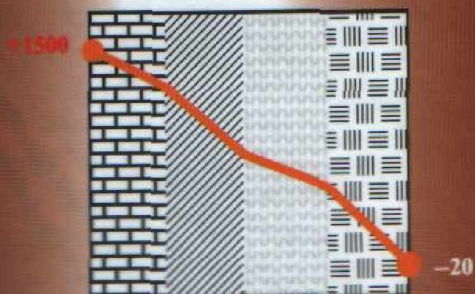


А.Д. Маркин  
М.А. Маркин

# ПРАКТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ И МЕТАЛЛУРГИИ



А.Д. Маркин, М.А. Маркин

## Практический анализ тепловых процессов в энергетике и металлургии

Учебное пособие

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Металлургия»*

Москва  
Издательский Дом МИСиС  
2008

Авторы выражают благодарность руководству Открытого акционерного общества «Объединенная химическая компания «УРАЛХИМ» (ОАО «ОХК «УРАЛХИМ») и лично Председателю Совета директоров ОАО «ОХК «УРАЛХИМ» Д.А. Мигенину за содействие в подготовке и публикации этого учебника.

УДК 621.1.016 (035.5)  
ББК 31.31

**Рецензенты:** доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теплофизика» Донецкого национального технического университета В.В. Кранцов; доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электрометаллургия и конвертерное производство стали» Донецкого национального технического университета А.А. Троянский.

**М62 Маркин А.Д., Маркин М.А. Практический анализ тепловых процессов в энергетике и металлургии: Справочное пособие.** – М.: «Издательский Дом МИСиС», 2008.—208 стр.

ISBN 978-5-87623-195-6

Практическое исследование высокотемпературных процессов теплообмена в различных энергетических установках всегда приводит к необходимости анализа проблем, математическое описание которых имеет все виды нелинейностей и требует как организации некоторой итерационной процедуры, так и соответствующих методов алгоритмизации задач применительно к использованию компьютерных технологий при поиске решения. Для организации непрерывного итерационного процесса приведены: теплофизические свойства газов, жидкостей, металлов и твердых веществ в форме аналитических зависимостей от температуры (замена таблично или графически заданных); аналитические зависимости, позволяющие определить радиационные характеристики продуктов сгорания органических топлив без номограмм; новая схема организации итерационного процесса и обеспечивающие ее различные схемы повышенной устойчивости.

Для студентов, инженерно-технических и научных работников различных отраслей промышленности, в том числе металлургии, занимающихся практическими расчетами энергетического и теплообменного оборудования.

УДК 621.1.016 (035.5)  
ББК 31.31

Учебное пособие

Маркин Александр Дмитриевич, Маркин Михаил Александрович  
**ПРАКТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЭНЕРГЕТИКЕ И МЕТАЛЛУРГИИ**

Редактор *А.Л. Бреннер*  
Корректор *Ю.И. Королева*  
Верстка *М.А. Анциферова*

ЛР № 020777 от 13.05.98.

Подписано в печать с оригинал-макета 29.05.08  
Формат 60х90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная  
Печ. л. 13. Тираж 1000 экз. Заказ 1181

Издательский Дом МИСиС  
119049, ГСП, Москва, Ленинский пр-т, 4

Отпечатано в «ППП-Типография «Наука»  
121099, г. Москва, г-99, Шубинский пер., 6.

ISBN 978-5-87623-195-6

© Маркин А.Д., Маркин М.А.  
© Издательский Дом МИСиС

## Оглавление

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие .....                                                                             | 6  |
| Основные принятые обозначения .....                                                           | 7  |
| <br>Глава 1. Принципы теплопередачи .....                                                     | 9  |
| 1.1. Формы транспорта тепла и обобщенный закон<br>сохранения энергии .....                    | 9  |
| 1.2. Теплопроводность (кондуктивный перенос тепла) ....                                       | 10 |
| 1.3. Конвективный теплообмен .....                                                            | 13 |
| 1.4. Аппроксимация таблично заданных теплофизических<br>характеристик различных веществ ..... | 15 |
| 1.5. Радиационный теплообмен .....                                                            | 16 |
| 1.6. Уравнения термогазодинамики .....                                                        | 30 |
| 1.7. Метод операторной коррекции .....                                                        | 32 |
| Библиографический список .....                                                                | 36 |
| <br>Глава 2. Стационарная теплопроводность .....                                              | 38 |
| 2.1. Условия однозначности .....                                                              | 38 |
| 2.2. Одномерная стационарная задача<br>теплопроводности .....                                 | 40 |
| 2.3. Теплопроводность геометрических тел канонических<br>конфигураций .....                   | 41 |
| 2.4. Термическое сопротивление тел различных<br>конфигураций .....                            | 43 |
| 2.5. Теплопроводность тел канонических форм<br>с объемными источниками тепла .....            | 43 |
| Библиографический список .....                                                                | 53 |
|                                                                                               | 3  |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 3. Нестационарная теплопроводность                                                                   | 54  |
| 3.1. Многомерные задачи                                                                                    | 54  |
| 3.2. Граничные условия I и III рода                                                                        | 110 |
| Библиографический список                                                                                   | 112 |
| Глава 4. Конвективный теплообмен                                                                           | 113 |
| 4.1. Критерии подобия и критериальные уравнения                                                            | 114 |
| 4.2. Течение в трубах и каналах                                                                            | 116 |
| 4.2.1. Ламинарное течение                                                                                  | 117 |
| 4.2.2. Турбулентное течение                                                                                | 118 |
| 4.3. Теплообмен при внешнем обтекании                                                                      | 119 |
| 4.4. Естественная конвекция в ограниченном и неограниченном пространстве                                   | 122 |
| 4.5. Теплообмен при изменении агрегатного состояния теплоносителя                                          | 123 |
| 4.5.1. Теплообмен при кипении                                                                              | 124 |
| 4.5.2. Теплообмен при конденсации                                                                          | 125 |
| 4.6. Теплообмен в дисперсных средах                                                                        | 127 |
| 4.6.1. Теплообмен в неподвижном слое                                                                       | 127 |
| 4.6.2. Псевдооживленный слой зернистых материалов                                                          | 128 |
| Библиографический список                                                                                   | 129 |
| Глава 5. Теплообмен излучением                                                                             | 131 |
| 5.1. Основные понятия                                                                                      | 131 |
| 5.2. Законы излучения абсолютно черного тела                                                               | 133 |
| 5.3. Теплообмен излучением между двумя абсолютно черными телами, произвольно расположенными в пространстве | 134 |
| 5.4. Теплообмен излучением между серыми телами, произвольно расположенными в пространстве                  | 135 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5. Радиационные свойства газов и теплообмен в системе газ – серая поверхность     | 149 |
| Библиографический список                                                            | 161 |
| Глава 6. Некоторые особенности численного анализа нелинейных задач тепломассообмена | 162 |
| 6.1. Гиперболизация обобщенного уравнения тепломассообмена                          | 162 |
| 6.2. Разностные схемы повышенной вязкости                                           | 165 |
| 6.3. Разностные схемы для многомерных нелинейных задач математической физики        | 169 |
| 6.3.1. Базовое итерационное уравнение                                               | 169 |
| 6.3.2. Продольно-поперечная схема                                                   | 171 |
| 6.3.3. Локально-одномерная схема                                                    | 172 |
| 6.4. Разностная аппроксимация граничных условий                                     | 173 |
| Библиографический список                                                            | 176 |
| Глава 7. Теплообменники                                                             | 178 |
| 7.1. Рекуперативные теплообменные аппараты                                          | 178 |
| 7.2. Эффективность теплообменных устройств                                          | 185 |
| 7.3. Регенераторы                                                                   | 188 |
| Приложения                                                                          | 191 |