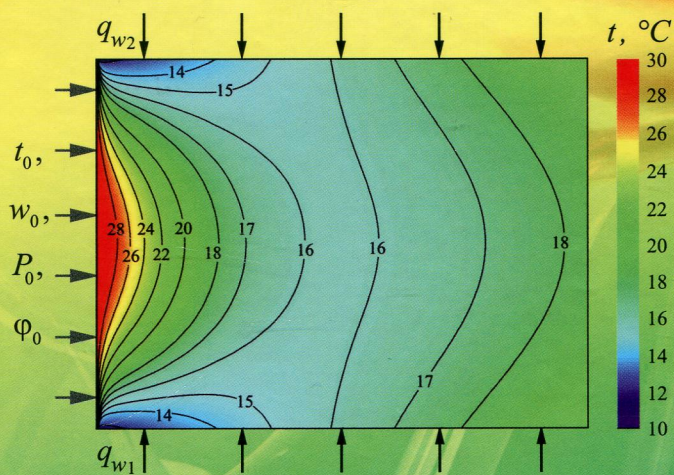




М. В. ГОРБАЧЕВ

# ТЕПЛОМАССООБМЕН



**М. В. ГОРБАЧЕВ**

# **ТЕПЛОМАССООБМЕН**



**НОВОСИБИРСК  
2 0 1 5**



УДК 536.24(075.8)

Г 672

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор каф. ТТФ НГТУ *Ю.В. Дьяченко*  
д-р физ.-мат. наук, ведущий науч. сотр. Института теплофизики

СО РАН *М.А. Пахомов*

д-р техн. наук, профессор каф. ТЭС НГТУ *П.А. Щинников*

**Горбачев М.В.**

Г 672 Теплообмен : учебное пособие / М.В. Горбачев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – 443 с. (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-2803-0

Дан анализ основным положениям стационарной и нестационарной теплопроводности, изложены вопросы конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движении жидкости, теплообмена при фазовых превращениях, лучистого теплообмена, а также основы массопереноса. Рассмотрена теория подобия процессов конвективного теплообмена, освещены вопросы теплопередачи, теплового и гидравлического расчетов теплообменных аппаратов.

Пособие может быть полезно студентам теплотехнических, энергетических и машиностроительных специальностей, а также широкому кругу инженерно-технических работников.

УДК 536.24(075.8)

ISBN 978-5-7782-2803-0

© Горбачев М.В., 2015

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Введение.....	7
Список условных обозначений и сокращений .....	10
<b>Глава 1. Теплопроводность .....</b>	<b>13</b>
1.1. Основные понятия процесса теплопроводности.....	13
1.2. Элементарные способы передачи теплоты.....	18
1.3. Закон Фурье .....	18
1.4. Дифференциальное уравнение теплопроводности .....	20
1.5. Условия однозначности. Граничные условия.....	26
1.6. Температурное поле в плоской стенке при граничных условиях первого рода .....	29
1.7. Теплопроводность через многослойную плоскую стенку.....	32
1.8. Передача теплоты при граничных условиях третьего рода .....	36
1.9. Передача теплоты при граничных условиях второго и третьего рода .....	40
1.10. Графические методы определения температур в плоской стенке .....	40
1.11. Плотность объемного тепловыделения.....	44
1.12. Температурное поле в плоской стенке при наличии тепловыделений .....	44
1.13. Температурное поле в цилиндрической стенке при граничных условиях первого рода .....	52
1.14. Теплопроводность через многослойную цилиндрическую стенку .....	54
1.15. Теплопроводность через цилиндрическую стенку при граничных условиях третьего рода (теплопередача).....	56
1.16. Теплопередача в тонких цилиндрических стенках .....	59
1.17. Критический диаметр цилиндрической стенки.....	60



1.18. Температурное поле в цилиндрической стенке при наличии внутренних источников теплоты.....	63
1.19. Теплопроводность однородного цилиндрического стержня при наличии тепловыделений .....	63
1.20. Теплопроводность цилиндрической стенки с внутренними источниками теплоты .....	65
1.21. Интенсификация теплопередачи.....	70
1.22. Упрощенный расчет теплопередачи через ребренную стенку ....	71
1.23. Интенсификация теплопередачи за счет ребрения поверхности. Виды ребристых поверхностей.....	73
1.24. Одномерное температурное поле в плоском ребре.....	75
1.25. Треугольные ребра .....	82
1.26. Круглое ребро прямоугольного профиля.....	84
1.27. Аналитическое описание процесса переноса теплоты .....	85
1.28. Основные понятия метода нестационарной теплопроводности....	87
1.29. Нестационарное температурное поле в плоской стенке – решение задачи в безразмерном виде методом разделения переменных.....	89
1.30. Зависимость поля температур от числа Фурье.....	93
1.31. Численный метод расчета стационарной теплопроводности.....	94
1.32. Численный метод расчета нестационарной теплопроводности.....	96
Задачи и примеры их решения.....	99
Контрольные вопросы .....	111
<b>Глава 2. Конвективный теплообмен .....</b>	<b>117</b>
2.1. Основные понятия и определения процессов конвективного теплообмена.....	117
2.2. Физические свойства жидкостей .....	119
2.3. Гидродинамический и тепловой пограничные слои.....	121
2.4. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена .....	123
2.4.1. Дифференциальное уравнение теплоотдачи.....	124
2.4.2. Дифференциальное уравнение неразрывности .....	124
2.4.3. Дифференциальное уравнение энергии .....	127
2.4.4. Дифференциальное уравнение движения .....	131
2.5. Моделирование процессов конвективного теплообмена .....	135



2.6. Приведение дифференциальных уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду. Числа подобия.....	137
2.7. Условия подобия физических процессов.....	140
2.8. Получение эмпирических критериальных уравнений.....	142
2.9. Применение метода наименьших квадратов для нахождения коэффициентов в уравнении $Nu = c Re^n$ .....	143
2.10. Определяющие размер и температура.....	144
2.11. Режимы течения жидкости.....	146
2.12. Основные положения о свободной конвекции.....	148
2.13. Теплоотдача при свободном ламинарном движении вдоль вертикальной пластины .....	149
2.14. Теплоотдача при свободном турбулентном движении вдоль вертикальной пластины .....	156
2.15. Теплоотдача при переходном режиме свободного движения вдоль вертикальной пластины.....	157
2.16. Теплоотдача при свободном движении около горизонтальной трубы .....	158
2.17. Теплоотдача при малых значения числа Рэлея .....	159
2.18. Теплообмен при свободном движении жидкости в ограниченном пространстве .....	159
2.19. Интегральные уравнения пограничного слоя.....	163
2.20. Теплоотдача при ламинарном пограничном слое.....	165
2.21. Переход ламинарного течения в турбулентное.....	170
2.22. Описание процесса вынужденного течения жидкости в трубах и каналах.....	171
2.23. Участок тепловой стабилизации.....	174
2.24. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном течении в гладких трубах круглого поперечного сечения.....	176
2.25. Теплообмен в трубах некруглого поперечного сечения.....	180
2.26. Теплоотдача в изогнутых трубах.....	181
2.27. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб .....	182
2.28. Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб.....	187
2.29. Отдельные задачи конвективного теплообмена в однофазной среде .....	192
2.29.1. Теплоотдача при большой скорости движения газа .....	192



2.29.2. Уравнение энергии и движения при больших скоростях потока .....	194
2.29.3. Адиабатная температура стенки .....	195
2.29.4. Распределение температуры при большой скорости течения газа.....	197
2.29.5. Теплоотдача при высоких скоростях течения газа .....	198
2.30. Теплоотдача жидких металлов.....	200
Задачи и примеры их решения.....	202
Контрольные вопросы .....	211
<b>Глава 3. Теплообмен при фазовых превращениях .....</b>	<b>217</b>
3.1 Конденсация пара. Общие сведения.....	217
3.2. Термическое сопротивление передаче теплоты .....	219
3.3. Теплоотдача при конденсации неподвижного пара.....	223
3.4. Ламинарное течение пленки на вертикальной стенке .....	224
3.5. Турбулентное течение пленки на вертикальной стенке .....	230
3.6. Конденсация на горизонтальных трубах .....	232
3.7. Теплообмен при ламинарном и турбулентном течении пленки конденсата.....	233
3.8. Теплообмен при пленочной конденсации движущегося пара на горизонтальных одиночных трубах и пучках труб .....	236
3.9. Описание процесса кипения жидкости. Режимы кипения. Кривая кипения .....	239
3.10. Теплоотдача при пузырьковом кипении жидкости в большом объеме .....	244
3.11. Теплоотдача при пузырьковом кипении жидкости в условиях вынужденного движения в трубах.....	247
3.12. Теплоотдача при пленочном кипении жидкости в условиях свободной и вынужденной конвекции.....	249
3.13. Режимы кипения в большом объеме. Кривая кипения .....	250
3.14. Два вида перехода от пузырькового режима к пленочному .....	253
Задачи и примеры их решения.....	255
Контрольные вопросы .....	258
<b>Глава 4. Теплообмен излучением .....</b>	<b>261</b>
4.1. Основные положения теплообмена излучением .....	261
4.2. Параметры и характеристики теплового излучения.....	264



4.3. Виды лучистых потоков .....	266
4.4. Законы теплового излучения.....	269
4.5. Угловые коэффициенты излучения .....	273
4.6. Методы исследования лучистого теплообмена.....	274
4.7. Теплообмен излучением в системе тел с плоскопараллельными поверхностями.....	276
4.8. Теплообмен излучением при наличии экранов .....	280
4.9. Тело с оболочкой и произвольно расположенные тела.....	285
4.10. Теплообмен тел с оболочкой при наличии экранов.....	288
4.11. Излучение газов.....	291
4.12. Сложный теплообмен .....	292
4.13. Критерии радиационного подобия .....	296
Задачи и примеры их решения .....	297
Контрольные вопросы .....	302
<b>Глава 5. Теплообменные аппараты .....</b>	<b>305</b>
5.1. Классификация теплообменных аппаратов .....	305
5.2. Основные положения и уравнения теплового расчета .....	307
5.3. Средняя разность температур и методы ее вычисления.....	312
5.4. Расчет конечных температур рабочих жидкостей .....	315
5.5. Сравнение прямого тока с противотоком .....	319
5.6. Гидромеханический расчет теплообменного аппарата .....	321
Задачи и примеры их решения .....	323
Контрольные вопросы .....	326
<b>Глава 6. Тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах .....</b>	<b>327</b>
6.1. Основные положения и законы тепло- и массообмена.....	327
6.2. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена.....	333
6.3. Тепло- и массоотдача. Стефанов поток.....	340
6.4. Диффузионный пограничный слой .....	344
6.5. Аналогия процессов теплообмена и массообмена .....	345
6.6. Тепло- и массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси .....	348
6.7. Влажный воздух .....	352
6.8. Тепло- и массообмен при испарении жидкости в парогазовую среду.....	357





---

6.9. Испарение неподвижной капли .....	361
6.10. Испарение капли при вынужденной конвекции. Летящая капля .....	365
6.11. Основные сведения о химических превращениях .....	367
6.12. Теплообмен между газовой смесью и поверхностью раздела фаз .....	376
Задачи и примеры их решения .....	379
Контрольные вопросы .....	384
<b>Задания для самостоятельной работы и методические указания к их решению .....</b>	<b>387</b>
Библиографический список.....	426
Приложения .....	428