

# 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
<b>Ч А С Т Ь 1. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>11</b>
Введение.....	11
<b>Г л а в а 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ .....</b>	<b>17</b>
§ 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
<b>Г л а в а 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ .....</b>	<b>63</b>
§ 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 ребренную 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
<b>Глава 3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ .....</b>	<b>131</b>
§ 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
<b>Глава 4. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН .....</b>	<b>187</b>
§ 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 проволок .....	269
§ 4.14. Теплообмен в водоохлаждаемых элементах оборудования .....	270
§ 4.15. Нагрев насыпного слоя в вынужденном конвективном потоке.....	275
<b>Г л а в а 5. РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН .....</b>	<b>277</b>
§ 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
<b>Ч А С Т Ь 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. УПРАЖНЕНИЯ И ЗАДАЧИ.....</b>	<b>327</b>
Введение.....	327
<b>Г л а в а 6. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ БЕЗ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ.....</b>	<b>329</b>
<b>Г л а в а 7. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ .....</b>	<b>371</b>
<b>Г л а в а 8. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ.....</b>	<b>409</b>
<b>Г л а в а 9. РАСЧЕТЫ КОНВЕКТИВНОГО И СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА .....</b>	<b>439</b>
<b>Г л а в а 10. РАСЧЕТЫ РАДИАЦИОННОГО И СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА.....</b>	<b>507</b>
Библиографический список.....	539
Приложение .....	545