

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**ОАО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ИМ. И.И.ПОЛЗУНОВА» (ОАО «НПО ЦКТИ»)**

---

**М. А. Готовский    В. А. Суслов**

**ТЕПЛОМАССОБМЕН  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

Санкт-Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»  
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ  
ОАО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
им. И. И. ПОЛЗУНОВА» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

---

*М. А. Готовский    В. А. Сулов*

# ТЕПЛОМАССООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Санкт-Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2017

УДК 621.184.64

ББК 31.31

Г74

Рецензент — доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна  
*В. С. Куров*

*Готовский М. А. Тепломассообмен в технологических установках /*  
М. А. Готовский, В. А. Суслов. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. — 420 с.

Книга содержит основные понятия, определения и расчетные уравнения по теплопроводности, теплоотдаче, тепломассообмену, тепловому излучению, классификацию, тепловой и гидродинамический расчет теплообменных аппаратов.

Книга подготовлена для инженерно-технических работников предприятий и проектных организаций технологических отраслей промышленности, составлена в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов и поэтому может быть использована в качестве дополнительного материала студентами — теплоэнергетиками.

© Готовский М. А., Суслов В. А., 2017

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2017

**ISBN 978-5-7422-5498-0**

## О г л а в л е н и е

	Введение	9
Глава 1	Стационарные процессы теплопроводности	11
1.1	Понятие о размерности, единицы измерения. Структура функциональных связей между физическими величинами	11
1.2	Общие вопросы при описании процессов переноса теплоты	13
1.3	Коэффициенты теплопроводности различных веществ	15
1.3.1	Коэффициент теплопроводности газов	15
1.3.2	Коэффициент теплопроводности жидкостей	15
1.3.3	Коэффициент теплопроводности металлов	16
1.3.4	Коэффициент теплопроводности строительных материалов	16
1.4	Дифференциальное уравнение теплопроводности	16
1.4.1	Вывод дифференциального уравнения теплопроводности	17
1.5	Условия однозначности для процессов теплопроводности	19
1.6	Одномерные стационарные задачи для простейших тел в отсутствие источников теплоты	20
1.6.1	Передача теплоты через плоскую стенку	20
1.6.1	Граничные условия первого рода	20
1.6.2	Граничные условия третьего рода. Теплопередача	23
1.6.3	Контактное термическое сопротивление	26
1.7	Передача теплоты через цилиндрическую стенку	27
1.7.1	Граничные условия первого рода	27
1.7.2	Граничные условия третьего рода. Теплопередача	29
1.7.3	Критический диаметр цилиндрической стенки	31
1.7.4	Критический диаметр тепловой изоляции	33
1.7.5	Термическое сопротивление отложений на теплообменной поверхности трубы	33
1.8	Передача теплоты через шаровую стенку	35
1.8.1	Граничные условия первого рода	35
1.8.2	Граничные условия третьего рода	36
1.9	Обобщенный метод решения задач теплопроводности в телах элементарных форм	37
1.10	Учет зависимости теплопроводности $\lambda$ от температуры $T$	38
1.11	Интенсификация теплопередачи путем оребрения поверхности	39
1.12	Теплопроводность и теплопередача в стержне постоянного поперечного сечения	41
1.13	Теплопроводность при наличии внутренних источников теплоты	44
1.13.1	Теплопроводность однородной неограниченной пластины	44
1.14	Расчет процессов переноса теплоты в неоднородных средах	46

1.14.1	Метод элементарной ячейки	47
1.15	Особенности кондуктивного теплопереноса в микро- и наносистемах	49
1.15.1	Теплопроводность разреженных газов	50
1.15.2	Теплопроводность твердых и конденсированных тел	51
1.17	Примеры с решениями	55
Глава 2	Нестационарные процессы теплопроводности	59
2.1	Задача нестационарной теплопроводности для пластины	60
2.2	Регулярный режим процессов теплопроводности	64
2.3	Нестационарное температурное поле в объеме, где осуществляются химические процессы	65
2.4	Использование метода подобия для решения нестационарного уравнения теплопроводности	68
2.5	Продвижение фронта фазового превращения	70
2.6	Численные методы решения задач теплопроводности. Метод конечных разностей	73
2.7	Исследование процессов теплопроводности методом аналогии (электротепловая аналогия)	74
2.8	Практические возможности получения решений нестационарных задач теплопроводности	76
2.9	Примеры с решениями	81
Глава 3	Основы теории подобия и размерностей	85
3.1	Условия однозначности	85
3.2	Условия подобия и вывод его основных критериев	86
3.3	Теория размерностей	91
3.4	Движение вязкой жидкости в прямолинейной трубе	93
3.5	Теплоотдача тела в потоке жидкости	95
3.6	Распространение взрывной волны от атомного взрыва	96
Глава 4	Введение в конвективный теплообмен	97
4.1	Некоторые основные термины и определения, касающиеся конвективного теплообмена	97
4.2	Качественный характер процессов конвективного теплообмена	101
4.2.1	Концепция пограничного слоя	101
4.3	Гидродинамика и теплообмен при ламинарном течении в каналах	106
4.4	Теплоотдача при ламинарном течении в трубах и каналах	110
4.4.1	Теплоотдача на входном участке трубы	110
4.4.2	Сопrotивление и теплоотдача на входных участках каналов при ламинарном течении	113
4.4.3	Результаты расчетного исследования наиболее часто встречающихся на практике каналов некруглого сечения	117
Глава 5	Турбулентность и ее роль в процессе теплообмена	120
5.1	Переход к турбулентности в трубах и в пограничном слое	120

5.2	Простейшие практические методы расчета гидродинамики и теплообмена при турбулентных течениях	125
5.3	Турбулентный гидродинамический пограничный слой	131
5.4	Тепловой пограничный слой	133
5.5	Некоторые особенности теплогидродинамики высокоскоростных потоков	139
5.5.1	Труба Ранка-Хильша	141
5.5.2	Труба Леонтьева	142
5.6	Примеры с решениями	143
Глава 6	Теплообмен и течение при внешнем обтекании одиночных тел и системы тел	153
6.1	Теплоотдача и течение при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб	153
6.1.1	Одиночная труба	153
6.1.2	Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб	157
6.1.3	Обтекание одиночной сферы	159
5.1.4	Слои зернистых материалов	160
6.1.4.1	Некоторые дополнительные сведения, касающиеся кипящего слоя	161
6.4.1.2	Пузыри в псевдоожигенном слое	163
6.4.1.3	Теплообмен в псевдоожигенном слое	166
6.4.1.4.	Достоинства и недостатки псевдоожигенного слоя	167
6.5	Примеры с решениями	171
Глава 7	Теплоотдача при свободном движении жидкости	175
7.1	Пограничный слой в условиях преобладания гравитационных сил	175
7.2	Результаты некоторых экспериментальных исследований свободной конвекции	177
7.3	Смешанная конвекция	182
6.3.1	Вязкостно-гравитационный режим течения в трубе	182
7.3.2	Турбулентная смешанная конвекция	184
7.3.3	Влияние свободной конвекции на теплообмен при около- и сверхкритических параметрах состояния однофазной жидкости	188
7.4	Примеры с решениями	190
Глава 8	Кипение	193
8.1	Теплообмен при пузырьковом кипении жидкости в большом объеме	193
8.2	Термодинамическое подобие и закон соответственных состояний	203
8.3	Использование термодинамического подобия для описания процессов, протекающих на линии насыщения	208
8.4	Использование термодинамического подобия для описания	

	теплообмена при наличии фазового перехода (кипение)	211
8.5	Теплоотдача при пузырьковом кипении	211
8.6	Кипение на поверхностях с пористыми покрытиями	215
8.7	Критические тепловые потоки при кипении в большом объеме	217
8.8	Кипение в условиях направленного движения жидкости	219
8.9	Режимы течения восходящего двухфазного потока и теплоотдача при кипении в трубах	220
8.10	Кризис теплоотдачи при кипении в трубах	224
8.11	Закризисный теплообмен	225
8.12	Режимы движения двухфазного потока в трубах различной ориентации	225
8.12.1	Нисходящий двухфазный поток в вертикальных трубах	225
8.12.2	Режимы течения адиабатного двухфазного потока и роль кипения	226
8.12.3	Кипение при нисходящем течении	230
8.13	Кипение в неоднocomпонентных средах	233
8.13.1	Некоторые сведения из химической термодинамики	233
8.13.2	Условия фазового равновесия	235
8.13.3	Идеальные растворы	236
8.14	Теплоотдача при кипении растворов	239
8.14.1	Теплоотдача при кипении пенных растворов в трубах	245
8.15	Кризис теплообмена при кипении смесей и растворов	250
8.15.1	Кризис теплообмена при кипении пенных растворов в трубе	252
8.16	Анализ результатов исследований по накипеобразованию при восходящем парожидкостном потоке	256
8.17	Примеры с решениями	258
Глава 9	Теплообмен при конденсации пара	262
9.1	Общие сведения	262
9.2	Конденсация пара на вертикальной плоской поверхности	263
9.3	Конденсация неподвижного пара на поверхности горизонтальной трубы	267
9.4	Конденсация пара на горизонтальных пучках труб (результаты экспериментальных исследований)	269
9.4.1	Влияние скорости пара и геометрии пучка на теплоотдачу	270
9.5	Описание теплоотдачи при конденсации с помощью закона соответственных состояний	271
9.6	Капельная конденсация	273
9.7	Примеры с решениями	276
Глава 10	Тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах	281
10.1	Основные понятия и законы	281
10.1.1	Характеристики смесей	281
10.1.2	Использование модели идеального газа	282

10.2	Тепло- и массоотдача	286
10.2.1	Диффузионный пограничный слой	289
10.3	Аналогия процессов тепло- и массообмена	289
10.4	Тепло- и массообмен при конденсации в присутствии неконденсирующегося газа	290
10.5	Примеры с решениями	292
Глава 11	Осиновые теплотехнологические процессы при производстве целлюлозы	296
11.1	Тепломассообменные процессы в варочном котле	298
11.1.1	Процессы при пропитке и заварке щепы	301
11.1.2	Процессы в зоне варки	301
11.2	Тепломассообмен внутри материала в процессе его сушки	302
11.3	Тепломассообмен на поверхности материала в процессе его сушки	304
11.3.1	Конвективный теплообмен	304
11.3.2	Теплообмен от низкотемпературных излучателей	304
11.3.3	Контактный теплообмен при сушке материалов	305
11.3.4	Конвективный массообмен при сушке материалов	305
11.4	Кинетика процессов сушки волокнистых материалов	306
11.5	Гидродинамика и теплоотдача неньютоновских жидкостей в процессе изготовления бумаги	308
11.5.1	Виды жидкостей с нелинейной кривой течения	308
11.5.2	Зависимость для теплоотдачи неньютоновской жидкости	311
11.6	Конструкции контактных сушильных установок	311
Глава 12	Тепловое излучение	314
12.1	Общие понятия	314
12.2	Вектор излучения	318
12.3	Основные законы теплового излучения	319
12.3.1	Закон Планка	319
12.3.2	Закон Релея—Джинса	321
12.3.3	Закон Вина	321
12.3.4	Закон Стефана-Больцмана	322
12.3.5	Закон Кирхгофа	323
12.3.6	Закон Ламберта	325
12.4	Черные температуры	326
12.5	Уравнение переноса лучистой энергии	327
12.6	Оптическая толщина среды	329
12.7	Лучистый теплообмен между телами	329
12.8	Решение для системы нескольких серых тел	333
12.9	Защитные экраны	334
12.10	Лучеиспускание газов	335
12.10.1	Механизм взаимодействия газов с излучением	336
12.10.2	Поглощение, передача и излучение	337
12.11	Солнечная энергия	340



12.11.1	Распределение солнечной энергии и атмосферного излучения	341
12.11.2	Селективные излучатели, поглотители и передатчики	343
12.11.3	Атмосферный парниковый эффект и глобальное потепление	344
12.12	Сложный теплообмен	345
12.13	Примеры с решениями	346
Глава 13	Интенсификация теплообмена	353
13.1	Общий взгляд на рассматриваемую проблему	353
13.2	Интенсификация теплоотдачи при вынужденной конвекции с помощью искусственной шероховатости	358
13.2.1	Простые способы общей оценки эффективности	358
13.3	Поперечная кольцевая и спиральная накатка	361
13.3.1	Особенности использования интенсификации с помощью искусственной шероховатости при высоких числах Прандтля	364
13.4	Краткая история появления олуненных поверхностей	369
13.4.1	Олуненные поверхности и их преимущества	372
13.5	Использование рассмотренных поверхностей при производстве теплообменников	374
13.6	Использование витых труб	375
13.7	Развитие поверхности	376
13.7.1	Низкорребристые трубы	377
13.7.2	Теплообменники с большим коэффициентом оребрения	377
13.7.3	Перемещающие интенсифицирующие устройства	379
Глава 14	Теплообменные аппараты	380
14.1	Классификация теплообменных аппаратов	380
14.2	Тепловой расчет теплообменников рекуперативного типа	382
14.2.1	Краткие сведения относительно комплекса $\frac{k \cdot F}{W_1}$	390
14.3	Конструктивное оформление теплообменников-рекуператоров	392
14.4	Пластинчатые теплообменники	394
14.5	Гидродинамический расчет теплообменных аппаратов	395
14.6	Оптимизация конструктивных параметров теплообменников	397
14.6.1	Общий анализ	397
14.6.2	Процедура оптимизации	401
14.6.3	Некоторые методы интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах	402
14.7	Примеры с решениями	403
	Библиографический список	418