

В. М. БОРОВКОВ, А. А. КАЛЮТИК, В. В. СЕРГЕЕВ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Учебник

Рекомендовано

*Федеральным государственным учреждением
«Федеральный институт развития образования» (ФГУ «ФИРО»)
в качестве учебника для использования в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы
среднего профессионального образования по специальности
140102 «Теплоснабжение и теплотехническое оборудование»*

Регистрационный номер рецензии 131 от 28 апреля 2011 г. ФГУ «ФИРО»

2-е издание, исправленное



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 621.1(075.32)

ББК 31.3я723

Б831

Рецензенты:

проф. кафедры теплотехники и теплоэнергетики Северо-Западного государственного заочного технического университета, канд. техн. наук *Н. Т. Амосов*

Боровков В. М.

Б831 Теплотехническое оборудование : учебник для студ. учреждений средн. проф. образования / В. М. Боровков, А. А. Калютик, В. В. Сергеев. — 2-е изд., испр. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 192 с.

ISBN 978-5-7695-9887-6

Рассмотрены устройство, принципы действия, основные параметры и характеристики теплотехнического оборудования. Приведена конструкция рекуперативных теплообменных аппаратов непрерывного и периодического действия, регенеративных теплообменных аппаратов, выпарных, дистилляционных, ректификационных, а также сушильных установок. Содержатся необходимые сведения о теплообменных аппаратах со смешиванием теплоносителей, трансформаторах теплоты и холодильных установках.

Учебник может быть использован при освоении профессиональных модулей ПМ.01 «Эксплуатация, расчет и выбор теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения», ПМ.02 «Технология ремонта теплотехнического оборудования и оборудования систем тепло- и топливоснабжения» по специальности 140102 «Теплоснабжение и теплотехническое оборудование».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезен специалистам, занимающимся эксплуатацией теплотехнического оборудования и тепловых сетей.

УДК 621.1(075.32)

ББК 31.3я723

Учебное издание

**Боровков Валерий Михайлович, Калютик Александр Антонович,
Сергеев Виталий Владимирович**

Теплотехническое оборудование

Учебное пособие

2-е издание, исправленное

Редактор *Н. Е. Овчеренко*. Технический редактор *Н. И. Горбачёва*

Компьютерная верстка: *Р. Ю. Волкова*. Корректор *А. П. Сизова*

Изд. № 102114026. Подписано в печать 06.03.2013. Формат 60×90/16. Гарнитура «Ньютон». Печать офсетная. Бумага офсет. № 1. Усл.-печ. л. 12,0. Тираж 1000 экз. Заказ №

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1. Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16067 от 06.03.2012.

Отпечатано с электронных носителей издательства.

ОАО «Тверской полиграфический комбинат», 170024, г. Тверь, пр-т Ленина, 5.

Телефон: (4822) 44-52-03, 44-50-34. Телефон/факс: (4822) 44-42-15.

Home page — www.tverpk.ru Электронная почта (E-mail) — sales@tverpk.ru

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Боровков В. М., Калютик А. А., Сергеев В. В., 2011

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011

ISBN 978-5-7695-9887-6

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время различные отрасли экономики Российской Федерации потребляют в виде теплоты примерно 70...80 % всей расходуемой энергии. Разнообразные процессы, связанные с потреблением теплоты без ее превращения в другие виды энергии, по назначению расходуемой теплоты можно отнести к двум основным категориям: потребление теплоты для коммунально-бытовых нужд (отопление, вентиляция, горячее водоснабжение) и потребление теплоты для технологических нужд. Первая категория в масштабе экономики страны является преобладающей. В настоящее время на долю коммунально-бытовых нужд приходится около 70 %, а на долю технологических нужд — только 30 % всего теплового потребления страны.

Теплообменный аппарат является одним из наиболее распространенных и важнейших элементов энергетических, коммунально-бытовых и технологических установок.

На теплообменные аппараты приходится значительная доля капиталовложений в энергетические, коммунально-бытовые и технологические установки. При строительстве тепловых электростанций капиталовложения в теплообменные аппараты составляют до 70 % капиталовложений на оборудование станций. На современных нефте- и газоперерабатывающих заводах капиталовложения в теплообменные аппараты достигают 40...50 %. На теплообменные аппараты расходуется также значительная часть эксплуатационных расходов энергетических, коммунально-бытовых и технологических установок. Амортизационные отчисления, расходы на обслуживание, осмотр и ремонт теплообменных аппаратов и установок в большинстве случаев выше, чем для оборудования других категорий.

Теплообменные аппараты, как и другие элементы энергетических, коммунально-бытовых и технологических установок, работают в условиях переменных режимов. Однако эксплуатационные, статические и динамические характеристики теплообменных аппаратов зависят не только от изменения расходных режимов и технологических параметров потоков, но и от таких факторов, как накопление загрязнений, накипи, сажи, смол на стенках труб, появление коррозии и т.д., которые в свою очередь зависят от времени. Поэтому расчет, проектирование, конструирование и эксплуатация теплотехнического оборудования должны проводиться с учетом большой сложности происходящих в нем процессов, а также значительного влияния параметров процесса теплообмена на технико-экономические показатели соответствующих установок.

Теплообменные аппараты имеют многообразное назначение. Вместе с тем они должны отвечать определенным общим требованиям, которые являются исходными при их проектировании. К этим требованиям относятся: высокая тепловая производительность и экономичность в работе; обеспечение заданных технологических условий процесса и высокого качества готового продукта (для технологических установок) обеспечение мер по защите окружающей среды; простота конструкции, дешевизна материалов и изготовления, компактность и малая масса аппарата; удобство монтажа, доступность и быстрота ремонта, надежность в работе, длительный срок службы; соответствие требованиям охраны труда, государственным стандартам, ведомственным нормам и правилам Ростехнадзора.

Учебник, предназначенный для учащихся энергетических и энергостроительных техникумов, написан в соответствии с программой курса «Теплотехническое оборудование». Его основной задачей является ознакомление будущих теплотехников с устройством аппаратуры, использующей теплоту, с основными физико-химическими процессами, происходящими в этой аппаратуре, а также с методами рационального выбора и проектирования типов и схем теплообменного оборудования. В книге рассмотрены различные промышленные теплообменные установки без привязки к отраслям промышленности, в которых они нашли применение, что позволило выполнить классификацию и применить единые методы тепловых расчетов.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

1.1. Классификация теплообменных аппаратов

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называют устройства, предназначенные для обмена теплотой между греющей и обогреваемой рабочими средами. Эти среды принято называть *теплоносителями*.

Передача теплоты от одного теплоносителя к другому необходима во многих отраслях промышленности: в энергетике, в химической, металлургической, нефтяной, пищевой и др.

Тепловые процессы, происходящие в теплообменных аппаратах, самые разнообразные: нагрев, охлаждение, испарение, кипение, конденсация, плавление, затвердевание и более сложные процессы, являющиеся комбинацией перечисленных. В процессе теплообмена может участвовать несколько теплоносителей: теплота от одного из них может передаваться нескольким и от нескольких — одному.

В основу классификации теплообменных аппаратов могут быть положены различные признаки. Обычно используют классификацию теплообменных аппаратов по функциональным признакам:

- 1) по принципу действия;
- 2) по характеру движения;
- 3) по роду теплового режима;
- 4) по роду теплоносителя;
- 5) в зависимости от изменения агрегатного состояния теплоносителей.

Независимо от принципа действия теплообменные аппараты, применяющиеся в различных областях техники, как правило, имеют свои специфические названия, что обусловлено технологическим назначением и конструктивными особенностями. Однако с теплотехнической точки зрения все аппараты имеют одно назначение — передачу теплоты от одного теплоносителя к другому или между поверхностью твердого тела и движущимся теплоносителем, что определяет те общие положения, которые лежат в основе теплового расчета любого теплообменного аппарата.

По принципу действия теплообменные аппараты бывают двух типов — поверхностные (рекуперативные и регенеративные) и смешивающие.

В аппаратах поверхностного типа теплоносители ограничены твердыми стенками, частично или полностью участвующими в процессе теплообмена между ними. Поверхностью нагрева называется часть поверхности этих стенок, через которую передается теплота.

Рекуперативными называют такие теплообменные аппараты, в которых теплообмен между теплоносителями происходит через разделительную стенку. При теплообмене в аппаратах такого типа тепловой поток в каждой точке поверхности разделительной стенки сохраняет постоянное направление.

Регенеративными называются такие теплообменные аппараты, в которых два или большее число теплоносителей попеременно соприкасаются с одной и той же поверхностью нагрева. Во время соприкосновения с различными теплоносителями поверхность нагрева или получает теплоту и аккумулирует ее, а затем отдает, или, наоборот, сначала отдает аккумулированную теплоту и охлаждается, а затем нагревается. В разные периоды теплообмена (нагрев или охлаждение поверхности нагрева) направление теплового потока в каждой точке поверхности нагрева изменяется на противоположное.

По характеру движения теплоносителей относительно теплопередающей поверхности теплообменные аппараты делят на три типа: с естественной циркуляцией; с принудительной циркуляцией; с движением жидкости под действием сил гравитации. К теплообменным аппаратам с естественной циркуляцией относятся испарители, выпарные аппараты, водогрейные и паровые котлы, у которых теплоноситель движется благодаря разности плотностей жидкости и образующейся парожидкостной смеси в опускных и подъемных трубах циркуляционного контура. К теплообменным аппаратам с принудительной циркуляцией относятся, например, рекуперативные теплообменники, а к аппаратам с движением жидкости под действием сил гравитации — конденсаторы, оросительные теплообменники.

Смешивающими (контактными) называют такие теплообменные аппараты, в которых тепло- и массообмен происходит при непосредственном контакте и смешении теплоносителей. Наиболее важным фактором в рабочем процессе смешивающего теплообменного аппарата является поверхность соприкосновения теплоносителей. Для увеличения поверхности теплообмена на пути движения теплоносителей размещают насадку. Подробно конструкции теплообменных аппаратов такого типа будут рассмотрены в гл. 2.

По роду теплового режима теплообменные аппараты бывают со стационарными и нестационарными процессами теплообмена. В большинстве рекуперативных теплообменников теплота передается непрерывно через стенку от теплоносителя к другому теплоносителю. Такие теплообменники называют *теплообменниками непре-*

рывного действия. На рис. 1.1 показан пример рекуперативного теплообменника, в котором один из теплоносителей протекает внутри труб, а второй омывает их наружные поверхности. Теплообменники, в которых периодически изменяются подача и отвод теплоносителей, называют *теплообменниками периодического действия.*

Большинство регенеративных теплообменников работает по принципу периодического действия. Разные теплоносители поступают в них в различные периоды времени. Теплообменники такого типа могут работать и непрерывно. В этом случае вращающаяся насадка (или стенка) попеременно соприкасается с потоками разных теплоносителей и непрерывно переносит теплоту из одного потока в другой.

На рис. 1.2 показан теплообменник с барабанным ротором. Ротор *1* состоит из секций *2*, в каждой из которых размещен пакет из проволочной сетки. Эквивалентный диаметр отверстия в проволочной насадке составляет десятые доли миллиметра.

Объем теплообменника с помощью стенок и уплотняющих устройств *3* разделен на две полости, через одну из которых протекает

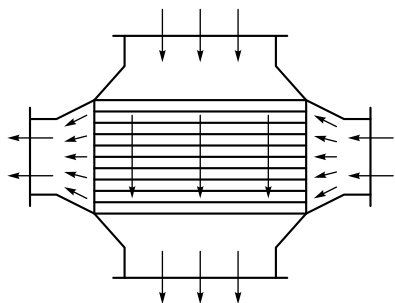


Рис. 1.1. Схема рекуперативного теплообменника трубчатого типа

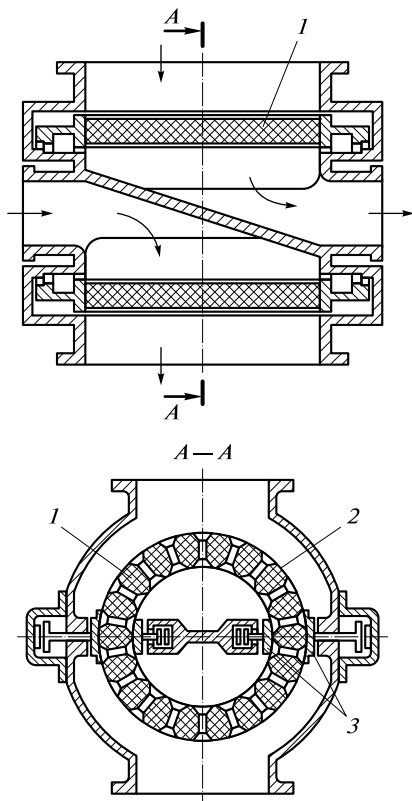


Рис. 1.2. Конструктивная схема теплообменника с барабанным ротором:
1 — ротор; *2* — секция; *3* — уплотняющее устройство

горячий теплоноситель (газ), через другую — холодный. Уплотнения установлены также и на торцевой части ротора. Во время работы теплообменника вследствие вращения ротора нагретые элементы насадки непрерывно переходят из полости горячего в полость холодного газа, а охладившиеся элементы — наоборот. Частота вращения ротора составляет обычно 6... 15 об/мин. Достоинством теплообменников такого типа является их высокая компактность, а недостатком то, что при разных давлениях теплоносителей перетекание газа из одной полости в другую в местах уплотнения существенно снижает их эффективность. Поэтому при неодинаковых давлениях теплоносителей эффективность теплообменника такой схемы во многом зависит от качества уплотнения между его полостями.

По роду теплоносителей теплообменные аппараты классифицируют следующим образом: жидкость — жидкость; пар — жидкость; газ — жидкость; пар — пар; пар — газ; газ — газ.

В зависимости от изменения агрегатного состояния теплоносителей теплообменные аппараты бывают: без изменения агрегатного состояния; с изменением агрегатного состояния одного теплоносителя; с изменением агрегатного состояния обоих теплоносителей.

В теплообменных аппаратах могут протекать различные процессы теплообмена: нагрев; охлаждение; кипение; конденсация и т. д. В зависимости от этих процессов теплообменные аппараты делят на подогреватели, охладители, испарители, конденсаторы и т. д.

1.2. Теплоносители

В зависимости от назначения производственных процессов в качестве **теплоносителей** могут применяться самые разнообразные газообразные, жидкие и твердые вещества.

С точки зрения технической и экономической целесообразности их применения теплоносители должны обладать следующими качествами:

1) иметь достаточно большую теплоту парообразования, плотность и теплоемкость, малую вязкость. При таких характеристиках теплоносителей обеспечивается достаточная интенсивность теплообмена и уменьшаются их массовые и объемные количества, необходимые для заданной тепловой нагрузки теплообменного аппарата. Необходимо также, чтобы теплоносители обладали высокими температурами при малых давлениях, что способствует установке относительно небольших поверхностей теплообмена;

2) иметь необходимую термостойкость и не оказывать неблагоприятного воздействия на материалы аппаратуры. Теплоносители должны быть химически стойкими и неагрессивными даже при достаточно длительном воздействии высоких температур. Желательно, чтобы теплоносители в процессе работы не создавали на поверхно-

сти теплообмена отложений, так как это понижает коэффициент теплопередачи и теплопроизводительность оборудования;

3) быть недорогими и доступными. Дорогостоящие или малодоступные вещества увеличивают капитальные затраты и эксплуатационные расходы, что иногда приводит к явной нецелесообразности их применения с экономической точки зрения.

При выборе теплоносителей необходимо в каждом отдельном случае детально учитывать их термодинамические и физико-химические свойства, а также технико-экономические показатели.

Водяной пар как греющий теплоноситель получил наибольшее распространение вследствие ряда своих достоинств:

- высокие коэффициенты теплоотдачи при конденсации водяного пара позволяют получать относительно небольшие поверхности теплообмена;
- большое изменение энтальпии при конденсации водяного пара позволяет расходовать малое его массовое количество для передачи сравнительно больших количеств теплоты;
- постоянная температура конденсации при заданном давлении позволяет достаточно легко поддерживать постоянный режим и регулировать процесс в аппаратах.

Основным недостатком водяного пара является значительное повышение давления в зависимости от температуры насыщения. Так, при давлении 0,09807 МПа температура пара составляет 99,1 °С, а температура насыщенного пара 350 °С может быть получена только при давлении 15,5 МПа. Поэтому обогрев паром применяют в процессах нагревания, происходящих при умеренных температурах (~60 ... 150 °С).

Наиболее часто употребляемое давление греющего пара в теплообменниках составляет 0,2 ... 1,2 МПа. Теплообменники с паровым обогревом для высоких температур обладают значительной массой и достаточно громоздки по условиям обеспечения прочности, имеют толстые фланцы и стенки, весьма дороги и поэтому применяются редко.

Горячая вода получила широкое распространение в качестве греющего теплоносителя, особенно в отопительных вентиляционных установках. Подогрев воды осуществляется в специальных водогрейных котлах, производственных технологических агрегатах (например, в печах) или водонагревательных установках ТЭЦ и котельных. Горячую воду как теплоноситель можно транспортировать по трубопроводам на значительные расстояния (на несколько километров). При этом понижение температуры воды в хорошо изолированных трубопроводах составляет не более 1 °С на 1 км. Достоинством воды как теплоносителя является сравнительно высокий коэффициент теплоотдачи. Однако горячая вода, поступающая от тепловых сетей, как греющий теплоноситель производственных теплообменников используется редко, поскольку в течение отопительного сезона при

естественном регулировании отпуска теплоты температура ее непостоянна и изменяется от 70 до 150 °С.

Дымовые и топочные газы как греющая среда применяют обычно на месте их получения для непосредственного обогрева промышленных изделий и материалов, если физико-химические характеристики последних не изменяются при загрязнении сажей и золой. Если по условиям эксплуатации загрязнение обрабатываемого материала недопустимо, дымовые газы направляются в рекуперативный теплообменник, где отдают свою теплоту воздуху, который нагревает обрабатываемый материал.

Достоинством топочных газов является возможность нагрева ими материала до весьма высоких температур, необходимых по технологическим условиям производства. Однако это достоинство не всегда можно использовать, поскольку вследствие трудности регулирования возможны перегрев материала и ухудшение его качества. Кроме того, по условиям техники безопасности не всегда можно использовать огневой обогрев. Высокая температура топочных газов обуславливает большие тепловые потери. Газы, исходящие из топки с температурой выше 1 000 °С, поступают потребителю с температурой не выше 700 °С, так как обеспечить хорошую термоизоляцию при таком высоком уровне температур достаточно трудно.

Недостатки дымовых и топочных газов как греющей среды обусловлены следующими причинами:

1) малая плотность газов вызывает необходимость получения больших объемов для обеспечения достаточной теплопроизводительности, что приводит к созданию громоздких трубопроводов;

2) вследствие малой удельной теплоемкости газов их необходимо подавать в аппараты в большом количестве с высокой температурой, что вынуждает применять огнеупорные материалы для трубопроводов. Прокладка таких газопроводов, а также создание запорных и регулирующих приспособлений по тракту течения газа представляють большие трудности;

3) вследствие низкого коэффициента теплоотдачи со стороны газов теплоиспользующая аппаратура должна иметь большие поверхности нагрева и поэтому получается весьма громоздкой.

Высокотемпературные теплоносители (кроме дымовых газов), нашедшие применение в промышленности для высокотемпературного обогрева, представляют собой минеральные масла, органические соединения, расплавленные металлы и соли. Они должны обладать следующими свойствами:

- высокой температурой кипения при атмосферном давлении;
- высокой интенсивностью теплообмена;
- низкой температурой отвердевания;
- термической стойкостью;
- безвредностью для материалов трубопроводов и теплоотдающих поверхностей;

- невоспламеняемостью, взрывобезопасностью, отсутствием токсичности;

- экономичностью.

При использовании высокотемпературных теплоносителей в температурных режимах ниже точки кипения теплообменники могут работать при атмосферном давлении.

Низкотемпературные теплоносители представляют собой вещества, кипящие при температурах ниже 0 °С. Типичными представителями их являются аммиак NH_3 , диоксид углерода CO_2 , сернистый ангидрид SO_2 и большой ряд фреонов — галогенопроизводных насыщенных углеводородов, применяющихся в качестве хладагентов в холодильной технике.

Электрическая энергия, хотя и не является теплоносителем в обычном смысле этого слова, а скорее способом обогрева, также нашла широкое применение для нагрева веществ в технологических процессах. Используют три способа электрообогрева: электродуговой, диэлектрическое нагревание и нагревание сопротивлением. Последний способ получил широкое распространение и имеет большую перспективу в районах, где отсутствует топливо, но имеется достаточное количество дешевой электроэнергии, получаемой от гидро- и атомных электростанций.

Достоинства электрического обогрева: простота и легкость подвода и устройства; удобство контроля, регулировки и обслуживания; возможность получать почти любую температуру; чистота и гигиенические условия при работе. При переходе электрической энергии в тепловую часто удается использовать почти 100 % подведенной энергии. Однако следует иметь в виду, что на базе теплового производства электроэнергии электрообогрев всегда имеет более низкий КПД, чем тепловые способы нагрева.

1.3. Определение физических параметров и скоростей движения теплоносителей

Теплообмен между теплоносителями существенно зависит от физических свойств и параметров движущихся сред, а также от гидродинамических условий движения. Физические параметры теплоносителей зависят от температуры и определяются по справочникам по выбранной средней температуре среды.

Средняя температура среды t_{cp} , °С, приближенно определяется как среднее арифметическое начальной $t_{\text{нач}}$ и конечной $t_{\text{кон}}$ температур:

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_{\text{нач}} + t_{\text{кон}}}{2}. \quad (1.1)$$

Основными физическими параметрами рабочих сред являются: плотность, вязкость, теплоемкость, теплопроводность, температура кипения, скрытая теплота испарения или конденсации и др. Значения этих параметров можно найти в справочной литературе.

Физические параметры веществ в справочниках представлены в виде диаграмм, таблиц, номограмм. При нахождении физического параметра необходимо обратить внимание, при какой температуре дано его значение и в каких единицах измерения выражено. Во многих справочниках физические параметры даны при температуре 20 °С, а теплота парообразования жидкости — при температуре ее кипения. Если средняя температура заданного вещества отличается от 20 °С, то следует сделать поправку на температуру.

Для большинства физических параметров существует линейная зависимость значения параметра от температуры. Например, теплоемкость c_t , кДж/(кг · °С), большинства вязких жидкостей при заданной температуре является линейной функцией от температуры:

$$c_t = c_{20} + \alpha t, \quad (1.2)$$

где c_{20} — теплоемкость жидкости при 20 °С; α — опытный коэффициент, принимаемый по справочнику; t — средняя температура, при которой определяется теплоемкость жидкости, °С.

Поправку на температуру, Дж/(кг · К), определяют по формуле

$$c_t = (0,415 + 0,0006t) \cdot 4187.$$

Если жидкость состоит из смеси нескольких компонентов, то теплоемкость смеси $c_{см}$ рассчитывают по уравнению

$$c_{см} = \frac{c_1 m_1 + \dots + c_n m_n}{m_1 + \dots + m_n}, \quad (1.3)$$

где $c_1, \dots, c_n$ — теплоемкости компонентов, кДж/(кг · °С); $m_1, \dots, m_n$ — массы компонентов, кг.

Зная процентное соотношение компонентов, для расчета теплоемкости смеси $c_{см}$ можно использовать следующую формулу:

$$c_{см} = a c_1 (1 - a) c_2, \quad (1.4)$$

где a — массовая концентрация (массовая доля) первого компонента; $(1 - a)$ — массовая концентрация второго компонента.

Теплоемкость одной жидкости c_1 можно определить через теплоемкость другой стандартной жидкости:

$$c_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{4/3} c_2, \quad (1.5)$$

где c_1 — теплоемкость первой жидкости при 20°C , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_1 — коэффициент теплопроводности первой жидкости при 20°C , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_1 — плотность первой жидкости при 20°C , $\text{кг}/\text{м}^3$; c_2 — теплоемкость эталонной жидкости, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_2 — коэффициент теплопроводности эталонной жидкости, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_2 — плотность эталонной жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Зависимость плотности ρ_t жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$, от температуры рассчитывают по формуле

$$\rho_t = \rho_{20} - \beta_t (t - 20^\circ\text{C}), \quad (1.6)$$

где ρ_{20} — плотность жидкости при температуре 20°C , $\text{кг}/\text{м}^3$; β_t — температурная поправка на 1°C ; t — средняя температура.

Для многих чистых жидкостей определить зависимость плотности ρ_t от температуры можно по формуле

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + \beta_t}, \quad (1.7)$$

где β — коэффициент объемного расширения жидкости, $^\circ\text{C}^{-1}$.

Для смеси жидкостей или газов плотность

$$\rho_{\text{см}} = n_1 \rho_1 + \dots + n_m \rho_m, \quad (1.8)$$

где $n_1, \dots, n_m$ — объемные доли компонентов; $\rho_1, \dots, \rho_m$ — плотности компонентов, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Плотность ρ_t , $\text{кг}/\text{м}^3$, любого газа при температуре T и давлении p можно вычислить по формуле

$$\rho_t = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{273 p}{T p_0}, \quad (1.9)$$

где ρ_0 — плотность газа при 0°C и 760 мм рт. ст. , $\text{кг}/\text{м}^3$, $\rho_0 = M/22,4$; $T_0 = 273^\circ\text{C}$; M — молекулярная масса газа; $22,4$ — число Авогадро; T — температура газа, К ; p и p_0 — давления газа в одной и той же системе единиц измерения.

Коэффициент теплопроводности λ_t при средней температуре линейно зависит от температуры:

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + \beta t), \quad (1.10)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности при 0°C , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; β — опытный коэффициент, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; t — средняя температура вещества, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплопроводности воды при $t = 20^\circ\text{C} \approx 0,58 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; для вязких жидкостей $\approx 0,12 \dots 0,29 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; для газов $\approx 0,012 \dots 0,006 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Для вязких жидкостей и газов существуют приближенные формулы расчета коэффициента теплопроводности, но лучше использовать справочные данные.

При определении коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{см}}$ смеси нескольких жидкостей для ориентировочных расчетов применяют закон аддитивности (слагаемости):

$$\lambda_{\text{см}} = \lambda_1 n_1 + \dots + \lambda_m n_m, \quad (1.11)$$

где $n_1, \dots, n_m$ — доли компонентов в смеси; $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ — коэффициенты теплопроводности компонентов, Вт/(м · К).

Для определения вязкости газовых смесей можно использовать зависимость

$$\frac{M_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{m_1 M_1}{\mu_1} + \dots + \frac{m_n M_n}{\mu_n}, \quad (1.12)$$

где $M_{\text{см}}$ — молекулярная масса смеси, а. е. м.; $\mu_{\text{см}}$ — динамическая вязкость смеси, Па · с; $m_1, \dots, m_n$ — объемные доли компонентов в смеси; $M_1, \dots, M_n$ — молекулярные массы компонентов смеси, а. е. м.; $\mu_1, \dots, \mu_n$ — динамические вязкости компонентов, Па · с.

Вязкость смеси неассоциированных жидкостей (молекулы которых не соединяются в группы) можно вычислить по уравнению

$$\lg \mu_{\text{см}} = m_1 \lg \mu_1 + \dots + m_n \lg \mu_n, \quad (1.13)$$

где $m_1, \dots, m_n$ — молярные концентрации компонентов в смеси; $\mu_1, \dots, \mu_n$ — динамические вязкости компонентов смеси, а. е. м.

Вязкость μ_c разбавленных суспензий (смесь двух веществ, из которых одно находится в виде мельчайших частичек в другом) можно рассчитать по формуле

$$\mu_c = \mu_{\text{ж}} (1 + 2,5\varphi), \quad (1.14)$$

где $\mu_{\text{ж}}$ — вязкость чистой жидкости, Па · с; φ — объемная концентрация твердой фазы в суспензии.

При конструировании теплообменной аппаратуры обычно выбирают такие скорости теплоносителей, при которых значения коэффициентов теплоотдачи и гидравлических сопротивлений были бы экономически выгодными.

Выбор оптимальной скорости имеет большое значение для качественной работы теплообменного аппарата, так как увеличение скоростей теплоносителей приводит к интенсификации теплообмена (возрастают коэффициенты теплопередачи) и уменьшению поверхности нагрева, что позволяет выполнить аппарат более компактным. Однако при этом значительно возрастают гидравлические сопротивления и, естественно, увеличивается расход электроэнергии на пере-

качку, а также появляется опасность гидравлического удара и вибрации труб. Поэтому часто бывает необходимо произвести технико-экономический расчет для выбора оптимальных скоростей теплоносителей. Обычно минимальное значение скорости теплоносителя выбирается соответствующим началу турбулентного движения потока, т.е. числу Рейнольдса больше 10^4 .

Для наиболее часто применяемых диаметров труб рекомендуют скорости жидкости 1,5... 2 м/с, но не выше 3 м/с. Минимальный диапазон скорости для большинства жидкостей составляет 0,06... 0,3 м/с. Для маловязких жидкостей скорость, соответствующая $Re = 10^4$, не превышает 0,2... 0,3 м/с. Для вязких жидкостей турбулентность потока достигается при значительно больших скоростях, поэтому при расчетах приходится принимать переходный или даже ламинарный режим.

Для газов при атмосферном давлении допускаются скорости до 25 м/с, а массовые скорости 15... 20 кг/(м²·с) с нижним пределом 2... 2,5 кг/(м²·с), для насыщенных паров при конденсации рекомендуются скорости до 10 м/с.

Контрольные вопросы

1. Какие устройства называются теплообменными аппаратами?
2. В чем состоит отличие рекуперативного теплообменника от регенеративного?
3. Какие теплообменные аппараты называют смешивающими?
4. Какие процессы теплообмена могут протекать в теплообменных аппаратах?
5. На какие основные типы делят теплообменные аппараты по характеру движения теплоносителей относительно теплопередающей поверхности?
6. Какими качествами должны обладать теплоносители с точки зрения технической и экономической целесообразности их применения?
7. Перечислите достоинства и недостатки воды как теплоносителя.
8. Какими свойствами должны обладать высокотемпературные теплоносители и в каких случаях их применение в теплообменниках рационально?
9. Почему выбор оптимальной скорости теплоносителя имеет большое значение для качественной работы теплообменного аппарата?
10. Какие физические параметры рабочих сред являются основными?