

В. Н. Елисеев, В. А. Товстоног

**ТЕПЛООБМЕН И ТЕПЛОВЫЕ
ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ
И КОНСТРУКЦИЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
ПРИ РАДИАЦИОННОМ
НАГРЕВЕ**



В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног

**ТЕПЛООБМЕН
И ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ
МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ**

BAUMANPRESS
 **ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА**

Москва
2014

УДК 536.2:629.78:621.18.062

ББК 31.31

Е51

Рецензенты:

заведующий кафедрой «Космические системы и ракетостроение»

Московского авиационного института

чл.-корр. РАН *О.М. Алифанов*;

заместитель директора ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН

чл.-корр. РАН *С.Т. Суржиков*

Елисеев В. Н.

Е51

Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве / В. Н. Елисеев, В. А. Товстоног. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 396, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-3947-8

Монография посвящена проблемам теплообмена и тепловых испытаний материалов и конструкций аэрокосмической техники с использованием источников высокоинтенсивного излучения. Приведены результаты исследований характеристик наиболее перспективных трубчатых источников излучения и примеры их практического применения. Рассмотрены радиационный и радиационно-кондуктивный теплообмен в полупрозрачной рассеивающей среде, наиболее полно учитывающей особенности процессов теплообмена в материалах конструкций летательных аппаратов, а также вопросы теплообмена при тепловых испытаниях и моделировании теплового режима объектов испытаний.

Приведены примеры решения актуальных прикладных задач радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена. Затронуты наиболее важные методические вопросы измерения тепловых потоков и температур.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области тепловых испытаний и теплофизических исследований объектов ракетно-космической техники. Может быть полезна студентам, обучающимся в вузах авиационного и ракетного профиля.

УДК 536.2:629.78:621.18.062

ББК 31.31

ISBN 978-5-7038-3947-8

© Елисеев В.Н., Товстоног В.А., 2014

© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
Глава 1. Особенности процессов теплообмена при действии излучения	12
1.1. Основные положения теории теплообмена излучением	12
1.2. Основные понятия и определения	15
1.3. Взаимодействие излучения с веществом	21
1.4. Уравнение переноса энергии излучения	29
1.4.1. Система уравнений РКТ	34
1.4.2. О роли полупрозрачности в задачах внутреннего РКТ	36
1.4.3. Проблемы полупрозрачности в задачах РКТ при действии внешних источников излучения	40
1.4.4. Задачи моделирования взаимодействия излучения с материалами и при тепловых испытаниях конструкций	49
Глава 2. Характеристики источников излучения и нагревательных устройств для тепловых испытаний материалов и конструкций	52
2.1. Трубчатые источники излучения и особенности их использования в практике тепловых испытаний	52
2.2. Общие характеристики трубчатых источников излучения и излучательных систем	55
2.3. Характеристики галогенных ламп накаливания	57
2.4. Характеристики газоразрядных источников излучения	64
2.5. Характеристики излучающих систем	72
2.5.1. Схемы компоновки излучающих систем	72
2.5.2. Плоский блок ГЛН	72
2.5.3. Плоский блок ГИИ	74
2.5.4. Излучательная система с единичным ГИИ	77

Глава 3. Стенды и установки радиационного нагрева	79
3.1. Теплофизические стенды	79
3.2. Установки радиационного нагрева на основе галогенных ламп накаливания	82
3.2.1. Установка для тепловых испытаний осесимметричных объектов при комбинированном воздействии	82
3.2.2. Установка для испытания плоских объектов и фрагментов конструкций	82
3.3. Установки на основе газоразрядных источников излучения	90
3.3.1. Компоновочные схемы ГИИ	90
3.3.2. Одно- и многоламповые установки	92
3.3.3. Мобильные установки с ГИИ	99
3.3.4. Установки импульсного и частотного режимов нагрева	104
3.3.5. Применение ИИ для исследований термостойкости материалов при высоких скоростях нагрева	108
3.3.6. Перспективы применения ИИ при испытаниях аэрокосмических конструкций	117
Глава 4. Методические вопросы обеспечения измерений параметров тепловых испытаний	125
4.1. Калориметрия потоков излучения	125
4.2. Датчики для измерения потоков излучения	127
4.2.1. Экспоненциальный датчик	127
4.2.2. Асимптотический датчик теплового потока	128
4.2.3. Водоохлаждаемый радиометр	131
4.2.4. Датчики теплового потока, основанные на методах решения ОЗТ	133
4.3. Термометрия объектов испытаний	138
4.3.1. Методическая погрешность и причины ее возникновения	138
4.3.2. Постановка задачи определения методической погрешности измерения температуры	142
4.3.3. Погрешность измерения температуры при установке термопары в паз	148
4.3.4. Погрешность измерения температуры при установке термопары с помощью пробок	157

Глава 5. Теплообмен при тепловых испытаниях конструкций с использованием трубчатых источников излучения	161
5.1. Радиационный теплообмен в замкнутой системе поверхностей с газоразрядными источниками излучения	161
5.2. Радиационно-кондуктивный теплообмен в рабочем участке с газоразрядными источниками излучения	168
5.3. Физическая модель водоохлаждаемого газоразрядного источника излучения	178
5.4. Тепловой режим водоохлаждаемых оболочек газоразрядного источника излучения	189
5.5. Тепловой режим оболочки галогенной лампы накаливания	194
5.6. Особенности теплообмена в галогенной лампе накаливания и составляющие интегрального потока ее излучения	197
5.7. Радиационно-кондуктивный теплообмен в рабочем участке с галогенными лампами накаливания	204
Глава 6. Моделирование теплового режима объекта испытаний	212
6.1. Выбор размеров образца при моделировании тепловых режимов огнестойких композиционных материалов	212
6.2. Выбор ориентации образца	218
6.3. Роль спектра источника излучения в моделировании температурного поля образца	223
6.4. Выравнивание температурного поля на поверхности объекта испытания	227
6.5. Выбор формы рефлектора	232
Глава 7. Теплообмен излучением в полупрозрачных средах	239
7.1. Решение уравнения переноса излучения методом моментов	239
7.1.1. Основные соотношения метода моментов	239
7.1.2. Граничные условия для системы моментных уравнений	242
7.1.3. Интегральные оптические характеристики граничных поверхностей	244
7.1.4. Аналитические решения системы моментных уравнений	254

7.2. Расчет фотометрических и излучательных характеристик плоского слоя рассеивающей среды	259
7.2.1. Расчет коэффициентов отражения и пропускания плоского слоя рассеивающей среды	259
7.2.2. Расчет излучательной способности плоского слоя рассеивающей среды	265
7.3. Метод расчета теплообмена в многослойной рассеивающей среде	268
7.4. Приближение лучистой теплопроводности	277
7.5. Теплообмен излучением в поглощающей и излучающей среде	278
7.6. Излучательная способность защитных покрытий	282
Глава 8. Прикладные задачи радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена	286
8.1. Нестационарный нагрев полупрозрачного теплозащитного покрытия	286
8.2. Оценка влияния качественных характеристик потока излучения на температурное состояние объемно отражающего покрытия	291
8.3. Методы определения оптических свойств полупрозрачных рассеивающих материалов	300
8.3.1. Основные допущения и постановка задачи идентификации оптических свойств рассеивающих материалов	300
8.3.2. Определение оптических свойств рассеивающей среды по результатам парных измерений	304
8.3.3. Определение оптических свойств рассеивающих материалов по произвольному набору данных	310
8.3.4. Учет угловой структуры зондирующего излучения	321
8.3.5. Технические средства и методика определения оптических характеристик рассеивающих материалов при использовании направленного источника излучения ...	324
8.4. Особенности теплообмена излучением в рассеивающей среде	328
8.5. Радиационно-кондуктивный теплообмен в многослойной полупрозрачной рассеивающей среде	332

8.6. Моделирование характеристик огнезащитных материалов	340
8.6.1. Излучение пожаров и основные соотношения для моделирования характеристик огнезащитных материалов	340
8.6.2. Оптическая модель вещества	347
8.6.3. Оценка огнетеплозащитных характеристик композиционных рассеивающих материалов на неорганической основе	348
8.6.4. Сравнительная оценка характеристик огнетеплозащитных композиционных рассеивающих материалов	351
8.6.5. Оптические характеристики дисперсно-наполненных материалов	358
8.7. Комбинированная система огнетеплозащиты	361
Литература	370