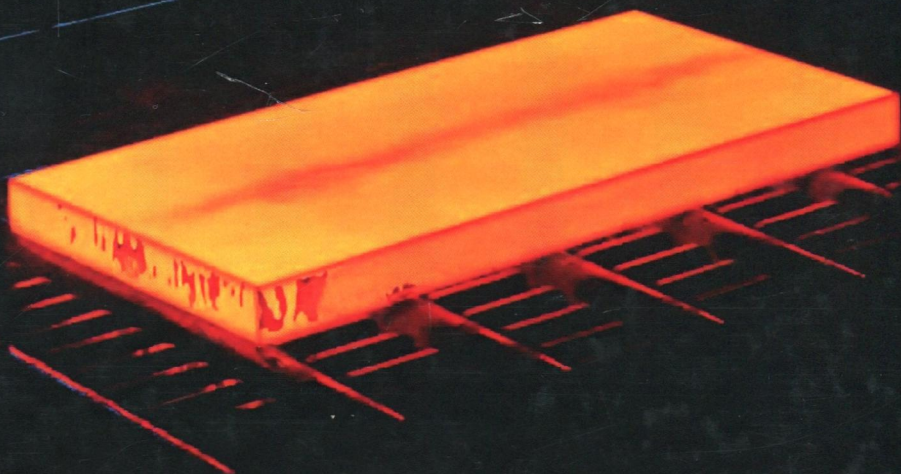


---

# ТЕПЛООБМЕН: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---



# **ТЕПЛООБМЕН: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

Учебник

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 536.2+62-6+62-71  
ББК 31.31+31.368  
Т34

Авторы:

*В. В. Карнаух, А. Б. Бирюков, С. И. Гинкул, К. А. Ржесик, П. А. Гнитиев*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В. В. Белоусов*; д-р техн. наук, проф. *А. В. Лукьянов*;  
д-р техн. наук, проф. *В. Г. Топольник*; д-р техн. наук, проф. *Н. И. Захаров*

**Т34**      **Теплообмен: теория и практика** : учебник / [В. В. Карнаух и др.]. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 332 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0702-1

Изложены базовые положения теории теплообмена. Рассмотрены основные виды переноса теплоты: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение. Освещены процессы комбинированной теплопередачи, показана их роль в работе энергетических и теплотехнологических устройств и установок. Приведена классификация и дана методика расчета теплообменных аппаратов, широко применяемых в пищевой, металлургической, химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности.

Для студентов технических направлений подготовки. Может быть полезно инженерно-техническим работникам металлургической, энергетической, пищевой промышленности.

УДК 536.2+62-6+62-71  
ББК 31.31+31.368

ISBN 978-5-9729-0702-1

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	10
ГЛАВА 1. ВИДЫ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА .....	12
ГЛАВА 2. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ.....	19
2.1. Теплопроводность.....	19
2.2. Поле температур.....	19
2.3. Градиент температуры.....	21
2.4. Плотность теплового потока.....	22
2.5. Коэффициент теплопроводности.....	23
ГЛАВА 3. СТАЦИОНАРНОЕ И НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ.....	28
3.1. Вывод дифференциального уравнения теплопроводности с использованием энтальпии .....	29
3.2. Вывод дифференциального уравнения теплопроводности с использованием плотности теплового потока .....	32
ГЛАВА 4. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН .....	39
4.1. Дифференциальные уравнения теплообмена.....	40
4.2. Основы теории подобия физических явлений .....	47
4.3. Турбулентное и ламинарное движение.....	54
4.4. Конвекция при свободном движении среды .....	55
4.4.1. Теплоотдача при свободном движении в неограниченном пространстве.....	55
4.4.2. Теплоотдача при свободном движении в ограниченном пространстве.....	58
4.5. Конвекция при вынужденном движении среды .....	61
4.5.1. Гидродинамические условия развития процесса при продольном омывании плоской поверхности.....	61
4.5.2. Теплоотдача при продольном омывании плоской поверхности.....	63

4.6. Теплоотдача при течении жидкости в трубах .....	67
4.6.1. Особенности движения и теплообмена в трубах .....	67
4.6.2. Теплоотдача при ламинарном режиме.....	69
4.6.3. Определение средней температуры жидкости.....	71
4.6.4. Теплоотдача при турбулентном режиме.....	72
4.7. Теплоотдача при поперечном обтекании труб.....	75
4.8. Теплоотдача при поперечном омывании пучка труб .....	78
ГЛАВА 5. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА.....	82
5.1. Теплоотдача при пленочной конденсации пара.....	83
5.2. Теплоотдача при капельной конденсации пара на поверхности.....	88
5.3. Теплоотдача при конденсации в трубах .....	89
5.4. Влияние перегрева пара.....	92
ГЛАВА 6. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ .....	94
6.1. Общие представления о процессе кипения .....	94
6.2. Теплообмен при пузырьковом кипении жидкости в большом объеме при свободной конвекции .....	99
6.3. Теплообмен при пленочном кипении .....	101
ГЛАВА 7. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	104
7.1. Общие сведения и основные понятия .....	104
7.2. Природа лучистой энергии.....	104
7.3. Виды лучистых потоков .....	106
7.4. Законы теплового излучения .....	108
7.5. «Черные» температуры.....	117
7.6. Лучистый теплообмен между телами .....	120
7.7. Угловые коэффициенты .....	123
7.7.1. Свойства лучистых потоков.....	124
7.7.2. Определение угловых коэффициентов для некоторых случаев.....	125
7.8. Теплообмен излучением между двумя поверхностями через лучепрозрачную среду .....	126
7.9. Излучение в окружающее пространство .....	127
7.10. Излучение через отверстия в печных стенках .....	128
7.11. Теплообмен в рабочем пространстве печи .....	129
7.12. Теплообмен излучением при установке экрана .....	130
7.13. Излучение газов и паров.....	132
7.14. Закон Бугера .....	135
7.15. Теплообмен излучением между газом и стенкой .....	137
7.16. Сложный теплообмен. Коэффициент теплоотдачи излучением.....	138

ГЛАВА 8. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ СОСТОЯНИИ .....	140
8.1. Передача теплоты теплопроводностью через плоскую однослойную стенку (граничные условия I рода) .....	140
8.2. Передача теплоты теплопроводностью через плоскую многослойную стенку (граничные условия I рода) .....	144
8.3. Передача теплоты теплопроводностью через цилиндрическую однослойную стенку (граничные условия I рода) .....	145
8.4. Передача теплоты теплопроводностью через цилиндрическую многослойную стенку (граничные условия I рода) .....	148
8.5. Передача теплоты теплопроводностью через шаровую стенку (граничные условия I рода) .....	150
8.6. Теплопроводность при наличии внутренних источников теплоты .....	153
ГЛАВА 9. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ОТ ОДНОЙ СРЕДЫ К ДРУГОЙ ЧЕРЕЗ РАЗДЕЛИТЕЛЬНУЮ СТЕНКУ (ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ III РОДА) .....	158
9.1. Теплопередача через разделительную плоскую однослойную или многослойную стенку .....	158
9.2. Передача теплоты от одной среды к другой через цилиндрическую однослойную стенку .....	161
9.3. Передача теплоты от одной среды к другой через цилиндрическую многослойную стенку .....	163
9.4. Тепловая изоляция трубопроводов. Критический радиус изоляции ....	166
9.5. Передача теплоты от одной среды к другой через шаровую стенку (граничные условия III рода) .....	169
9.6. Интенсификация теплопередачи при помощи ребер .....	171
ГЛАВА 10. НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ .....	175
10.1. Аналитическое описание процесса .....	177
10.2. Решение задачи об охлаждении пластины при граничных условиях III рода .....	178
10.2.1. Математическое описание процесса .....	178
10.2.2. Постановка задачи .....	179
10.2.3. Решение дифференциального уравнения .....	180
10.2.4. Подчинение решения начальным и граничным условиям .....	181
10.2.5. Анализ трансцендентного уравнения .....	183
10.2.6. Частное решение задачи .....	184
10.2.7. Окончательное решение задачи .....	185

10.3. Определение количества теплоты, отданного пластиной в процессе охлаждения.....	187
10.4. Охлаждение (нагревание) тел конечных размеров.....	188
10.5. Охлаждение цилиндра конечной длины.....	190
10.6. Определение средней температуры.....	191
10.7. Численный метод решения дифференциального уравнения теплопроводности.....	192
10.8. Конечно-разностный метод.....	194
10.8.1. Определение температуры во внутренних точках тела.....	194
10.8.2. Определение температуры в граничных точках.....	196
10.8.3. Метод прогонки.....	199
ГЛАВА 11. ТЕОРИЯ НАГРЕВА.....	201
11.1. Понятие о термически тонких и массивных телах.....	201
11.2. Влияние формы тела на скорость нагрева. Коэффициент материальной нагрузки.....	202
11.3. Нагрев термически тонких тел ( $Bi \rightarrow 0$ ) постоянным тепловым потоком.....	205
11.4. Нагрев термически тонкого тела ( $Bi \rightarrow 0$ ) в печи с постоянной температурой.....	207
11.5. Нагрев термически массивного тела постоянным тепловым потоком.....	212
11.6. Нагрев термически массивного тела в печи с постоянной температурой.....	216
11.7. Несимметричный нагрев тел.....	221
ГЛАВА 12. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ.....	223
12.1. Классификация теплообменных аппаратов.....	223
12.2. Конструктивный и поверочный расчет теплообменных аппаратов ...	228
12.2.1. Основные положения теплового расчета.....	229
12.2.2. Средний температурный напор.....	230
12.3. Определение коэффициента теплопередачи.....	235
12.4. Расчет конечной температуры рабочих жидкостей.....	236
12.5. Использование безразмерных характеристик для расчета теплообменных аппаратов.....	240
12.6. Гидромеханический расчет теплообменных аппаратов.....	242
12.7. Виды и свойства теплоносителей.....	244
ГЛАВА 13. МАССООБМЕН.....	247
13.1. Диффузия в твердом теле.....	247
13.2. Диффузионный поток.....	248

13.3. Второе уравнение диффузии (второе уравнение Фика).....	249
13.4. Решение второго уравнения диффузии (второго уравнения Фика)....	253
13.5. Некоторые аналитические методы решения второго уравнения Фика.....	253
13.6. Численный метод решения дифференциального уравнения диффузии.....	259
13.7. Конечно-разностный метод.....	260
13.7.1. Определение концентрации вещества во внутренних точках тела.....	260
13.7.2. Определение концентрации вещества в граничных точках .....	262
13.8. Метод прогонки.....	265
13.9. Тройная аналогия .....	266
13.10. Конвективный массообмен .....	269
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	272
ГЛОССАРИЙ.....	276
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Перевод единиц измерения .....	280
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Физические свойства металлов и сплавов .....	285
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Теплофизические свойства строительных и теплоизоляционных материалов.....	291
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Физические свойства газов, воды, масла МС-20 .....	297
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения пластины и цилиндра.....	302
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Значение поправочного коэффициента $\varepsilon_{\Delta} = f(P, R)$ в зависимости от схемы движения теплоносителей.....	305
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Задачи.....	307
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Контрольные вопросы .....	326