

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени В. Н. КАРАЗИНА

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ  
имени А. Н. ПОДГОРНОГО

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ИХ АНАЛИТИЧЕСКАЯ  
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

Справочник

Под общей редакцией  
академика НАН Украины Ю. М. Мацевитого

Харьков – 2019

УДК 536.24:519.63

T-34

**Рецензенты:**

**В. И. Ткаченко** – профессор кафедры физики нетрадиционных энерго-технологий и экологии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, доктор технических наук;

**В. Е. Ведь** – заведующий кафедрой интегрированных технологий, процессов и аппаратов Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», доктор технических наук, профессор.

*Утверждено к печати Учеными советами  
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина  
(протокол № 10 от 27.06.2017 г.)*

*и Института проблем машиностроения имени А. Н. Подгорного НАН Украины  
(протокол № 5 от 18.05.2017 г.)*

**Теплофизические** характеристики твердых тел и их аналитическая интерпретация : справочник / Ю. М. Мацевитый, С. Ф. Лушпенко, А. О. Костиков, Я. Н. Буштец; под общ. ред. Ю. М. Мацевитого. – Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2019. – 388 с.

ISBN 978-966-285-587-6

В справочнике дается информация о методах и результатах идентификации температурных зависимостей теплофизических свойств твердых тел. В связи с этим рассматриваются как методы решения внутренних (коэффициентных) обратных задач теплопроводности, опирающиеся на косвенную информацию об указанных зависимостях, так и методы их аналитической аппроксимации. Приводятся результаты идентификации теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности твердых тел, а также их аналитические представления полиномами.

Для научных и инженерно-технических работников, проводящих исследования в области теплофизики, теплотехники и компьютерного моделирования тепловых процессов. Книга может быть полезна также преподавателям, аспирантам и студентам университетов и технических вузов.

**УДК 536.24:519.63**

**ISBN 978-966-285-587-6**

© Харьковский национальный университет  
имени В. Н. Каразина, 2019  
© Мацевитый Ю. М., Лушпенко С. Ф.,  
Костиков А. О., Буштец Я. Н., 2019  
© Правик М. В., макет обложки, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	7
ЧАСТЬ I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК .....	9
ГЛАВА 1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ .....	9
1.1. Планирование эксперимента .....	9
1.2. Измерения .....	13
1.3. Автоматизация эксперимента .....	16
1.4. Программа MEASURES для автоматизации сбора и хранения данных эксперимента .....	20
1.5. Методы экспериментального определения теплофизических свойств .....	24
1.5.1. Стационарные методы .....	24
1.5.2. Нестационарные методы .....	25
1.5.3. Комплексные методы .....	28
ГЛАВА 2. ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ .....	32
2.1. Математическая модель явления теплопроводности .....	32
2.2. Классификация задач теплопроводности .....	33
2.3. Виды постановок обратных задач .....	35
2.4. Регуляризация решения обратных задач .....	37
2.4.1. Корректность постановок обратных задач .....	37
2.4.2. Единственность решения .....	38
2.4.3. Устойчивость и принципы регуляризации .....	41
2.5. Методы идентификации теплофизических характеристик путем решения обратной задачи теплопроводности .....	47
2.5.1. Классификация методов .....	47
2.5.2. Обращение решения прямой задачи .....	49
2.5.3. Обращение модели .....	52
2.5.4. Неавтоматизированный подбор .....	58
2.5.5. Автоматизированный подбор .....	61
2.6. Метод автоматизированного подбора ИПМаш .....	64
2.6.1. Отличительные признаки метода .....	64
2.6.2. Постановка обратной задачи .....	65
2.6.3. Основной алгоритм .....	67
2.6.4. Вспомогательная алгоритмическая процедура .....	68
ГЛАВА 3. АППРОКСИМАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ ДАННЫХ .....	70
3.1. Вводные замечания .....	70
3.2. Применение метода автоматизированного подбора для аппроксимации дискретно заданных функций .....	70
3.3. Компьютерная база данных с регуляризирующей аппроксимацией дискретной информации о теплофизических свойствах материалов .....	72
3.3.1. Постановка проблемы и обзор существующих способов ее решения .....	72
3.3.2. Аппроксимация дискретно заданных функций с помощью метода автоматизированного подбора .....	74
3.3.3. Структура базы данных о теплофизических характеристиках ExproData+ и ее функциональность .....	78
3.3.4. Сравнительный анализ результатов аппроксимации .....	81

3.3.5. Особенности использования сплайн-аппроксимации в ExproData+ .....	84
<b>ЧАСТЬ II. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ .....</b>	<b>85</b>
<b>ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НОВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>85</b>
4.1. Вводные замечания .....	85
4.2. Эксперимент .....	87
4.3. Математическая модель .....	89
4.4. Результаты .....	90
4.5. К получению теплозащитных материалов с заданными свойствами .....	92
<b>ГЛАВА 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ .....</b>	<b>99</b>
5.1. Вводные замечания .....	99
5.2. Исходные данные для расчета теплопроводности .....	99
5.3. Зависимости теплопроводности от температуры .....	102
5.4. Исходные данные для расчета теплоемкости .....	106
5.5. Температурная зависимость удельной массовой изобарной теплоемкости .....	108
<b>ГЛАВА 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>114</b>
6.1 Вводные замечания .....	114
6.2. Экспериментальные данные .....	114
6.3. Теплопроводность сверхтвердых материалов .....	116
6.4. Удельная объемная теплоемкость поликристалла баллас .....	117
<b>ЧАСТЬ III. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩЕЙ АППРОКСИМАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ТЕЛ .....</b>	<b>120</b>
<b>ГЛАВА 7. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ .....</b>	<b>121</b>
7.1. Неметаллические материалы .....	121
7.2. Полупроводниковые материалы .....	156
7.3. Черные металлы и их сплавы .....	211
7.4. Цветные металлы и сплавы .....	270
<b>ГЛАВА 8. УДЕЛЬНАЯ МАССОВАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ .....</b>	<b>340</b>
8.1. Черные металлы и их сплавы .....	340
8.2. Цветные металлы и их сплавы .....	353
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>372</b>