

Б. А. СЕМЕНОВ

ИНЖЕНЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОТЕХНИКЕ, ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ

Издание второе,
дополненное

ДОПУЩЕНО

*УМО по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся
по направлению подготовки
140100 — «Теплоэнергетика»*



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
• МОСКВА •
• КРАСНОДАР •
2013

Семенов, Б. А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях : учебное пособие для вузов / Б. А. Семенов. — Изд. 2-е, доп. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2013. — 393 с. : ил., табл. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — Библиография : с. 388—390.

УДК 621.1.016:001.891.5(075.8)

ББК 34

Ч/З №1 — 2 экз.

Изложены научные основы современных методов планирования и выполнения экспериментальных исследований. Рассмотрены основные положения теории подобия, метода анализа размерностей, принципы физического моделирования и получения критериальных уравнений тепломассообмена. Приведены необходимые сведения из теории вероятностей и математической статистики, положенные в основу современных методов обработки результатов. Описаны основные виды математических моделей и методы экспериментального определения их характеристик. Рассмотрены регрессионный и дисперсионный анализы. Сформулированы принципы и критерии, используемые для оптимизации планов эксперимента. Показаны пути сокращения необходимого числа опытов для экономии трудозатрат и материальных ресурсов в процессе экспериментальных исследований.

Предназначено для магистрантов и бакалавров направления «Теплоэнергетика и теплотехника» и аспирантов научной специальности «Промышленная теплоэнергетика». Также может быть полезным для аспирантов и инженеров, занимающихся экспериментальными исследованиями, связанными с изучением процессов тепломассообмена в теплотехнологическом оборудовании и теплоэнергетических системах.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Теория подобия физических процессов и основы физического моделирования	17
1.1. Принципы создания физических и математических моделей	17
1.2. Подобие физических явлений и систем	20
1.3. Научные основы физического моделирования	26
2. Метод анализа размерностей	35
2.1. Основы теории размерностей	35
2.2. Практическое использование метода анализа размерностей в экспериментальных исследованиях	44
3. Средства и методы измерений в экспериментальных исследованиях	51
3.1. Общие положения. <i>Основные понятия и определения</i>	51
3.2. Метрологические характеристики средств измерений ...	56
3.3. Погрешности средств измерений и их нормирование ...	62
3.4. Основы планирования точности измерений при подготовке эксперимента	70
3.5. Сложение погрешностей. Оценка погрешности косвенных измерений	78
4. Основные понятия теории вероятностей и математической статистики	87
4.1. Понятие о случайном характере погрешности результата измерений	87
4.2. Случайные величины, интегральные и дифференциальные функции распределения вероятностей	91
4.3. Основные законы распределения случайных величин	95

4.4. Законы распределения случайных функций, используемых при статистической обработке результатов эксперимента	107
4.5. Методы определения числовых характеристик случайных величин	115
4.6. Правила математических операций с числовыми характеристиками случайных величин	125
4.7. Статистическая оценка параметров на основе выборки. Точечные оценки и требования к ним	128
4.8. Доверительный интервал и надежность результатов эксперимента	134
4.9. Общие принципы статистической проверки гипотез	138
4.10. Статистическая проверка типовых гипотез	147
5. Математическое моделирование в экспериментальных исследованиях и основы планирования эксперимента	158
5.1. Метод наименьших квадратов	158
5.2. Общие принципы и методика регрессионного анализа	166
5.3. Регрессионный анализ и ортогональное планирование первого порядка при постановке многофакторных экспериментов	173
5.4. Типы математических моделей. Использование метода ортогонального планирования первого порядка при аппроксимировании нелинейными функциями	185
5.5. Особенности планирования и обработки результатов эксперимента при моделировании процессов теплообмена	195
5.6. Статистическая оценка погрешности математических моделей	210
5.7. Общие требования к плану эксперимента. Критерии оптимальности планов	218
5.8. Оптимальные планы дробно-факторного эксперимента	226
5.9. Пример реализации плана ДФЭ, построенного на основе регулярной реплики	234
6. Методы выделения существенных факторов	246
6.1. Дисперсионный анализ и область его применения	246
6.2. Особенности многофакторного дисперсионного анализа	254
6.3. Метод случайного баланса	260
7. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий	284
7.1. Особенности экстремального эксперимента	286
7.2. Градиентные методы движения к оптимуму	292

СОДЕРЖАНИЕ	393
7.3. Метод крутого восхождения Бокса—Уилсона	300
7.4. Симплексный метод планирования экстремальных экспериментов	313
8. Планирование второго порядка при изучении области оптимума	325
8.1. Общие положения планирования второго порядка	326
8.2. Ортогональное центральное композиционное планирование	330
8.3. Ротatable центральное композиционное планирование	345
9. Пример построения двухфакторной математической модели процесса высокотемпературной коррозии огнеупоров с учетом взаимодействия факторов	358
9.1. Описание исследуемого процесса и постановка задачи	358
9.2. Обоснование характера аппроксимирующей функции	361
9.3. Процедура осреднения результатов	363
9.4. Нормализация факторов, построение ортогональной матрицы и расчет коэффициентов нормализованной модели	364
9.5. Оценка значимости коэффициентов и подтверждение адекватности нормализованной математической модели	366
9.6. Процедура натурализации математической модели	368
9.7. Количественная оценка точности математической модели	370
Заключение	376
Приложение	
Таблицы статистических критериев и функций	380
Список литературы	388