

*К 150-летию Научного учебного комплекса  
«Энергомашиностроение»*

# **Техническая физика и энергомашиностроение**



## **Редакционный совет**

А.А. Александров (председатель), д-р техн. наук  
А.А. Жердев (зам. председателя), д-р техн. наук  
В.Л. Бондаренко, д-р техн. наук  
А.Ю. Вараксин, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН  
К.Е. Демихов, д-р техн. наук  
Ю.Г. Драгунов, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН  
В.И. Крылов, канд. техн. наук  
М.К. Марахтанов, д-р техн. наук  
В.А. Марков, д-р техн. наук  
С.Е. Семёнов, канд. техн. наук  
В.И. Хвесюк, д-р техн. наук  
Д.А. Ягодников, д-р техн. наук

# Теория тепломассообмена

Учебник для студентов машиностроительных специальностей  
технических университетов и вузов

*Под редакцией академика РАН А.И. Леонтьева*

3-е издание, исправленное и дополненное



МОСКВА  
**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА  
2018

УДК 536.24+66.015.23  
ББК 31.31+35.113  
Т33

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебника*

*Рецензент В.В. Ягов*

*Авторы:*

С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов, А.И. Леонтьев, Б.М. Миронов,  
В.М. Никитин, Г.Б. Петражицкий, В.И. Хвостов, А.Г. Чукаев,  
Е.В. Шишов, В.В. Школа

Т33 **Теория тепломассообмена** : учебник для вузов / [С. И. Исаев и др.] ; под  
ред. А. И. Леонтьева. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 462, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4527-1

Рассмотрены основы теории переноса теплоты и вещества в неподвижной и движущейся среде, а также перенос теплоты радиацией. Изложены современные методы расчета процессов тепло- и массообмена применительно к различным техническим приложениям, особенно для областей новой техники (авиационной, космической, атомной энергетики и т. п.).

Для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей, аспирантов и научных работников.

УДК 536.24+66.015.23  
ББК 31.31+35.113



*Все права защищены. Никакая часть данного издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку Издательства обеспечивает Адвокатское бюро «Сергей Москаленко и партнеры».*

ISBN 978-5-7038-4527-1

© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

# Оглавление

---

---

<b>Предисловие председателя редакционного совета</b> . . . . .	8
<b>От авторов</b> . . . . .	9
<b>Основные понятия и определения</b> . . . . .	10
<b>Раздел I. Теплопроводность</b> . . . . .	11
<i>Глава 1. Общие положения теории теплопроводности</i> . . . . .	13
1.1. Температурное поле, градиент температуры и закон Фурье . . . . .	13
1.2. Теплопроводность веществ . . . . .	14
1.3. Дифференциальное уравнение теплопроводности . . . . .	17
1.4. Условия однозначности . . . . .	19
<i>Глава 2. Стационарная теплопроводность</i> . . . . .	22
2.1. Теплопроводность тел простой формы . . . . .	22
2.2. Интенсификация теплопередачи . . . . .	34
2.2.1. Теплопроводность стержня постоянного поперечного сечения (35)	
2.2.2. Температурное поле круглого ребра постоянной толщины (37)	
2.2.3. Теплопроводность прямого ребра переменного поперечного сечения (38)	
2.3. Теплопроводность при наличии внутренних источников теплоты . . . . .	40
2.3.1. Неограниченная пластина (40)	
2.3.2. Цилиндрическая стенка (42)	
2.4. Температурное поле полуограниченной пластины . . . . .	45
2.5. Температурное поле пористой пластины . . . . .	46
<i>Глава 3. Нестационарные процессы теплопроводности</i> . . . . .	49
3.1. Основные методы решения уравнения теплопроводности при нестационарном режиме . . . . .	49
3.2. Температурное поле полуограниченного тела . . . . .	59
3.3. Нестационарные процессы теплопроводности в неограниченной пластине . . . . .	62
3.4. Теплопроводность тел, образованных пересечением двух пластин . . . . .	70
3.5. Температурное поле пластины с внутренними источниками теплоты . . . . .	73
3.6. Нестационарное температурное поле бесконечно длинного цилиндра . . . . .	74
3.7. Нестационарное температурное поле шара . . . . .	80
3.8. Регулярный режим процессов теплопроводности . . . . .	82
3.9. Периодические тепловые процессы . . . . .	86
3.10. Численные методы решения задач теплопроводности . . . . .	89
<b>Раздел II. Конвективный теплообмен</b> . . . . .	93
<i>Глава 4. Основные положения учения о конвективном теплообмене</i> . . . . .	95
4.1. Основные понятия и определения . . . . .	95
4.2. Дифференциальные уравнения теории конвективного теплообмена . . . . .	97
4.3. Условия однозначности для процессов конвективного теплообмена . . . . .	108
<i>Глава 5. Основы теории подобия и размерностей</i> . . . . .	110
5.1. Значение теории подобия для теории теплообмена . . . . .	110
5.2. Понятие о подобии физических величин . . . . .	111
5.3. Условия подобия физических явлений . . . . .	115
5.4. Критерии подобия и уравнения подобия конвективного теплообмена . . . . .	119
5.5. Метод анализа размерностей . . . . .	127
5.6. Моделирование . . . . .	133
5.7. Определяющие размер и температура . . . . .	135

<i>Глава 6. Конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости . . .</i>	136
6.1. Основы теории пограничного слоя . . . . .	136
6.1.1. Особенности течения вязкой жидкости при больших числах Re. Пограничный слой (136)	
6.1.2. Дифференциальные уравнения динамического и теплового пограничных слоев (137)	
6.1.3. Система уравнений плоского сжимаемого пограничного слоя с учетом диффузии и химических реакций (140)	
6.1.4. Тройная аналогия (147)	
6.1.5. Интегральные соотношения импульсов, энергии и диффузии (148)	
6.2. Вынужденная конвекция при ламинарном режиме течения . . . . .	154
6.2.1. Тепло- и массообмен при обтекании пластины потоком несжимаемой жидкости (154)	
6.2.2. Автомодельные решения уравнений динамического, теплового и диффузионного пограничных слоев (162)	
6.2.3. Теплообмен на криволинейной поверхности (167)	
6.2.4. Теплообмен при сверхзвуковых скоростях течения газа (171)	
6.2.5. Точные решения уравнения энергии для пограничного слоя сжимаемого газа при $dp/dx = 0$ (175)	
6.2.6. Приближенный метод решения с помощью интегрального соотношения энергии (179)	
6.2.7. Трение и теплообмен на проникаемой поверхности (180)	
6.2.8. Теплообмен при наличии химических реакций (187)	
6.3. Вынужденная конвекция при турбулентном течении жидкости . . . . .	194
6.3.1. Возникновение турбулентного течения (194)	
6.3.2. Уравнения турбулентного пограничного слоя (196)	
6.3.3. Турбулентное касательное напряжение, тепловой и диффузионный потоки (197)	
6.3.4. Некоторые результаты экспериментального исследования турбулентного пограничного слоя (198)	
6.3.5. Полуэмпирические теории турбулентного переноса (200)	
6.3.6. Распределение скоростей, температур и концентраций в пристенной части плоского турбулентного пограничного слоя (211)	
6.3.7. Законы трения, тепло- и массообмена (216)	
6.3.8. Влияние сжимаемости газа и неизотермичности на законы трения, тепло- и массообмена в турбулентном пограничном слое (220)	
6.3.9. Влияние поперечного потока вещества на законы трения, тепло- и массообмена (222)	
6.4. Методы расчета теплообмена в турбулентном пограничном слое. . . . .	225
6.4.1. Решение уравнения энергии турбулентного пограничного слоя на непроницаемой поверхности (225)	
6.4.2. Решение уравнения энергии турбулентного пограничного слоя на проникаемой поверхности (228)	
6.5. Теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах . . . . .	229
6.5.1. Течение в каналах (229)	
6.5.2. Теплообмен при вынужденном ламинарном течении жидкости в трубах (233)	
6.5.3. Теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубах (255)	
6.6. Теплообмен при поперечном обтекании труб . . . . .	273
6.7. Методы тепловой защиты тел от воздействия высокоэнтальпийного потока газа . . . . .	278
6.7.1. Конвективный теплообмен при наличии газовых завес (278)	
6.7.2. Пористое охлаждение (289)	
6.8. Теплообмен при течении разреженных газов. . . . .	291
<i>Глава 7. Теплообмен при естественной конвекции . . . . .</i>	299
7.1. Теплообмен при естественной конвекции в большом объеме . . . . .	299
7.1.1. Общие положения (299)	
7.1.2. Вертикальная пластина (300)	
7.1.3. Горизонтальный цилиндр (310)	
7.2. Теплообмен при свободном движении . . . . .	312
7.2.1. Общие положения (312)	
7.2.2. Длинные горизонтальные слои (313)	
7.2.3. Вертикальные слои (316)	

<b>Глава 8. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния вещества . . . . .</b>	<b>319</b>
8.1. Теплоотдача при конденсации паров. . . . .	319
8.1.1. Общие сведения о процессе (319) 8.1.2. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара при ламинарном течении пленки по вертикальной пластине (323) 8.1.3. Турбулентное течение пленки конденсата (329) 8.1.4. Теплообмен при пленочной конденсации на горизонтальной трубе (332) 8.1.5. Теплообмен при пленочной конденсации движущегося пара (334) 8.1.6. Теплоотдача при конденсации пара внутри трубы (339) 8.1.7. Теплообмен при конденсации пара в условиях ослабленной гравитации (340) 8.1.8. Конденсация пара из парогазовой смеси (341) 8.1.9. Конденсация на резьбовидной поверхности (348) 8.1.10. Капельная конденсация (350) 8.1.11. Методы интенсификации теплообмена при конденсации (352)	
8.2. Теплообмен при кипении жидкости . . . . .	353
8.2.1. Основные понятия (353) 8.2.2. Возникновение активной паровой фазы (357) 8.2.3. Механизм процесса теплообмена при пузырьковом кипении жидкости в условиях свободной конвекции (359) 8.2.4. Пузырьковое кипение при вынужденной конвекции (365) 8.2.5. Теплоотдача при пленочном режиме кипения (369) 8.2.6. Критические плотности теплового потока (373) 8.2.7. Теплообмен при кипении жидких металлов и криогенных жидкостей (377)	
<b>Глава 9. Теплообмен излучением . . . . .</b>	<b>381</b>
9.1. Основные понятия и определения. . . . .	381
9.2. Законы теплового излучения черного тела. . . . .	385
9.3. Радиационный теплообмен между твердыми телами, разделенными диатермичной средой . . . . .	392
9.3.1. Задача о двух параллельных пластинах (392) 9.3.2. Радиационный теплообмен между телом и оболочкой (395) 9.3.3. Защитные экраны (396) 9.3.4. Радиационный теплообмен между произвольно расположенными элементами поверхностей нагрева (398)	
9.4. Солнечное излучение . . . . .	401
9.5. Радиационный теплообмен в полупрозрачных средах. . . . .	404
9.5.1. Особенности излучения полупрозрачных сред (404) 9.5.2. Характеристики объемного излучения, поглощения и рассеяния энергии (407) 9.5.3. Уравнение переноса энергии излучения в полупрозрачной среде (409) 9.5.4. Степень черноты и поглощательная способность газового объема (411) 9.5.5. Интегральные характеристики излучения и поглощения полупрозрачного объема (414) 9.5.6. Радиационный теплообмен между газом и оболочкой (418) 9.5.7. Излучение пламени. Особенности расчета радиационного теплообмена в камерах сгорания (419) 9.5.8. Сложный теплообмен (422)	
<b>Глава 10. Теплообменные аппараты. . . . .</b>	<b>425</b>
10.1. Классификация теплообменных аппаратов . . . . .	425
10.2. Основы теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов . . . . .	426
10.3. Основы теплового расчета регенеративных теплообменных аппаратов . . . . .	440
10.4. Сравнение рекуператоров и регенераторов . . . . .	443
<b>Литература . . . . .</b>	<b>448</b>
<b>Приложения. . . . .</b>	<b>450</b>

## Предисловие председателя редакционного совета

Процессы тепло- и массообмена играют важную, а во многих случаях определяющую роль в различных областях техники и науки. В авиационной и ракетно-космической технике оптимизация этих процессов приводит к снижению материалоёмкости, экономии топлива и увеличению срока службы конструкций.

Исследование теплообмена имеет принципиальное значение при разработке современных энергетических установок и контроле рабочих процессов в металлургических и других производствах. В биологии и медицине процессы теплообмена важны для поддержания жизнедеятельности организмов, а в ряде случаев локальные тепловые воздействия являются необходимым средством лечения опасных заболеваний.

Тепловые процессы в атмосфере определяют погоду и климат на планете, а исследование процесса переноса различных примесей позволяет делать важные практические экологические прогнозы.

Интенсификация теплообмена позволяет получить значительную экономию энергии в энергетических установках малой энергетики, предназначенных для индивидуального обеспечения теплом и электрической энергией объектов малоэтажного строительства, в различных сферах жилищно-коммунального хозяйства, например при проектировании оптимальных систем отопления зданий и сооружений. В настоящее время тепловые и массообменные расчеты являются составной частью подавляющего большинства современных конструкторских и технологических разработок. Очевидно, что решение указанных выше задач невозможно без специалистов, обладающих соответствующими знаниями в области теплообмена.

Теория теплообмена представляет собой один из важнейших разделов технической физики и базируется на таких дисциплинах, как физика, термодинамика, механика жидкости и газа и др. Существенный вклад в ее развитие внесли отечественные ученые: М.В. Кирпичёв, М.А. Михеев, А.А. Гухман, Г.Н. Кружилин, С.С. Кутателадзе, А.В. Лыков, Б.С. Петухов, Д.А. Лабунцов, А.И. Леонтьев, В.М. Иевлев, В.С. Авдусевский, В.И. Субботин и многие другие.

В 2018 году исполняется 150 лет факультету «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, и все эти годы на факультете и в НИИ «Энергомашиностроение» проводились научно-исследовательские работы по изучению тепловых и массообменных явлений в различных тепловых машинах и технологических процессах. При этом почти все направления подготовки на факультете связаны с тепловыми машинами: ракетные двигатели, поршневые двигатели, газотурбинные установки, плазменные энергетические установки, ядерные реакторы и установки, холодильные машины. Основными дисциплинами при обучении студентов по этим направлениям являются: «Термодинамика», «Механика жидкости и газа», «Управление техническими системами» и «Теория теплообмена» — одна из важнейших дисциплин. Третье издание настоящего учебника соответствует содержанию программ по дисциплинам: «Теория теплообмена», «Основы теории теплообмена», «Термодинамика и теплопередача» и др.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся в бакалавриате и магистратуре, а также для аспирантов, инженеров и научных работников и является одной из книг серии учебников, монографий, сборников статей, подготовленных научными и педагогическими школами НУК «Энергомашиностроение» к знаменательной дате в жизни Университета.

## От авторов

Вниманию читателей предлагается третье издание учебника «Теория тепло-массообмена», подготовленного преподавателями и сотрудниками Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. В новом издании нашли отражение результаты, полученные в области теплообмена за последние 20 лет, прошедшие с момента второго издания учебника. Обновлен список использованной литературы. В новом издании учтены замечания, полученные от читателей, за что авторы выражают им свою признательность.

Материал книги распределен между авторами следующим образом: гл. 1, 2.1, 2.5, гл. 4, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.7, 6.3.9, 6.4.1, 6.4.2, 6.6–6.8, 8.1.7, 8.2.2–8.2.4 написаны академиком РАН А.И. Леонтьевым; гл. 2 (кроме 2.1, 2.5) и гл. 3 (кроме 3.10, 3.11) — кандидатом технических наук, доцентом И.А. Кожинным; гл. 5 — кандидатом технических наук, профессором С.И. Исаевым; 5.1, 6.2.1, 6.2.4, 6.2.5, 6.3.1–6.3.4, 6.3.6 — доктором технических наук, профессором Е.В. Шишовым, 6.3.5 — совместно доктором технических наук, профессором Е.В. Шишовым и доктором технических наук, доцентом, А.Г. Чукаевым; 6.2.6, 6.2.8, 6.3.7, 6.3.8 — совместно академиком РАН А.И. Леонтьевым и доктором технических наук, профессором Е.В. Шишовым; гл. 7, 3.10, 3.11 — доктором технических наук, профессором Г.Б. Петражицким; 8.1.1, 8.1.2 — совместно кандидатом технических наук, доцентом В.М. Никитиным и кандидатом технических наук, доцентом В.В. Школой; 8.1.3–8.1.6, 8.1.10 — кандидатом технических наук, доцентом В.М. Никитиным; 7.1.9, 8.1.11 — кандидатом технических наук, доцентом В.В. Школой; 8.1.8 — совместно академиком РАН А.И. Леонтьевым и кандидатом технических наук, доцентом В.В. Школой; 8.2.1, 8.2.5–8.2.7 и гл. 9 (кроме 9.5) — кандидатом технических наук, доцентом Б.М. Мироновым; 9.5 — кандидатом технических наук, доцентом В.И. Хвостовым; гл. 10, 6.5 — кандидатом технических наук, доцентом В.И. Кофановым.

Авторы также выражают признательность доктору технических наук, профессору В.Н. Афанасьеву, кандидату технических наук, доценту К.С. Егорову, С.И. Каскову и кандидату технических наук, доценту А.М. Пылаеву, принявшим активное участие в подготовке данного издания к публикации.

## Основные понятия и определения

---

Теория теплообмена — наука о самопроизвольных необратимых процессах распространения теплоты в пространстве. Теплота передается в пространстве тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

**Теплопроводностью** называется молекулярный перенос теплоты в сплошной среде. Этот процесс возникает при неравномерном распределении температур в среде. В этом случае теплота передается путем непосредственного соприкосновения частиц, имеющих различную скорость, что приводит к обмену энергией между молекулами, атомами или свободными электронами.

**Конвекцией** называют перенос теплоты при перемещении объемов газа или жидкости в пространстве. Теплообмен между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела называют **конвективным теплообменом**.

**Тепловое излучение** — процесс распространения теплоты электромагнитными волнами. Этот вид передачи теплоты обусловлен превращением внутренней энергии тела в энергию излучения, переносом энергии излучения с помощью электромагнитных волн и поглощением ее другими телами.

Теплообмен, обусловленный совместным переносом теплоты излучением, теплопроводностью и конвекцией, называется **радиационно-конвективным**. Если теплота передается теплопроводностью и излучением, то такой вид теплообмена является **радиационно-кондуктивным**. Процесс теплообмена между двумя теплоносителями, разделенными твердой стенкой, называется **теплопередачей**.

В природе и технике многие процессы теплообмена усложняются процессами массообмена, фазовыми переходами, химическими реакциями на поверхности тела и в самом теплоносителе. Изложение основ современной теории тепломассообмена и ее практических приложений в технике является главной задачей настоящего учебника.

Раздел I

# **ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ**

## Общие положения теории теплопроводности

### 1.1. Температурное поле, градиент температуры и закон Фурье

**Температурным полем** тела (или системы тел) называется совокупность значений температуры, взятая по его объему в любой рассматриваемый момент времени. Математически поле температур может быть выражено в форме уравнения  $F(t, x, y, z, \tau) = 0$ .

В инженерной практике приходится иметь дело и с **нестационарным**, и со **стационарным** температурными полями. Первое из этих полей изменяется по пространству и времени, а второе является функцией только координат. Температурное поле обладает всеми свойствами непрерывного скалярного поля.

Изменение температурного поля по пространству наблюдается лишь в направлениях, пересекающих поверхности одинаковой температуры (изотермические поверхности), причем наиболее резкое изменение имеет место в направлении нормали к изотермической поверхности (рис. 1.1).

Предел

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \vec{n} \cdot \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t \quad (1.1)$$

в теории теплообмена называется **градиентом температуры**. В выражении (1.1)  $\vec{n}$  — единичный вектор нормали;  $n$  — нормаль к изотермической поверхности. Градиент температуры представляет собой вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности и численно равный частной производной от температуры по этому направлению.

По определению,

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial t}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial t}{\partial z} \vec{k}, \quad (1.2)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — единичные векторы.

Количество проходящей в единицу времени  $\tau$  теплоты, отнесенное к единице площади изотермической поверхности  $S$ , называется плотностью теплового потока  $\vec{q}$  и является вектором, направление которого противоположно температурному градиенту (см. рис. 1.1):

$$\vec{q} = (-\vec{n}) \frac{dQ}{d\tau} \frac{1}{S}. \quad (1.3)$$

Проекция вектора  $\vec{q}$  на любое направление  $l$  есть вектор  $\vec{q}_l$ , скалярное значение которого равно  $q \cos(n, l)$ .

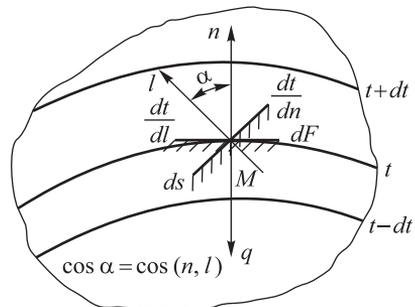


Рис. 1.1. К определению градиента температуры и формулировке закона Фурье

## Стационарная теплопроводность

---

### 2.1. Теплопроводность тел простой формы

При стационарном режиме температурное поле не зависит от времени ( $\partial t / \partial \tau = 0$ ) и дифференциальное уравнение теплопроводности (1.17) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_V = 0. \quad (2.1)$$

Рассмотрим несколько случаев, когда температура будет зависеть только от одной координаты.

**Неограниченная плоская стенка** (рис. 2.1, а) представляет собой тело, ограниченное с двух сторон параллельными поверхностями, протяженность которых в направлениях  $y$  и  $z$  велика. Если боковые поверхности неограниченной плоской стенки изотермические, то изменением температуры в ней по осям  $y$  и  $z$  можно пренебречь ( $\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0$ ) и дифференциальное уравнение теплопроводности (2.1) записать в виде

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dt}{dx} \right) + q_V = 0. \quad (2.2)$$

Тело цилиндрической формы (рис. 2.1, б), протяженность которого по оси  $z$  велика, называется **неограниченным цилиндром**, который может быть сплошным ( $R_1 = 0$ ) и полым ( $R_1 \neq 0$ ).

Как для сплошного, так и для полого неограниченных цилиндров в том случае, когда поверхности являются изотермическими, имеем  $\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0$  ( $r^2 = x^2 + y^2$ ) и дифференциальное уравнение теплопроводности принимает вид

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda \frac{dt}{dr} \right) + q_V = 0. \quad (2.3)$$

В случае изотермичности внутренней и наружной поверхностей для **полого и сплошного шаров** (рис. 2.2) имеем  $\frac{\partial t}{\partial \varphi} = \frac{\partial t}{\partial \psi} = 0$  ( $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ ). Следовательно, дифференциальное уравнение теплопроводности в этом случае запишется так:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \lambda \frac{dt}{dr} \right) + q_V = 0. \quad (2.4)$$

Нетрудно заметить, что дифференциальные уравнения теплопроводности (2.2)—(2.4) можно объединить:

## Нестационарные процессы теплопроводности

### 3.1. Основные методы решения уравнения теплопроводности при нестационарном режиме

Дифференциальное уравнение теплопроводности при отсутствии внутренних источников теплоты и постоянных теплофизических параметров имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T. \quad (3.1)$$

Уравнение (3.1) является линейным однородным дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных. Решения такого уравнения обладают свойством наложения аналогично решениям обыкновенного однородного дифференциального уравнения второго порядка, для которого решением является выражение  $C_1 T_1 + C_2 T_2$ , где  $C_1, C_2$  — произвольные постоянные;  $T_1, T_2$  — частные решения уравнения. Уравнение (3.1), являясь уравнением в частных производных, имеет бесчисленное множество решений.

Дифференциальное уравнение теплопроводности относится к разряду так называемых дифференциальных уравнений математической физики, для решения которых разработаны и классические, и приближенные методы решения. К классическим относят, например, метод разделения переменных и метод источников. По стройности и разработанности равноценным классическим методом является метод интегрального преобразования. В настоящее время широко используют приближенные методы, позволяющие получить инженерное решение практически для любой задачи. К приближенным относят метод конечных разностей (метод сеток) и метод аналогий (электро- и гидроаналогия).

**Метод разделения переменных.** Этот метод, разработанный Фурье, в применении к однородным задачам теплопроводности состоит в том, что находится совокупность частных решений уравнения (3.1), которые затем, как уже упоминалось, суммируются:

$$T = C_1 T_1 + C_2 T_2 + \dots = \sum_{i=1}^{i=\infty} C_i T_i. \quad (3.2)$$

Правомерность применения принципа суперпозиции (наложения) для бесконечного ряда, так же как и возможность его почленного дифференцирования и интегрирования, доказывается в литературе по математической физике.

Решение уравнения (3.1) представляют в виде произведения двух функций, одна из которых —  $T(\tau)$  — зависит только от времени, а другая —  $\Psi(x, y, z)$  — только от координат, т. е.

$$T = CT(\tau)\Psi(x, y, z), \quad (3.3)$$

где  $C$  — произвольная постоянная.

Раздел II

# **КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССООБМЕН**

## Основные положения учения о конвективном теплообмене

---

---

### 4.1. Основные понятия и определения

**Конвективным теплообменом** называется передача теплоты при движении жидкости. В реальных условиях конвекция теплоты всегда сопровождается молекулярным переносом теплоты, а иногда и лучистым теплообменом.

Конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью ее раздела с другой средой (твердым телом, жидкостью или газом) называется **теплоотдачей**.

Конвективный теплообмен при движении жидкости под действием неоднородного поля массовых сил (гравитационного, магнитного, электрического) называется **свободной конвекцией**.

Конвективный теплообмен при движении жидкости под действием внешних сил, приложенных на границах системы, или под действием однородного поля массовых сил, приложенных к жидкости внутри системы, или за счет кинетической энергии, сообщенной жидкости вне системы, называется **вынужденной конвекцией**.

Процесс теплоотдачи является **стационарным**, если поле температур в жидкости не зависит от времени, и **нестационарным**, если распределение температур в потоке зависит от времени.

В большинстве практических случаев, рассматриваемых теорией конвективного теплообмена, характерные размеры области течения жидких сред намного больше длины свободного пробега молекул, что позволяет считать жидкие среды непрерывными. Исключение представляет процесс теплоотдачи разреженному газу, когда размеры тела становятся соизмеримыми с длиной свободного пробега молекул. Поэтому в дальнейшем распределение температуры в потоке жидкости будет приниматься в виде непрерывного поля, для которого остаются в силе понятия о градиенте температуры  $\text{grad } t$  и векторе плотности теплового потока  $q$ .

Основной задачей теории конвективного теплообмена является установление связи между плотностью теплового потока на поверхности теплообмена, температурой этой поверхности и температурой жидкости. В непосредственной близости к поверхности теплообмена существует неподвижный слой жидкости, через который теплота передается только путем теплопроводности.

В соответствии с гипотезой Фурье плотность теплового потока

$$q_{\text{ст}} = -\lambda_{\text{ж}} \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{n=0}. \quad (4.1)$$

Из этого уравнения следует, что для определения плотности теплового потока на стенке необходимо знать распределение температуры в потоке жидкости.

Уже первые опыты по конвективному теплообмену показали, что во многих случаях плотность теплового потока пропорциональна разности температур между жидкостью и поверхностью тела (закон теплоотдачи Ньютона):

## Основы теории подобия и размерностей

---

### 5.1. Значение теории подобия для теории теплообмена

Изучить явление — это значит установить зависимость между величинами, характеризующими это явление. Конвективный теплообмен — весьма сложное явление, которое описывается системой дифференциальных уравнений, состоящей в общем случае из уравнений теплоотдачи, энергии, движения, неразрывности, диффузии и состояния. Дифференциальные уравнения отражают лишь самые общие черты явления, в них отсутствуют индивидуальные признаки конкретного единичного случая. Выделение конкретного случая из общего класса явлений конвективного теплообмена осуществляется дополнением системы уравнений условиями однозначности. Таким образом, система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена и условия однозначности составляют математическое описание конкретного случая теплообмена.

В результате решения системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена совместно с условиями однозначности получаем зависимости распределения скоростей, температур и концентраций от координат и времени. Используя формулу (4.3), находим зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от времени  $\tau$ , координат  $x, y, z$ , точки поверхности и величин  $\rho, c_p, \mu, \lambda$  и других параметров, входящих в условия однозначности, т.е.

$$\alpha = f(\tau, x, y, z, \rho, c_p, \mu, \lambda, T, l, \dots).$$

Именно эта зависимость и представляет наибольший практический интерес при инженерных расчетах процессов теплообмена.

Ввиду чрезвычайной сложности системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена и условий однозначности, содержащих большое число переменных, ее аналитическое решение не может быть получено в общем случае. Эти уравнения могут быть решены в отдельных частных случаях при существенных упрощающих предположениях.

Если аналитически решить задачу невозможно, то зависимость для коэффициента теплоотдачи можно найти либо численным методом с большим объемом вычислений на электронных вычислительных машинах, либо с помощью экспериментального исследования. Различаясь способом получения искомых величин, оба этих метода практически равноценны по возможностям при определении зависимости между величинами. Каждое отдельное численное решение, так же как и любой отдельный эксперимент, дает одно конкретное значение искомой величины — коэффициента теплоотдачи — при заданных вполне определенных значениях исходных аргументов. Для того чтобы найти зависимость коэффициента теплоотдачи хотя бы от одного из аргументов, необходимо провести множество экспериментов или выполнить множество численных решений при различных значениях данного аргумента, оставляя другие неизменными. Для найденного ряда чисел можно затем подобрать подходящую эмпирическую формулу, связывающую коэффициент теплоотдачи с аргументами.

## Конвективный теплообмен при вынужденном течении жидкости

---

---

### 6.1. Основы теории пограничного слоя

#### 6.1.1. Особенности течения вязкой жидкости при больших числах $Re$ . Пограничный слой

При движении жидкости с большим числом  $Re$  влияние вязкости проявляется неодинаково в непосредственной близости от обтекаемой поверхности и вдали от нее.

Вблизи поверхности в результате прилипания жидкости к твердой стенке возникают существенные поперечные градиенты скорости и, как следствие, значительные касательные напряжения. По мере удаления от стенки изменение продольной скорости по нормали к поверхности тела уменьшается и действие сил вязкости становится исчезающе малым уже на сравнительно небольшом расстоянии от стенки.

Таким образом, при движении жидкости с большим числом  $Re$  весь поток может быть разбит на две области: область динамического *пограничного слоя*, где влияние вязкости существенно, и внешнюю область *потенциального течения*, где влияние вязкости пренебрежимо мало. Чем больше число  $Re$  потока, тем больше относительное значение сил инерции по сравнению с силами вязкости и тем тоньше пограничный слой и, наоборот, с возрастанием роли сил вязкости происходит утолщение пристенной области течения.

Деление потока на две указанные области значительно упрощает анализ течения в целом, так как позволяет рассматривать каждую из них в отдельности. Кроме того, во внешней области силы инерции преобладают над силами вязкого трения, поэтому для описания движения можно пользоваться уравнениями идеальной жидкости.

Математическое описание движения жидкости в пограничном слое также значительно упрощается, а полученные приближенные уравнения поддаются интегрированию.

Раздельный анализ упрощенных уравнений с последующим смыканием полученных решений для пограничного слоя и потенциального течения позволяет аналитически получить все необходимые характеристики потока в целом.

Если между потоком жидкости и поверхностью тела происходит теплообмен или диффузия, то по аналогии с динамическим пограничным слоем вблизи поверхности обтекаемого тела образуется тепловой или диффузионный пограничный слой, т. е. область в непосредственной близости от стенки, в которой температура или концентрация примеси изменяется от значения у стенки до соответствующего значения во внешнем потоке.

В пограничном слое скорость, температура и концентрация примеси асимптотически приближаются к своим значениям в потенциальном потоке, поэтому за

## Глава 7

# Теплообмен при естественной конвекции

---

### 7.1. Теплообмен при естественной конвекции в большом объеме

#### 7.1.1. Общие положения

Естественная конвекция возникает в поле внешних массовых сил, которые могут иметь различную природу. В частном случае полем внешних массовых сил может быть гравитационное поле Земли. Этот случай широко распространен и носит название тепловой гравитационной конвекции.

Гравитационное поле Земли влияет на движение жидкости только при наличии в потоке свободных поверхностей или неоднородного распределения плотности. При отсутствии свободных поверхностей и однородном распределении плотности сила тяжести, действующая на элемент объема, выделенный в жидкости, уравновешивается архимедовой силой и ее можно не принимать во внимание.

В общем случае при неоднородном распределении плотности действие силы тяжести не уравновешивается архимедовой силой. В отличие от вынужденных конвективных течений, появление которых обусловлено внешними причинами, свободные или естественные конвективные течения возникают исключительно под действием разности плотностей, связанной с неоднородностью температурного поля в жидкости или газе.

Действие внешних массовых сил в уравнениях движения вязкой жидкости (4.49) учитывается членами  $\rho g_x$ ,  $\rho g_y$  и  $\rho g_z$ , где  $\rho$  — плотность жидкости, в общем случае зависящая от температуры и давления, а  $g_x$ ,  $g_y$  и  $g_z$  — проекции вектора ускорения поля массовых сил на оси координат. При дальнейшем изложении под полем внешних массовых сил будем подразумевать гравитационное поле Земли.

В этом случае сила тяжести  $F$ , действующая на единицу массы, равна ускорению свободного падения  $g$ .

Для того чтобы ввести в уравнение движения подъемную силу, преобразуем первые два члена, стоящие в правой части уравнений (6.50). Для уравнения, записанного в проекции на ось  $x$ , получим

$$\rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} = (\rho - \rho_0)g_x - \left( \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_0 g_x \right), \quad (7.1)$$

где  $F_x$  — проекция силы тяжести на ось  $x$ ;  $\rho_0$  — плотность при некоторой постоянной температуре  $T_0$  в какой-либо фиксированной точке потока.

Полагая, что изменения  $\rho$  и  $T$  малы по сравнению с их абсолютными значениями, можно принять

$$\rho - \rho_0 = -\beta\rho(T - T_0), \quad (7.2)$$

где  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$  — коэффициент объемного расширения жидкости (для идеального газа  $\beta = 1/T_{ж}$ ).

## Глава 8

# Теплоотдача при изменении агрегатного состояния вещества

---

---

### 8.1. Теплоотдача при конденсации паров

#### 8.1.1. Общие сведения о процессе

Теплоотдача при конденсации паров на охлаждаемой поверхности и при кипении жидкости сопровождается изменением агрегатного состояния вещества. Конденсация пара и кипение жидкости существенно влияют на интенсивность теплообмена.

Образование новой фазы на поверхности теплообмена усложняет процесс конвективного теплообмена и затрудняет применение аналитических подходов к решению задач.

Теплообмен при конденсации паров представляет собой сложное явление, связанное с одновременным переносом теплоты и массы (вещества) и изменением фазового состояния — переходом из газообразного в жидкое или твердое состояние.

Количество перенесенной массы определяется массой сконденсированного пара, а переданная теплота (при условии конденсации насыщенного пара) — теплотой парообразования.

Число факторов, влияющих на процесс передачи теплоты при конденсации, значительно больше, чем для случая теплообмена без изменения агрегатного состояния. Это создает дополнительные трудности. Например, если при теплообмене без изменения агрегатного состояния поверхность характеризуется только геометрией, то для теплообмена при конденсации не меньшее значение приобретает ее физико-химические свойства, причем их следует рассматривать не изолированно, а в сочетании с физико-химическими свойствами среды (жидкости, газа).

Учет всех факторов, влияющих на процесс теплообмена при конденсации, и их анализ трудны не только в теоретическом, но и в экспериментальном плане.

Необходимым условием конденсации пара, если он находится в докритическом состоянии, является наличие или зоны, или поверхности (стенки) с температурой, меньшей, чем температура насыщенного пара. В начальный момент соприкосновения пара с холодной поверхностью (стенкой) последняя покрывается мономолекулярным адсорбированным слоем, который в процессе конденсации растет и уплотняется либо при достижении определенной толщины (порядка 1 мкм) разрывается на множество мелких капель.

Первый вид конденсации, при котором на поверхности образуется сплошная устойчивая пленка, называется пленочной конденсацией; второй, когда идет процесс с образованием капелек, — капельной конденсацией.

Различие в характере взаимодействия поверхности с конденсатом обуславливается различием физико-химических свойств сред.

Если капля на поверхности твердого тела принимает форму, при которой краевой угол  $\theta$  является острым (рис. 8,1 а, в), то в этом случае считается, что

## Теплообмен излучением

---

### 9.1. Основные понятия и определения

Процессы теплопередачи можно подразделить на два типа. Первый определяется тем, что структурные элементы среды, находящейся на пути переноса теплоты, принимают участие в процессе переноса. Это уже рассмотренные теплопроводность и конвекция. Для процессов второго типа характерно то, что среда может не участвовать в переносе теплоты. Это тепловое излучение. Таким образом, между процессами теплопроводности и конвекции, с одной стороны, и тепловым излучением — с другой, существует принципиальное различие.

Конвективный перенос теплоты и теплопроводность рассматривались при непрерывном температурном поле и в тех случаях, когда теплота переходит от твердого тела к жидкости и наоборот. Температурный градиент всегда имел конечное значение, кроме случаев, когда был равен нулю.

Тепловое излучение — сложный процесс, связанный с тем, что, по крайней мере, дважды происходит преобразование энергии: сначала переход тепловой энергии в излучение электромагнитных волн (эмиссия), затем распространение волн (фотонов) в пространстве и, наконец, поглощение электромагнитных колебаний поглощающей средой или телом (абсорбция) и преобразование электромагнитной энергии в энергию теплового движения.

Тепловое излучение рассматривается как процесс распространения поперечных электромагнитных волн, испускаемых телом. Эти волны распространяются прямолинейно и при поглощении их каким-либо телом или средой вновь преобразуются в теплоту.

Электромагнитные колебания можно охарактеризовать длиной волны  $\lambda$  или частотой  $\nu$ , которые связаны между собой соотношением

$$\lambda \nu = c,$$

где  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме.

Носители тепловой лучистой энергии — электромагнитные волны — отличаются от соответствующих другим видам излучения волн только своей длиной. Действие излучения при его падении на вещество зависит от длины волны. Границы свойств по длине волны, мм, для различных видов излучения приведены ниже:

Космическое .....	$0,05 \cdot 10^{-9}$
$\gamma$ -излучение .....	$(0,5 \dots 10) \cdot 10^{-9}$
Рентгеновское .....	$10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-5}$
Ультрафиолетовое .....	$2 \cdot 10^{-5} \dots 0,4 \cdot 10^{-3}$
Видимое (световое) .....	$(0,4 \dots 0,8) \cdot 10^{-3}$
Тепловое .....	$0,8 \cdot 10^{-3} \dots 0,8$
Электромагнитное .....	$2 \cdot 10^5$

## Теплообменные аппараты

---

### 10.1. Классификация теплообменных аппаратов

*Теплообменным аппаратом* называется техническое устройство различного целевого назначения (нагрев и (или) охлаждение), в котором непрерывно или периодически во времени осуществляется теплообмен между двумя или несколькими теплоносителями либо между теплоносителем и твердыми телами (стенкой, насадкой).

Отметим, что роль теплоносителей и твердых тел, участвующих в теплообмене, может выполнять и среда, окружающая аппарат.

*Теплоноситель* — движущаяся среда, используемая для переноса теплоты. Теплоноситель, имеющий более высокую температуру и отдающий теплоту, называют *горячим* (нагревающий, охлаждаемый); теплоноситель, обладающий более низкой температурой и воспринимающий теплоту, — *холодным* (нагреваемый, охлаждающий).

Все теплообменные аппараты по принципу действия и особенностями передачи теплоты можно подразделить на две большие группы: поверхностные и контактные.

К поверхностным теплообменным аппаратам относят рекуперативные и регенеративные теплообменные аппараты. В *рекуперативных* теплообменных аппаратах нагревающая (охлаждаемая) и нагреваемая (охлаждающая) жидкости (теплоносители) протекают одновременно и теплота передается через разделяющую их стенку (паровые котлы, испарители, поверхностные конденсаторы, водяные экономайзеры и т. п.). Преимуществами рекуператоров является их герметичность и возможность работы при значительных разностях давления рабочих сред.

В регенеративном теплообменнике одна и та же поверхность теплообмена попеременно омывается то одним, то другим теплоносителем. В период нагрева поверхности теплообмена, называемой насадкой регенератора, происходит контакт с горячим теплоносителем и аккумулируется теплота, которая в период охлаждения отдается холодному теплоносителю, поэтому направление теплового потока в объеме аппарата периодически изменяется. В качестве насадки в таких аппаратах могут использоваться шары, кольца, гофрированные металлические поверхности, мелкоячеистая сетка, кирпичная кладка (например, в регенераторах мартеновских печей). Преимуществами таких аппаратов являются возможность размещения большой поверхности в единице объема (большая компактность) и работы при высоких температурах (в случае использовании насадки из теплоустойчивых материалов), недостатками — низкая степень герметичности, неизбежность перемешивания теплоносителей, невозможность работы при высоких давлениях рабочих сред.

В контактных теплообменных аппаратах передача теплоты происходит при непосредственном контакте горячего и холодного теплоносителей, при этом теплообмен сопровождается массообменом. В аппаратах смесительного типа

# Литература

---

## Основная

- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. М.: Энергия, 1981. 416 с.
- Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 520 с.
- Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.* Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
- Кутателадзе С.С., Стрыкович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.
- Петухов Б.С.* Теплообмен в движущейся однофазной среде. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 350 с.
- Суржиков С.Т.* Тепловое излучение газов и плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
- Теплотехника: учебник для вузов / под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. 4-е изд., перераб. и доп., М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 880 с.
- Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя: пер. с нем. М.: Наука, 1974. 712 с.
- Ягов В.В.* Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2014. 542 с.

## Дополнительная

- Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. 4-е изд. испр. и доп. М.: Наука, 1975. 888 с.
- Адрианов В.Н.* Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972. 452 с.
- Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П.* Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 463 с.
- Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
- Белов И.А., Кудрявцев Н.А.* Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоиздат, 1987. 222 с.
- Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.* Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 431 с.
- Бредиоу Л.* Турбулентность: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1980. 452 с.
- Бриджмен А.* Анализ размерностей: пер. с англ. Л.; М.: Гостехиздат, 1934. 283 с.
- Галин П.М., Кириллов П.Л.* Тепломассобмен (в ядерной энергетике). М.: Энергоиздат, 1987. 375 с.
- Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Теплообмен и тепловые испытания материалов конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
- Жужаускас А., Макарявичус В., Шланчаускас А.* Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. Вильнюс: Минтис, 1968. 189 с.
- Иевлев В.М.* Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. М.: Наука, 1975. 256 с.
- Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А.* Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 200 с.
- Карташев Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 1985. 480 с.
- Кейс В.М.* Конвективный тепло- и массообмен: пер. с англ. М.: Энергия, 1972. 440 с.
- Кириллов П.Л., Юрвев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат, 1984. 295 с.
- Кольман В.* Методы расчета турбулентных течений: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 622 с.
- Кутателадзе С.С.* Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982. 472 с.

*Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.* Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. 300 с.

*Лалин Ю.В.* Статистическая теория турбулентности (прошлое и настоящее краткий очерк идей). 2-е изд. // Науч.-техн. ведомости. 2004.

*Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа: учебник для вузов. 6-е изд., исправ. и доп. М.: Наука, 1987. 840 с.

*Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.

*Михеев М.А.* Основы теплопередачи. М.: Госэнергоиздат, 1956. 392 с.

*Новиков И.И.* Термодинамика. М.: Машиностроение, 1984. 592 с.

*Новиков И.И., Воскресенский К.Д.* Прикладная термодинамика и теплопередача. М.: Атомиздат, 1977. 349 с.

Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: учебник для вузов / В.С. Авдуевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др. М.: Машиностроение, 1992. 519 с.

*Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

*Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А.* Тепломассообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. 470 с.

*Присняков В.Ф.* Кипение. Киев: Наук. думка, 1988. 238 с.

*Ратиани Г.В., Мествиришвили Ш.А., Шекриладзе И.Г.* Анализ двух случаев процесса испарения с поверхности тонких ламинарных пленок // Сообщ. АН ГССР. 1969. Т. 55, № 3. С.645—648.

*Романенко П.Н., Обливин А.Н., Семенов Ю.П.* Теплопередача. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 431 с.

*Ротта И.К.* Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1967. 232 с.

*Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 616 с.

*Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. СПб.: СПбГПУ, 2007. 202 с.

*Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.

*Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432 с.

*Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л.* Процессы генерации пара на электростанциях. М.: Энергия, 1969. 312 с.

Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок / Н.Д. Грязнов, В.М. Епифанов, В.Л. Иванов, Э.А. Манушин; под ред. А.И. Леонтьева. М.: Машиностроение, 1985. 360 с.

Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. М.: Машиностроение, 1985. 211 с.

*Федяевский К.К., Гиневский А.С., Колесников О.В.* Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. М.: Судостроение, 1973. 256 с.

*Шекриладзе И.Г., Жоржוליани Г.И.* Анализ процесса конденсации движущегося пара на горизонтальном цилиндре // ИФЖ. 1973. Т. 25, № 1. С.14—19.

*Шнейдер В.* Инженерные проблемы теплопроводности. М.: ИЛ, 1960. 478 с.

*Экерт Э.Р., Дрейк Р.М.* Теория тепло- и массообмена: пер. с англ. М.: Госэнергоиздат, 1961. 680 с.

*Юдаев Б.Н.* Техническая термодинамика. Теплопередача: учеб. для неэнергетич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1988. 479 с.

*Rreith F., Bohn M.S.* Principles of Heat Transfer. New York: Harper, Row Publishers, 1986. 700 p.

*Patanar S.V.* Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer. Innovative Research, Inc. USA, 1991. 350 p.

# Приложения

---

---

## I. Перевод некоторых единиц физических величин в единицы СИ

Сила	1 дин = $10^{-5}$ Н
Давление	1 кгс/см <sup>2</sup> = 98 066 Па 1 мм рт. ст. = 133,332 Па 1 бар = $10^5$ Па
Работа	1 кгс · м = 9,80665 Дж
Энергия	1 кВт · ч = 3600 кДж 1 л.с. · ч = 2650 кДж
Количество теплоты	1 кал = 4,1868 Дж
Тепловой поток	1 ккал/ч = 1,163 Вт
Плотность теплового потока	1 ккал/(ч · м <sup>2</sup> ) = 1,163 Вт/м <sup>2</sup>
Энтальпия, теплота парообразования	1 ккал/кг = 4,1868 кДж/кг
Теплоемкость	1 ккал/(кг · К) = 4,1868 кДж/(кг · К)
Динамическая вязкость	1 кгс · с/м <sup>2</sup> = 9,80665 Па · с
Теплопроводность	1 ккал/(м · ч · °С) = 1,163 Вт/(м · К)
Коэффициент теплопередачи (теплоотдачи)	1 ккал/(м <sup>2</sup> · ч · °С) = 1,163 Вт/(м <sup>2</sup> · К)
Коэффициент теплового излучения	1 ккал/(м <sup>2</sup> · ч · К <sup>4</sup> ) = 1,163 Вт/(м <sup>2</sup> · К <sup>4</sup> )

## II. Перевод единиц физических величин из британской системы единиц измерения в другие

Длина	1 yd (yard) = 3 ft (feet) = 36 in (inches) = 0,9144 м;
Площадь	1 in = 0,254 м; 1 ft = 0,3048 м
	1 yd <sup>2</sup> = 0,836 м <sup>2</sup> ; 1 ft <sup>2</sup> = 0,0929 м <sup>2</sup> ;
	1 in <sup>2</sup> = 6,452 см <sup>2</sup>
Объем	1 ft <sup>3</sup> = 0,02832 м <sup>3</sup> ; 1 in <sup>3</sup> = 16,39 см <sup>3</sup> ;
	1 gal (gallon) = 3,785 · 10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup>
Масса	1 Sh ton (short ton) ≈ 907,184 кг;
	1 ton ≈ 1016,05 кг;
	1 lb = 0,4536 кг;
	1 oz = 28,35 г
Удельный объем	1 ft <sup>3</sup> /lb ≈ 0,06243 м <sup>3</sup> /кг
Плотность	1 lb/ft <sup>3</sup> ≈ 16,0185 кг/м <sup>3</sup> ;
	1 oz/ft <sup>3</sup> ≈ 1,0 кг/м <sup>3</sup>
	1 lbf/ft <sup>2</sup> ≈ 47,88 Па;
Давление	1 lbf/in <sup>2</sup> ≈ 6,895 кПа
	1 lb/ft <sup>2</sup> = 47,88 Па · с
Динамическая вязкость	1 ft <sup>2</sup> /s = 0,0929 м <sup>2</sup> /с
Кинематическая вязкость	1 st = 1 см <sup>2</sup> /с = 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с
Температура	$t \text{ } ^\circ\text{F} + 459,67/1,8 = T \text{ } ^\circ\text{K}$
	$t \text{ } ^\circ\text{F} - 32/1,8 = t \text{ } ^\circ\text{C}$
	$T \text{ } ^\circ\text{R}/1,8t \text{ } ^\circ\text{C} = T \text{ } ^\circ\text{R}/1,8 - 273,15 = T \text{ } ^\circ\text{K}$
Количество теплоты	1 Btu (British thermal unit) ≈ 0,252 ккал ≈ 1,055 кДж
	1 PCU (pound centigrat unit) ≈ 1,8 Btu ≈ 0,4536 ккал ≈ 1,9 кДж

Плотность теплового потока	$1 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) \approx 2,71 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) \approx$ $\approx 3,154 \text{ Вт}/\text{м}^2;$ $1 \text{ PCU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) = 4,878 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) =$ $= 5,675 \text{ Вт}/\text{м}^2$
Теплоемкость	$1 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = 1,0 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) =$ $= 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$
Теплопроводность	$1 \text{ Btu}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 1,488 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) =$ $= 1,73 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ $1 \text{ Btu}/(\text{in} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 17,88 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) =$ $= 20,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ $1 \text{ Btu}/(\text{in} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) =$ $= 0,124 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) = 0,144 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$
Коэффициент теплопередачи (теплоотдачи)	$1 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 4,822 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) =$ $= 5,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ $1 \text{ PCU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) =$ $= 4,878 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$

### III. Плотность $\rho$ , теплопроводность $\lambda$ , теплоемкость $c_p$ и температуропроводность $a$ различных материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$c_p,$ $\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$a \cdot 10^6,$ $\text{ м}^2/\text{с}$
<i>Изоляционные, строительные и другие материалы</i>					
Асбест:					
листовой	30	770	0,1163	0,1818	0,198
волокно	50	470	0,1105	0,818	0,290
Асфальт	20	2110	0,698	2,09	0,159
Бетон	20	2300	1,280	1,13	0,494
Войлок шерстяной	30	330	0,0524	—	—
Гипс	—	1650	0,291	0,88	—
Глина огнеупорная	450	1845	1,04	1,09	0,516
Гравий	20	1840	0,361	—	—
Дерево:					
бальза	30	128	0,0524	—	—
дуб*	20	800	<u>0,207</u> 0,363	<u>1,76</u> —	<u>0,147</u> —
сосна*	20	448	<u>0,107</u> 0,256	<u>2,7</u> —	— —
Земля:					
сухая	—	1500	0,1385	—	—
влажная	—	1700	0,658	2,01	0,192
Картон гофрированный	—	—	0,064	—	—
Золонит	100	200	0,099	—	—
Кварц кристаллический: перпендикулярно оси	0	2500...2800	7,21	0,836	3,34

Продолжение прил. III

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
параллельно оси	0	2500...2800	13,6	—	—
Кирпич:					
изоляцияонный	100	550	0,1395	—	—
строительный	20	800...1500	0,23...0,3	0,8	—
карборундовый	—	1000	11,3	0,678	1,66
Клинкер	30	1400	0,163	0,42	0,114
Кожа подошвенная	30	1000	0,160	—	—
Кокс порошкообразный	100	449	0,191	1,22	0,035
Лед	0	920	2,25	2,26	1,08
	-95	—	3,96	1,17	—
Линолеум	20	1180	0,186	—	—
Мел	50	2000	0,93	0,88	0,531
Минеральная шерсть	50	200	0,0465	0,92	0,253
Мрамор	90	2700	1,31	0,419	1,15
Накипь котельная	65	—	0,13...3,14	—	—
Опилки древесные	20	200	0,070	—	—
Парафин	20	920	0,268	—	—
Песок:					
сухой	20	1500	0,326	0,798	2,73
влажный	20	1650	1,130	2,09	0,492
Портландцемент	30	1900	0,303	1,13	0,140
Пробка:					
пластина	30	190	0,0420	1,88	0,117
гранулированная	20	45	0,0384	—	—
Резина	0	0,163	1,38	0,098	—
Сахар (песок)	0	1600	0,582	1,26	0,278
Сланец	100	2800	1,49	—	—
Слюда	—	290	0,582	0,88	2,280
Снег	—	560	0,465	2,09	0,398
Совелит	100	450	0,0976	—	—
Стекловата	200	2500	0,745	0,67	0,445
Стеклояная вата	0	200	0,0372	0,67	0,278
Торфоплита	50	220	0,064	—	—
Уголь каменный	20	1400	0,186	1,31	1,03
Фарфор	95	2400	1,035	1,09	0,398
	1055	2400	1,97	—	—

## Окончание прил. III

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
Фибра (пластина)	20	240	0,049	—	—
Фольга алюминиевая	50	20	0,04665	—	—
Шлакобетон в куске	—	2150	0,43	0,88	0,495
Шлаковата	100	250	0,47	—	—
Штукатурка	20	1680	0,78	—	—
Целлулоид	30	1400	0,210	—	—
Целотекс	20	215	0,0465	—	—
<i>Металлы</i>					
Алюминий	0	2670	204,0	0,92	91,3
Бронза	20	8000	64,0	0,381	20,8
Латунь	0	8600	85,5	0,378	26,4
Медь	0	8800	384,0	0,381	114,5
Никель	20	9000	58,2	0,462	14,01
Олово	0	7230	64,0	0,921	39,2
Ртуть	0	13 600	4,9	0,138	4,25
Свинец	0	11 400	34,9	0,129	23,6
Серебро	0	10 500	458,0	0,234	186,5
Сталь	20	7900	45,4	0,462	12,5
Цинк	20	7000	116,3	0,394	42,3
Чугун	20	7220	63,0	0,504	17,4
* В числителе — перпендикулярно волокнам, в знаменателе — параллельно волокнам.					

#### IV. Физические свойства некоторых твердых тел (элементов) при $t = 0 ^\circ\text{C}$

Элемент	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$c, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$
Алюминий	2700	209	0,896
Ванадий	5900	34,9	0,494
Висмут	9830	9,4	0,121
Вольфрам	19 340	169	0,134
Железо	7880	74	0,44
Золото	19 310	313	0,130
Калий	870	100	0,737
Литий	534	68,6	3,31

Окончание прил. IV

Элемент	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)
Магний	1760	158	0,975
Медь	8930	390	0,388
Молибден	10 200	141	0,252
Натрий	975	109	1,200
Никель	8900	67,5	0,427
Олово	7300	66,3	0,222
Платина	21 460	69,8	0,132
Свинец	11 350	35,1	0,127
Серебро	10 500	419	0,234
Сурьма	6690	18,8	0,205
Титан	4540	15,1	0,531
Углерод (графит)	(1700 ... 2300)	174	0,670
Уран	19 100	19,2	0,117
Хром	7150	69,8	0,448
Цинк	7150	113	0,384

### V. Физические свойства некоторых сталей и сплавов при $t = 20 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)	$a \cdot 10^5$ , м <sup>2</sup> /с
Алюминиевые сплавы	2800	163,0	1,13	5,15
Бронза	8800	48,2	0,368	1,49
Латунь	8500	109,0	0,392	3,27
Магниевые сплавы	1780	79,1	0,98	4,53
Сталь 20	7830	5160	0,494	1,32
Сталь 45	7830	47,8	0,490	1,25
Сталь 12X18H10T	7860	16,3	0,494	0,42
Титановые сплавы	4460	8,7	0,524	0,372

## VI. Физические свойства сухого воздуха при $p = 1013$ ГПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$c_p,$ кДж/(кг · °C)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м · °C)	$\mu \cdot 10^6,$ Па · с	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	12,7	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	13,8	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	14,9	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	16,2	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	17,4	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	18,8	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	20,0	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	21,4	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	22,9	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	24,3	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	25,7	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	27,2	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	28,6	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	30,2	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	31,9	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	33,6	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	36,8	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	40,3	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	43,9	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	47,5	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	51,4	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	61,0	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	71,6	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	81,9	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	93,1	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	115,3	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	138,3	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	163,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	188,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	216,2	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	245,9	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	276,2	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	316,5	0,714

## VII. Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
100	0,1013	2,372	11,97	20,02	18,580	1,08
110	0,1430	2,489	12,46	15,07	13,830	1,09
120	0,1980	2,593	12,85	11,46	10,500	1,09
130	0,2700	2,686	13,24	8,850	7,9720	1,11
140	0,3610	2,791	13,54	6,890	6,1300	1,12
150	0,4760	2,884	13,93	5,470	4,7280	1,16
160	0,6180	3,012	14,32	4,390	3,7220	1,18
170	0,7920	3,128	14,72	3,570	2,9390	1,21
180	1,0030	3,268	15,11	2,930	2,3390	1,25
190	1,2550	3,419	15,60	2,440	1,8720	1,30
200	1,5550	3,547	15,99	2,030	1,4920	1,36
210	1,9080	3,722	16,38	1,710	1,2140	1,41
220	2,3200	3,896	16,87	1,450	0,9830	1,47
230	2,7980	4,094	17,36	1,240	0,8060	1,54
240	3,3480	4,291	17,76	1,060	0,6580	1,61
250	3,9780	4,512	18,25	0,913	0,5440	1,68
260	4,6940	4,803	18,84	0,794	0,4530	1,75
270	5,5050	5,106	19,32	0,688	0,3780	1,82
280	6,4190	5,489	19,91	0,600	0,3170	1,90
290	7,4450	5,827	20,60	0,526	0,2610	2,01
300	8,5920	6,268	21,29	0,461	0,2160	2,13
310	9,8700	6,838	21,98	0,403	0,1760	2,29
320	11,290	7,513	22,86	0,353	0,1410	2,50
330	12,865	8,257	23,94	0,310	0,1080	2,86
340	14,608	9,304	25,21	0,272	0,0811	3,35
350	16,537	10,70	26,58	0,234	0,0580	4,03
360	18,674	12,79	29,14	0,202	0,0396	5,23
370	21,053	17,10	33,75	0,166	0,0150	11,10

## VIII. Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$\beta \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	$\mu \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$	Pr	$\nu \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$
0,01	0,00061	—	4,218	55,13	1785,5	13,67	1,0002
10	0,0123	0,7	4,193	57,45	1304,4	9,52	1,0004
20	0,00234	1,82	4,182	59,9	1003,5	7,02	1,0018
30	0,00424	3,21	4,178	61,8	800,7	5,42	1,0044
40	0,00738	3,87	4,179	63,4	652,7	4,31	1,0079
50	0,01234	4,49	4,181	64,8	548,8	3,54	1,0121
60	0,01992	5,11	4,184	65,9	469,4	2,98	0,0171
70	0,03177	5,7	4,189	66,8	405,7	2,55	1,0228
80	0,04736	6,32	4,196	67,5	354,8	2,21	1,0290
90	0,07011	6,95	4,205	68,0	314,6	1,95	1,0359
100	0,10132	7,52	4,217	68,3	282,2	1,75	1,0435
110	0,14326	8,08	4,230	68,5	258,7	1,60	1,0515
120	0,19854	8,64	4,245	68,6	237,6	1,47	1,0603
130	0,27011	9,19	4,264	68,6	217,6	1,36	1,0697
140	0,3614	9,72	4,286	68,5	200,9	1,26	1,0798
150	0,4760	10,3	4,311	68,4	186,2	1,17	1,0906
160	0,6180	10,7	4,340	66,3	173,5	1,10	1,1021
170	0,7920	11,3	4,372	67,9	162,7	1,04	1,1144
180	1,0027	11,9	4,409	67,5	152,9	1,00	1,1275
190	1,2553	12,6	4,451	67,5	144,1	0,96	1,1415
200	1,5551	13,3	4,498	66,3	136,2	0,93	1,1565
210	1,9080	14,1	4,552	65,5	130,3	0,91	1,1726
220	2,3201	14,8	4,614	64,5	124,5	0,89	1,1900
230	2,7979	15,9	4,686	63,7	119,6	0,88	1,2087
240	3,3480	16,8	4,769	62,8	114,7	0,87	1,2291
250	3,9776	18,1	4,866	61,8	108,8	0,86	1,2512
260	4,694	19,7	4,981	60,5	105,8	0,87	1,2755
270	5,505	21,6	5,118	59,0	101,9	0,88	1,3023
280	6,419	23,7	5,28	57,5	98,0	0,90	1,3321
290	7,445	26,2	5,49	55,8	94,1	0,93	1,3655
300	8,592	29,2	5,75	54,0	91,1	0,97	1,4036
310	9,870	32,9	6,10	52,3	88,2	1,03	1,4470
320	11,290	38,2	6,56	50,6	85,3	1,11	1,4990
330	12,865	43,3	7,21	48,4	81,3	1,22	1,5620
340	14,608	53,4	8,16	45,7	77,4	1,39	1,6390
350	16,537	66,8	9,80	43,0	72,5	1,60	1,7410
360	18,674	109,0	13,98	39,5	66,6	2,35	1,8940
370	21,053	264,0	40,32	33,7	56,8	6,79	2,2200

### IX. Теплофизические свойства водяного пара на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$\rho_{\text{п}}, \text{кг/м}^3$	$i_{\text{ж}}, \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$
100	0,1013	0,598	2675,9	2256,8	2,135
110	0,143	0,826	2691,4	2230,0	2,177
120	0,198	1,121	2706,5	2202,8	2,206
130	0,270	1,496	2720,7	2174,3	2,257
140	0,361	1,966	2734,1	2145,0	2,315
150	0,476	2,547	2746,7	2114,3	2,395
160	0,618	3,258	2758,0	2082,6	2,479
170	0,792	4,122	2768,9	2049,5	2,583
180	1,003	5,157	2778,5	2015,2	2,709
190	1,255	6,397	2786,4	1978,8	2,856
200	1,555	7,862	2793,1	1940,7	3,023
210	1,908	9,588	2798,2	1900,5	3,199
220	2,320	11,62	2801,5	1857,8	3,408
230	2,798	13,99	2803,2	1813	3,634
240	3,348	16,76	2803	1766	3,881
250	3,978	19,98	2801	1716	4,157
260	4,694	23,72	2796	1661	4,467
270	5,505	28,09	2709	1604	4,815
280	6,419	33,19	2780	1543	5,234
290	7,445	39,15	2766	1476	5,694
300	8,592	46,21	2749	1404	6,280
310	9,870	54,58	2727	1325	7,118
320	11,290	64,73	2700	1238	8,206
330	12,865	77,10	2666	1140	9,881
340	14,608	92,76	2622	1027	12,35

### X. Физические свойства дымовых газов при $p = 0,1 \text{ МПа}$ , $g_{\text{CO}_2} = 0,13$ , $g_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11$ , $g_{\text{N}_2} = 0,76$

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,295	1,042	2,28	15,8	12,20	16,19	0,72
100	0,950	1,068	3,13	20,4	21,54	30,80	0,69
200	0,748	1,097	4,01	24,5	32,80	48,90	0,67
300	0,617	1,122	4,84	28,2	45,81	69,90	0,65

Окончание прил. X

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
400	0,525	1,151	5,70	31,8	60,38	94,3	0,64
500	0,457	1,185	6,56	34,8	76,30	121,1	0,63
600	0,405	1,214	7,42	37,9	93,61	150,9	0,62
700	0,363	1,239	8,27	40,7	112,1	183,8	0,61
800	0,330	1,264	9,15	43,4	131,8	219,7	0,60
900	0,301	1,290	10,00	45,9	152,5	258,0	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	48,4	174,3	303,4	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	50,7	197,1	345,5	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	53,0	221,0	392,4	0,56

### XI. Физические свойства масла МК в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\mu \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$	Pr
10	911,0	1,645	0,1510	35414	3833	9,94	8,56	39000
20	903,0	1,712	0,1485	18560	1514	9,58	8,64	15800
30	894,5	1,758	0,1461	6180	691,2	9,28	8,71	7450
40	887,5	1,804	0,1437	3031	342,0	8,97	8,79	3810
50	879,0	1,851	0,1413	1638	186,2	8,69	8,86	2140
60	871,5	1,897	0,1389	961,4	110,6	8,39	8,95	1320
70	864,0	1,943	0,1363	603,3	69,3	8,14	9,03	858
80	856,0	1,989	0,1340	399,3	46,6	7,89	9,12	591
90	848,2	2,035	0,1314	273,7	32,3	7,61	9,20	424
100	840,7	2,081	0,1290	202,1	24,0	7,33	9,28	327
110	838,0	2,127	0,1264	145,2	17,4	7,11	9,37	245
120	825,0	2,173	0,1240	110,4	13,4	6,92	9,46	193,5
130	817,0	2,219	0,1214	87,31	10,7	6,69	9,54	160,0
140	809,2	2,265	0,1188	70,34	8,7	6,53	9,65	133,3
150	801,6	2,311	0,1168	56,90	7,10	6,25	9,73	113,5

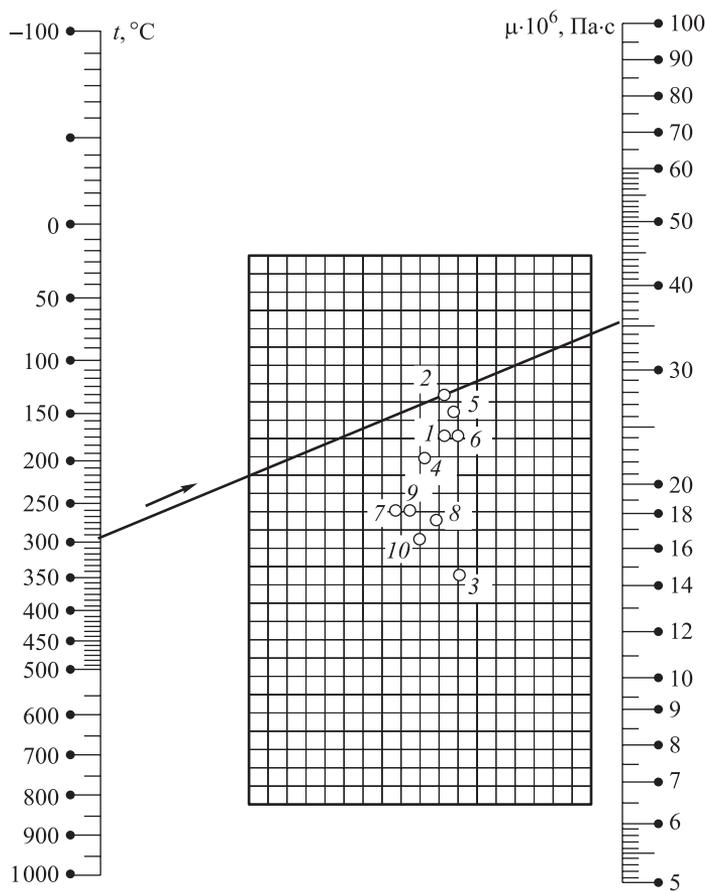
## XII. Степень черноты полного нормального излучения для различных материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
<i>Металлы и сплавы</i>		
Алюминий:		
полированный	50...500	0,04...0,06
с шероховатой поверхностью	20...50	0,06...0,07
Бронза:		
полированная	50	0,1
пористая шероховатая	50...150	0,55
Вольфрам	200	0,05
	600...1000	0,1...0,16
	1500...2200	0,24...0,31
Железо оцинкованное листовое блестящее	30	0,23
Жесть белая старая	20	0,28
Золото, тщательно полированное	200...600	0,02...0,03
Латунь:		
полированная	200	0,03
листовая прокатная	20	0,06
Медь:		
полированная	50...100	0,02
окисленная	500	0,88
Металлическая поверхность смоченная	20	0,98
Молибден	1500...2200	0,19...0,26
Молибденовая нить	700...2500	0,1...0,3
Никелевая проволока	200...1000	0,1...0,2
Нихромовая проволока чистая	50	0,65
Платиновая проволока	50...200	0,06...0,07
	1400	0,18
Ртуть чистая	0...100	0,09...0,12
Серебро чистое полированное	200...600	0,02...0,03
Сталь:		
листовая шлифованная	950...1100	0,55...0,61
с плоской шероховатой поверхностью	50	0,56
Стальное литье полированное	750...1050	0,52...0,56
Хром полированный	50...1000	0,28...0,38
Цинк листовой	50	0,2
Чугунное литье	50	0,81

Окончание прил. XII

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
<i>Неметаллы</i>		
Асбестовый картон	20	0,96
Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
Кирпич красный	20	0,88...0,93
Лак:		
черный матовый	40...100	0,96...0,98
белый	40...100	0,8...0,95
Резина мягкая серая шероховатая	20	0,86
Сажа:		
с жидким стеклом	20...200	0,96
нанесенная на твердую поверхность	50...1000	0,96
Снег	—	0,96
Стекло	250...1000	0,87...0,72
	1100...1500	0,7...0,67
Угольная нить	1000...1400	0,53
Шеллак черно-матовый	75...150	0,91
Шлаки котельные	0...100	0,97...0,93
	200...500	0,89...0,78
	600...1200	0,76...0,70
	1400...1800	0,69...0,67
Эмаль белая	20	0,9

### XIII. Расчет динамической вязкости газов при атмосферном давлении



*Учебное издание*

**Исаев** Сергей Иванович  
**Кожин** Иван Александрович  
**Кофанов** Вячеслав Иванович  
**Леонтьев** Александр Иванович  
**Мионов** Борис Михайлович  
**Никитин** Виктор Михайлович  
**Петражицкий** Григорий Борисович  
**Хвостов** Виктор Иванович  
**Чукаев** Алексей Георгиевич  
**Шишов** Евгений Викторович  
**Школа** Виктор Васильевич

## **Теория тепломассообмена**

Редактор *Н.А. Фетисова*  
Технический редактор *Э.П. Кулакова*  
Художник *Я.М. Асинкритова*  
Компьютерная верстка *Ю.В. Калининцевой*

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 28.09.2017. Формат 70 × 100 1/16. Усл. печ. л. 37,7.  
Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
baumanprint@gmail.com