

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ УПРАЖНЕНИЯ И ЗАДАЧИ

*Под редакцией доктора технических наук,
профессора В.С. Чередниченко;
доктора технических наук,
профессора А.И. Алиферова*

Издание второе,
переработанное и дополненное

*Допущено УМО по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140605
«Электротехнологические установки и системы», направления
подготовки 140600 «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»*

НОВОСИБИРСК
2011

УДК 621.365(075.8)

Э 455

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В.П. Рубцов*;
д-р техн. наук, проф. *А.Б. Кувалдин*;
д-р техн. наук, проф. *Г.В. Ноздренко*;
д-р техн. наук, доцент *Ю.В. Дьяченко*

Э 455 **Электротехнологические установки и системы. Теплопередача в электротехнологии. Упражнения и задачи** : учеб. пособие для вузов / В.С. Чередниченко, В.А. Сеницын, А.И. Алиферов, В.А. Тюков, Ю.И. Шаров; под ред. В.С. Чередниченко, А.И. Алиферова. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 571 с. (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1813-0

Учебное пособие посвящено изложению основ теории и расчетам теплопередачи в электротехнологических установках и системах и содержит две части. В первой части даны основные положения теории теплопроводности, конвективного теплообмена, теплопередачи при фазовых превращениях, теплообмена излучением и сложного теплообмена. Во второй части рассмотрены примеры и методические приемы использования теории теплопередачи для решения конкретных задач, встречающихся в инженерной и научно-технической практике при расчетах электро- и теплоэнергетических устройств.

Книга предназначена для подготовки кадров по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» специальности «Электротехнологические установки и системы» и может быть полезна бакалаврам, магистрантам и аспирантам теплоэнергетических, электротехнических и машиностроительных специальностей.

УДК 621.365(075.8)

ISBN 978-5-7782-1813-0

© Коллектив авторов, 2011
© Новосибирский государственный
технический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Предисловие..... | 7 |
| Обозначения, наименования и единицы измерения основных величин..... | 9 |
| Часть 1. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ..... | 11 |
| Введение..... | 11 |
| Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ | 17 |
| § 1.1. Термометрия и теплофизические свойства веществ..... | 17 |
| 1.1.1. Температура..... | 17 |
| 1.1.2. Теплоемкость..... | 28 |
| 1.1.3. Теплопроводность..... | 35 |
| § 1.2. Основной закон теплопроводности. Гипотеза Фурье..... | 39 |
| § 1.3. Температуропроводность веществ..... | 43 |
| § 1.4. Дифференциальное уравнение теплопроводности..... | 44 |
| § 1.5. Условия однозначности для процессов теплопроводности..... | 51 |
| § 1.6. Основные понятия внутренних источников теплоты | 56 |
| Глава 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ | 63 |
| § 2.1. Теплопроводность через плоские стенки в стационарных условиях без внутренних источников теплоты..... | 63 |
| § 2.2. Теплопередача через плоские стенки с конвективным теплообменом на поверхностях..... | 70 |
| § 2.3. Коэффициент теплопередачи | 75 |
| § 2.4. Теплопроводность через цилиндрические стенки в стационарных услови- ях без внутренних источников теплоты..... | 77 |
| § 2.5. Теплопередача через цилиндрические стенки с конвективным теплообме- ном на поверхностях..... | 85 |
| § 2.6. Влияние на температурное поле толщины стенки цилиндра..... | 90 |
| § 2.7. Критический радиус в теплотехнике и практической электротехнике..... | 94 |
| § 2.8. Контактное термическое сопротивление | 101 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 2.9. Теплопроводность в прямом ребре постоянного прямоугольного профиля | 101 |
| § 2.10. Теплопередача через плоскую оребренную стенку | 109 |
| § 2.11. Теплопроводность в пластине и цилиндре с равномерно распределенными источниками теплоты | 112 |
| § 2.12. Теплопроводность в цилиндрической трубе с равномерно распределенными источниками теплоты | 121 |
| § 2.13. Теория подобия и безразмерные переменные в процессах теплопроводности | 127 |
| Глава 3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ | 131 |
| § 3.1. Теплопроводность в нестационарных условиях в системах без источников теплоты | 132 |
| 3.1.1. Конвективное охлаждение (нагрев) неограниченной пластины | 133 |
| 3.1.2. Предельные случаи для температурного поля в пластине | 136 |
| 3.1.3. Нагрев пластины с граничными условиями второго рода | 139 |
| 3.1.4. Конвективное охлаждение бесконечно длинного цилиндра | 141 |
| 3.1.5. Нагрев цилиндра с граничными условиями второго рода | 144 |
| 3.1.6. Предельные случаи для температурного поля в цилиндре | 145 |
| 3.1.7. Охлаждение тел конечных размеров | 148 |
| 3.1.8. Регулярный режим нагрева тел постоянным тепловым потоком | 152 |
| § 3.2. Теплопроводность в нестационарных условиях с внутренними источниками теплоты | 154 |
| 3.2.1. Уравнение теплового баланса нагрева (охлаждения) в дифференциальной форме | 154 |
| 3.2.2. Уравнение теплового баланса нагрева (охлаждения) в интегральной форме | 159 |
| § 3.3. Теплопроводность в нестационарных условиях с фазовым переходом на граничной поверхности | 169 |
| 3.3.1. Общие сведения | 169 |
| 3.3.2. Движение межфазной границы | 171 |
| § 3.4. Аналогия тепловых и электрических полей | 177 |
| Глава 4. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН | 187 |
| § 4.1. Основные понятия и определения | 187 |
| § 4.2. Физические свойства жидкостей и газов | 192 |
| § 4.3. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена | 194 |
| § 4.4. Условия однозначности процессов конвективного теплообмена | 200 |
| § 4.5. Теплообмен в пограничном слое | 203 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 4.6. Теория подобия и безразмерные переменные в конвективном теплообмене..... | 207 |
| § 4.7. Внутренняя конвекция при обтекании плоской поверхности..... | 219 |
| 4.7.1. Теплообмен при ламинарном течении в пограничном слое | 219 |
| 4.7.2. Теплообмен при турбулентном течении в пограничном слое | 227 |
| § 4.8. Теплообмен при поперечном обтекании цилиндра..... | 232 |
| § 4.9. Теплообмен при поперечном обтекании пучков труб | 234 |
| 4.9.1. Теплоотдача на поверхности труб..... | 235 |
| 4.9.2. Средний коэффициент теплоотдачи по рядам пучков труб..... | 237 |
| § 4.10. Вынужденная конвекция при течении жидкости в трубах и каналах | 239 |
| 4.10.1. Гидродинамическая и тепловая стабилизация процесса теплообмена..... | 239 |
| 4.10.2. Теплообмен в канале с электронагреваемой стенкой | 244 |
| 4.10.3. Теплообмен при ламинарном течении в круглой трубе..... | 246 |
| 4.10.4. Теплообмен при турбулентном течении в круглой трубе..... | 249 |
| § 4.11. Теплообмен при конденсации чистых паров | 253 |
| 4.11.1. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара | 253 |
| 4.11.2. Теплообмен при конденсации движущегося пара внутри трубы..... | 254 |
| 4.11.3. Теплообмен при пленочной конденсации на горизонтальных оди- ночных трубах и пучках труб | 256 |
| § 4.12. Теплообмен при кипении жидкости | 257 |
| § 4.13. Теплообмен при свободной конвекции жидкости | 262 |
| 4.13.1. Теплообмен при свободном ламинарном движении жидкости вдоль вертикальной пластины | 262 |
| 4.13.2. Теплообмен при свободном турбулентном движении жидкости вдоль вертикальной пластины | 267 |
| 4.13.3. Теплообмен при свободном движении жидкости около горизон- тальных цилиндров и тонких проволочек | 269 |
| § 4.14. Теплообмен в водоохлаждаемых элементах оборудования | 270 |
| § 4.15. Нагрев насыпного слоя в вынужденном конвективном потоке..... | 275 |
| Глава 5. РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН | 277 |
| § 5.1. Основные понятия и определения | 277 |
| § 5.2. Основные законы теплового излучения | 280 |
| § 5.3. Радиационный теплообмен в прозрачной среде..... | 286 |
| § 5.4. Теплообмен излучением в системах серых тел | 288 |
| § 5.5. Радиационный теплообмен в излучающе-поглощающих газах..... | 302 |
| § 5.6. Критерии радиационного подобия | 307 |
| § 5.7. Сложный теплообмен..... | 308 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 5.8. Применение зонального метода расчета | 315 |
| 5.8.1. Физическая модель теплообмена в высокотемпературной электропечи сопротивления непрерывного действия..... | 316 |
| 5.8.2. Математическая модель теплообмена в высокотемпературной электропечи сопротивления непрерывного действия..... | 319 |
| 5.8.3. Алгоритм расчета математической модели | 321 |
| 5.8.4. Реализация алгоритма математической модели..... | 322 |
| Ч А С Т Ь 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. УПРАЖНЕНИЯ И ЗАДАЧИ..... | 327 |
| Введение..... | 327 |
| Г л а в а 6. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ БЕЗ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ..... | 329 |
| Г л а в а 7. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ | 371 |
| Г л а в а 8. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ..... | 409 |
| Г л а в а 9. РАСЧЕТЫ КОНВЕКТИВНОГО И СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА | 439 |
| Г л а в а 10. РАСЧЕТЫ РАДИАЦИОННОГО И СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА..... | 507 |
| Библиографический список..... | 539 |
| Приложение | 545 |