

**В.В.Ягов**

---

# **ТЕПЛООБМЕН** в однофазных средах и при фазовых превращениях

---

Учебное пособие для вузов



**В.В.Ягов**

---

# **ТЕПЛООБМЕН в однофазных средах и при фазовых превращениях**

*Допущено УМО вузов России  
по образованию в области  
энергетики и электротехники  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся  
по направлению подготовки  
"Ядерная энергетика  
и теплофизика"*

3-е издание, стереотипное

Москва  
Издательский дом МЭИ  
2022

УДК 536.2(075.8)  
ББК 31.31  
Я 542

Рецензенты:

профессор кафедры «Гидроаэродинамика» Санкт-Петербургского  
государственного политехнического университета,  
доктор технических наук **Е.Д. Федорович**;  
зав. кафедрой «Теплофизика», профессор, доктор технических наук  
МГТУ им. Н.Э. Баумана **В.И. Хвесьюк**

**Ягов В.В.**

Я 542 Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях:  
учебное пособие для вузов / В.В. Ягов. — 3-е изд., стер. — М.:  
Издательский дом МЭИ, 2022. — 542 с.: ил.

ISBN 978-5-383-01601-5

Содержание учебного пособия соответствует программе дисциплины «Тепло-массообмен», которая читается студентам, обучающимся по профилю теплофизика в рамках направления подготовки «140700. Ядерная энергетика и теплофизика». В первой части книги дается общая характеристика процессов однофазного конвективного теплообмена, выводятся дифференциальные уравнения сохранения, кратко излагаются основы теории подобия. Далее представлены все традиционные разделы однофазного конвективного теплообмена: теплообмен в ламинарном и турбулентном пограничном слое, при внешнем обтекании одиночного цилиндра и в пучках труб; теплообмен при свободной конвекции; теплообмен при течении в каналах. Во второй части книги во вводной главе кратко изложены закономерности переноса через межфазные поверхности, анализируются неравновесные эффекты на границах раздела фаз. Теплообмену при конденсации и кипении посвящены две последние главы книги, при этом последний раздел (гл. 9) изложен значительно подробнее, чем это делается обычно в курсах тепломассообмена. В этой главе использованы многие результаты научных исследований автора.

Книга адресована, в первую очередь, студентам-теплофизикам; а также студентам, магистрантам и аспирантам близких направлений подготовки (тепловая и атомная энергетика, авиационная и космическая техника, химические технологии). Первое издание учебного пособия выпущено в 2014 году.

УДК 536.2(075.8)  
ББК 31.31

ISBN 978-5-383-01601-5

© Ягов В.В., 2022  
© АО «Издательский дом МЭИ», 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	9
<b>Список основных обозначений</b> .....	15
<b>Часть 1. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ОДНОФАЗНОЙ СРЕДЕ</b> .....	19
<b>Глава 1. Введение</b> .....	19
1.1. Основные понятия .....	19
1.1.1. Классификация процессов конвективного теплообмена .....	19
1.1.2. Основное содержание задач конвективного теплообмена .....	24
1.1.3. Связь молекулярного и конвективного переноса тепла .....	27
1.2. Физический смысл коэффициента теплоотдачи .....	29
1.2.1. Толщина эквивалентной пленки .....	29
1.2.2. Коэффициент теплоотдачи как гидродинамический параметр .....	31
1.3. Качественные закономерности процесса и расчетные формулы для теплообмена в пограничном слое .....	34
1.3.1. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины .....	34
1.3.2. Число Прандтля .....	38
1.3.3. Теплообмен при турбулентном обтекании плоской пластины .....	40
1.4. Качественные закономерности процесса и расчетные формулы для теплообмена при течении в каналах .....	42
1.4.1. Тепловой баланс, среднemasсовая температура .....	42
1.4.2. Изменение закономерностей течения и теплообмена по длине трубы .....	45
1.4.3. Теплообмен при ламинарном течении в трубах .....	47
1.4.4. Теплообмен при турбулентном течении в круглой трубе .....	51
Контрольные вопросы к главе 1 .....	54
<b>Глава 2. Математическое описание процессов конвективного теплообмена</b> .....	56
2.1. Общая форма законов сохранения .....	56
2.1.1. Предварительные замечания .....	56
2.1.2. Обоснование общей формы законов сохранения .....	59
2.2. Закон сохранения массы .....	61
2.3. Закон сохранения импульса .....	64
2.3.1. Вывод в общей форме .....	64
2.3.2. Тензоры плотности потока импульса, давлений и вязких напряжений .....	66
2.3.3. Различные формы дифференциального уравнения сохранения импульса .....	68
2.4. Закон сохранения энергии .....	71
2.4.1. Вывод в общей форме .....	71
2.4.2. Плотность потока энергии .....	72
2.4.3. Различные формы дифференциального уравнения энергии .....	73

2.5. Законы сохранения для смесей .....	76
2.5.1. Уравнение сохранения массы компонента в бинарной смеси .....	76
2.5.2. Молекулярный поток массы компонента в смеси .....	80
2.5.3. Влияние молекулярных потоков массы компонента на перенос импульса и энергии в смеси .....	82
2.6. Система уравнений сохранения для конвективного теплообмена; аналогия процессов переноса .....	86
Контрольные вопросы к главе 2 .....	89
<b>Глава 3. Основы теории подобия .....</b>	<b>91</b>
3.1. Подобие физических явлений .....	91
3.2. Теоремы теории подобия .....	95
3.2.1. Первая теорема теории подобия .....	95
3.2.2. Вторая теорема теории подобия .....	99
3.2.3. Третья теорема теории подобия .....	101
3.3. Физический смысл критериев и чисел подобия .....	102
3.3.1. Гидродинамические числа подобия .....	102
3.3.2. Числа подобия в процессах теплообмена .....	106
3.3.3. Числа подобия в процессах массообмена .....	108
3.3.4. Параметрические числа подобия (симплексы) .....	110
3.4. Практическое использование теории подобия .....	111
3.4.1. Теория подобия как научная основа экспериментальных исследований .....	111
3.4.2. Теория подобия и моделирование .....	114
3.5. Теория размерностей .....	116
Контрольные вопросы к главе 3 .....	119
<b>Глава 4. Теплообмен при внешнем обтекании (в пограничном слое) .....</b>	<b>121</b>
4.1. Уравнения температурного пограничного слоя .....	121
4.2. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины .....	126
4.2.1. Постановка задачи и анализ методами теории размерностей .....	126
4.2.2. Основные результаты задачи Блазиуса .....	128
4.2.3. Точное решение задачи о теплообмене .....	132
4.2.4. Теплоотдача в предельных по числу Прандтля случаях .....	137
4.3. Переход к турбулентному течению .....	140
4.3.1. О результатах теоретического анализа .....	140
4.3.2. Анализ влияния различных факторов на турбулентный переход .....	143
4.4. Осредненные уравнения импульса и энергии при турбулентном течении .....	150
4.4.1. Вывод осредненных уравнений .....	150
4.4.2. Анализ осредненных уравнений .....	154
4.4.3. Осредненные уравнения в приближении пограничного слоя .....	161
4.5. Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования .....	162
4.5.1. О внутренних масштабах турбулентного течения .....	162
4.5.2. Структура пристеночной турбулентной области .....	166

4.5.3. Моделирование переноса импульса в пристеночной турбулентной области	173
4.6. Теплообмен при турбулентном течении в пограничном слое	177
4.6.1. Аналогия Рейнольдса	177
4.6.2. Аналогия Рейнольдса, модифицированная на основе двухслойной модели пристеночной турбулентной области	180
4.6.3. Анализ результатов. Рекомендации по расчету	182
4.7. Теплообмен при поперечном обтекании труб	184
4.7.1. Гидродинамика и теплообмен при поперечном обтекании кругового цилиндра	184
4.7.2. Теплообмен в пучках труб	189
Контрольные вопросы к главе 4	192
<b>Глава 5. Теплообмен при свободной конвекции</b>	<b>195</b>
5.1. Механизм и математическое описание свободной конвекции	195
5.1.1. Качественный анализ. Приближение Буссинеска	195
5.1.2. Математическое описание свободной конвекции в приближении Буссинеска и пограничного слоя	198
5.1.3. Максимальная скорость свободной конвекции. Оценка толщины свободноконвективного пограничного слоя	200
5.2. Теплообмен при свободной конвекции у вертикальной плоскости	202
5.2.1. Постановка задачи	202
5.2.2. Приближенное аналитическое решение	204
5.2.3. Турбулентная свободная конвекция на вертикальной плоскости	208
5.2.4. Заключительные замечания	209
5.3. Свободная конвекция у поверхности цилиндров и сфер	210
5.3.1. Горизонтальные цилиндры большого диаметра	211
5.3.2. Горизонтальные цилиндры малого диаметра	213
5.3.3. Свободная конвекция на сферических поверхностях	216
5.4. Свободная конвекция на горизонтальной плоскости и в замкнутых объемах	218
5.4.1. Горизонтальные поверхности и прослойки	218
5.4.2. Свободная конвекция в замкнутых объемах	221
Контрольные вопросы к главе 5	223
<b>Глава 6. Теплообмен при течении жидкостей в каналах</b>	<b>225</b>
6.1. Постановка задачи	225
6.1.1. Содержание анализа	225
6.1.2. Математическое описание для круглой трубы	226
6.2. Общие закономерности стабилизированного течения и теплообмена	229
6.2.1. Гидродинамическая и тепловая (температурная) стабилизация	229
6.2.2. Влияние вида граничных условий на стабилизированный теплообмен	231

6.3. Обобщенные (интегральные) количественные характеристики стабилизированного теплообмена в круглой трубе при $q_c = \text{const}$ . . . . .	237
6.3.1. Профили скорости, теплового потока, температуры . . . . .	237
6.3.2. Общее выражение для коэффициента теплоотдачи (интеграл Лайона) . . . . .	240
6.4. Стабилизированный теплообмен при ламинарном течении в каналах . . . . .	241
6.4.1. Круглые трубы . . . . .	241
6.4.2. Призматические каналы . . . . .	243
6.5. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении в круглой трубе . . . . .	246
6.5.1. Качественный анализ профилей скорости, теплового потока и температуры . . . . .	246
6.5.2. Результаты теоретического исследования теплообмена . . . . .	252
6.5.3. Расчетные уравнения для теплоотдачи . . . . .	254
6.6. Теплообмен в начальном термическом участке при ламинарном течении в круглой трубе . . . . .	258
6.6.1. Постановка задачи . . . . .	258
6.6.2. Приближенное решение Левека для $T_c = \text{const}$ . . . . .	259
6.6.3. Задача Гретца—Нуссельта для $T_c = \text{const}$ . . . . .	262
6.6.4. Теплообмен в начальном термическом участке при $q_c = \text{const}$ . . . . .	270
6.7. Теплообмен в начальном гидродинамическом участке при ламинарном течении в круглой трубе . . . . .	273
6.8. Начальные участки при турбулентном течении в трубах . . . . .	276
6.8.1. Начальный термический участок . . . . .	276
6.8.2. Начальный гидродинамический участок . . . . .	278
6.9. Влияние переменности теплофизических свойств на теплообмен и гидравлическое сопротивление при течении в трубах . . . . .	282
6.9.1. Общие положения . . . . .	282
6.9.2. Влияние переменности свойств жидкости на теплообмен и гидравлическое сопротивление . . . . .	284
6.9.3. Влияние переменности свойств газов на теплообмен и гидравлическое сопротивление . . . . .	288
6.10. Влияние свободной конвекции на теплообмен при вынужденном течении в трубах . . . . .	292
6.10.1. Общие положения . . . . .	292
6.10.2. Влияние свободной конвекции на теплообмен при ламинарном вынужденном течении в круглой трубе . . . . .	294
6.11. Теплообмен в однофазной сверхкритической области . . . . .	299
6.12. Интенсификация однофазного конвективного теплообмена . . . . .	306
6.12.1. Содержание задачи . . . . .	306
6.12.2. Влияние микроструктуры поверхности на гидравлическое сопротивление . . . . .	307
6.12.3. Принципы и методы интенсификации конвективного однофазного теплообмена . . . . .	311
Контрольные вопросы к главе 6 . . . . .	315

<b>Часть 2. ТЕПЛОБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ</b> .....	319
<b>Глава 7. Введение в механику двухфазных систем</b> .....	319
7.1. Предмет, методы анализа и модели двухфазных систем .....	319
7.2. Универсальные условия совместности .....	326
7.2.1. Вывод в общей форме .....	326
7.2.2. Развернутая запись универсальных условий совместности .....	329
7.2.3. Универсальные условия совместности для частных случаев .....	332
7.3. Универсальные условия совместности в системе отсчета наблюдателя .....	335
7.3.1. Скорость движения границы раздела фаз .....	335
7.3.2. Запись универсальных условий совместности в лабораторной системе отсчета .....	340
7.4. Специальные условия совместности .....	343
7.4.1. Общие положения .....	343
7.4.2. Результаты линейной теории для некоторых задач гидродинамики и теплообмена в однокомпонентной среде .....	348
7.4.3. Специальные условия совместности в квазиравновесном приближении .....	359
7.5. Количественные характеристики двухфазных потоков в каналах .....	362
7.5.1. Паросодержание .....	362
7.5.2. Скорости, плотность смеси .....	365
7.5.3. Гомогенная модель для трения .....	368
Контрольные вопросы к главе 7 .....	370
<b>Глава 8. Теплообмен при конденсации</b> .....	372
8.1. Общие положения .....	372
8.1.1. Определения. Классификация .....	372
8.1.2. Пленочная и капельная конденсация .....	373
8.2. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной плоскости .....	376
8.2.1. Постановка задачи .....	376
8.2.2. Решение задачи .....	379
8.3. Конденсация пара на наклонных и криволинейных поверхностях .....	384
8.3.1. Конденсация на наклонной плоскости .....	384
8.3.2. Конденсация на поверхности горизонтального цилиндра .....	385
8.4. Современная методика расчета теплообмена при конденсации неподвижного пара .....	390
8.4.1. Анализ допущений Нуссельта .....	390
8.4.2. Практические рекомендации по расчету .....	398
8.5. Теплообмен при турбулентном течении пленки конденсата .....	401
8.6. Теплообмен при конденсации пара, движущегося внутри труб .....	404
8.6.1. Общие положения .....	404
8.6.2. Конденсация в охлаждаемых каналах при турбулентном течении смеси .....	407



8.7. Конденсация пара в промышленных аппаратах и методы ее интенсификации .....	410
8.7.1. Конденсация на пучках горизонтальных труб .....	410
8.7.2. Методы интенсификации теплообмена при конденсации .....	413
Контрольные вопросы к главе 8 .....	417
<b>Глава 9. Теплообмен при кипении .....</b>	<b>419</b>
9.1. Зарождение паровой фазы .....	419
9.1.1. Общие положения .....	419
9.1.2. Образование паровой фазы в объеме однородно перегретой жидкости .....	420
9.1.3. Парообразование на твердой стенке (при кипении) .....	426
9.2. Рост паровых пузырьков в объеме равномерно перегретой жидкости .....	432
9.2.1. Предельные схемы роста .....	432
9.2.2. Динамическая инерционная схема роста парового пузырька .....	434
9.2.3. Тепловая энергетическая схема роста .....	437
9.2.4. Рост пузырька при больших числах Якоба .....	442
9.3. Динамика паровых пузырьков при кипении .....	447
9.3.1. Основные результаты опытных наблюдений .....	447
9.3.2. Приближенная модель роста парового пузырька на обогреваемой стенке .....	450
9.3.3. Условия отрыва паровых пузырьков от твердой поверхности .....	455
9.4. Качественный анализ теплоотдачи при кипении .....	468
9.5. Теплообмен при пленочном и переходном кипении .....	472
9.5.1. Пленочное кипение при ламинарном течении пара .....	472
9.5.2. Пленочное кипение при турбулентном течении пара .....	475
9.5.3. Теплообмен при переходном кипении .....	478
9.6. Теплообмен при пузырьковом кипении .....	483
9.6.1. Качественные закономерности процесса .....	483
9.6.2. Приближенная теория теплообмена при пузырьковом кипении .....	491
9.7. Теплообмен при кипении жидкости в условиях вынужденного движения .....	500
9.7.1. Пузырьковое кипение в конвективном потоке .....	500
9.7.2. Теплообмен при высоких паросодержаниях потока .....	508
9.8. Кризисы кипения в условиях свободного движения .....	515
9.8.1. Гидродинамическая модель кризиса .....	516
9.8.2. Кризис как результат роста площади сухих пятен .....	521
9.8.3. Кризис пленочного кипения .....	525
9.9. Кризис теплообмена при кипении жидкостей в каналах .....	527
9.9.1. Общие закономерности .....	527
9.9.2. Модель кризиса в высокоскоростных потоках недогретой жидкости .....	530
Контрольные вопросы к главе 9 .....	533
<b>Список литературы .....</b>	<b>537</b>