>ГЛАВА 10. ПЛАНЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА И ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ .....</b>	<b>411</b>
10.1. Композиционные планы .....	411
10.2. Ортогональное центральное композиционное планирование...	417
10.3. Обоснование параметров технологического процесса методом ортогонального планирования эксперимента .....	430
10.3.1. Описание экспериментальной установки .....	430
10.3.2. Обработка результатов эксперимента и расчет коэффициентов математической модели .....	433
10.4. Ротatableльные центральные композиционные планы .....	439
10.5. Каталоги оптимальных планов .....	447
10.6. Композиционные планы типа $B_d$ .....	454
10.7. Планы для оценки влияния факторов.....	455
10.7.1. Планы на латинских квадратах .....	455
10.7.2. Оценка значимости фактора .....	458
10.7.3. Оценка дифференциального эффекта уровней фактора .....	460
Контрольные вопросы .....	463
<b>ГЛАВА 11. КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНЖЕНЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА .....</b>	<b>464</b>
11.1. Общие замечания .....	464
11.2. Использование пакета Microsoft Excel для статистической обработки экспериментальных данных .....	468
Контрольные вопросы .....	479
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>480</b>
1. Статистические таблицы .....	480
2. Пример написания технического задания и программы — методики проведения экспериментальных исследований .....	491
3. Программа — методика стендовых испытаний опытных образцов криогенных баков.....	496
<b>Библиографический список .....</b>	<b>506</b>