

Ю. Д. СИБИКИН

# ОТОПЛЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА

*Рекомендовано*

*Федеральным государственным учреждением*

*«Федеральный институт развития образования»*

*в качестве учебного пособия для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования*

Регистрационный номер рецензии 458

от 02 июля 2009 г. ФГУ «ФИРО»

7-е издание, переработанное и дополненное



Москва

Издательский центр «Академия»

2013

УДК 658.264(075.32)

ББК 31.38я723

С341

Рецензенты:

директор ГОУ «Орехово-Зуевский текстильный техникум» М. С. Бочин;

преподаватель специальных дисциплин ГОУ «Орехово-Зуевский

текстильный техникум» Т. П. Дундуа;

главный инженер ОАО «МКЦ "Электрокерамика"» Ю. И. Харламов;

инженер А. Э. Маргаритов

**Сибикин Ю. Д.**

С341 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю. Д. Сибикин. — 7-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 336 с.

ISBN 978-5-7695-6429-1

Рассмотрены современные устройства систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Даны характеристики отечественных и зарубежных приборов, используемых в этих системах. Описаны методы определения теплопотерь через ограждающие конструкции зданий, а также санитарно-гигиенические требования к качеству воздуха производственных и административных зданий. Освещены вопросы повышения эффективности использования вторичных энергоресурсов.

В 7-е издание внесены дополнения о паропроницаемости ограждающих конструкций, конструкциях новых отопительных приборов, а также новых приборах контроля параметров отопления и вентиляции.

Учебное пособие может быть использовано при освоении профессиональных модулей ПМ.01 «Организация и контроль работ по монтажу систем водоснабжения и водоотведения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха», ПМ.02 «Организация и контроль работ по эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха» по специальности 270839 «Монтаж и эксплуатация внутренних сантехнических устройств, кондиционирования воздуха и вентиляции».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезно работникам, занимающимся эксплуатацией, ремонтом и монтажом систем отопления, вентиляции и кондиционирования.

УДК 658.264(075.32)

ББК 31.38я723

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

© Сибикин Ю. Д., 2013

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-7695-6429-1

## Предисловие

Основной задачей данной книги является ознакомление студентов с теоретическими и практическими основами современных систем отопления, вентиляции и кондиционирования, а также с требованиями нормативных документов, знание которых необходимо при проектировании, строительстве и эксплуатации указанных систем.

Учебное пособие написано с учетом, что им будут пользоваться студенты после изучения общетехнических дисциплин «Термодинамика», «Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики», «Теоретические основы теплотехники и гидравлики» и др.

Данное учебное пособие входит в состав профессиональных модулей ПМ.01 «Организация и контроль работ по монтажу систем водоснабжения и водоотведения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха», ПМ.02 «Организация и контроль работ по эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха» и является частью учебно-методического комплекта по специальности «Монтаж и эксплуатация внутренних сантехнических устройств, кондиционирования воздуха и вентиляции».

Отдельная глава посвящена вопросам рационального использования вторичных энергоресурсов в системах отопления и вентиляции.

В трудах основоположника русской науки М. В. Ломоносова (1711—1765), отвергшего господствовавшую в XVIII в. теорию теплорода, впервые были даны правильные представления о теории теплоты.

В своей диссертации «Размышление о причине теплоты и холода» (1744—1747 гг.), а также в труде «Рассуждение о твердости и жидкости тел» (1760 г.) М. В. Ломоносов утверждал, что «тепло состоит во внутреннем движении вещества». Он обосновал сущность теплоты и тепловых явлений, теоретическими и экспериментальными исследованиями заложил основы молекулярно-кинетической теории вещества и установил взаимосвязь между теплотой и механической энергией на основе открытого им всеобщего закона природы — закона сохранения и превращения энергии.

Эти гениальные теоретические обобщения опередили западноевропейскую науку более чем на 100 лет.

Под влиянием теоретических открытий М. В. Ломоносова в области учения о теплоте талантливый русский механик и теплотехник И. И. Ползунов, осознавший громадное значение практического разрешения проблемы промышленного использования энергии пара, построил в 1763—1765 гг. в Барнауле первую в России промышленную паросиловую установку, состоявшую из парового котла и паровой машины.

Работы М. В. Ломоносова и И. И. Ползунова заложили теоретические и практические основы для дальнейшего развития теплоэнергетики.

В области практической теплотехники больших успехов добились механики Нижнетагильских заводов Е. А. и М. Е. Черепановы. Ими был сконструирован ряд паровых машин. Самым значительным их вкладом в отечественное машиностроение было создание в 1834 г. первого русского паровоза.

В 1864 г. преподаватель морского корпуса И. П. Алымов опубликовал работу, посвященную расчету тяги в топках паровых котлов. В его исследовании впервые был дан обоснованный метод расчета скорости подачи воздуха в топку парового котла.

Большие исследования процесса сжигания топлива в топках паровых котлов проделал русский термохимик В. Ф. Лугинин. Полученные и систематизированные им количественные данные о теплотворной способности различных веществ пользовались всеобщим признанием и повсеместным применением как в России, так и за рубежом. Важную роль в этой области сыграли также работы профессора Н. С. Курнакова, посвященные вычислению температур горения.

Известные русские теплотехники В. И. Гриневецкий, К. В. Кириш и ряд других усовершенствовали тепловой расчет поверхностей нагрева и теплопередачи.

Большой вклад в отечественную теплотехнику внес русский инженер В. Г. Шухов — ученик Н. Е. Жуковского. В 80-х годах XIX в. он создал оригинальный водотрубный котел, который отличался однотипностью изготовления основных деталей. Это позволило организовать массовое производство стандартных котлов. Котлы Шухова получили широкое распространение в России и за рубежом. Одним из изобретений В. Г. Шухова была также оригинальная форсунка для распыливания водяным паром мазута при его сжигании в топочных устройствах.

Русские теплотехники являются пионерами в области использования местных видов топлива. В 1913 г. наш талантливый соотечественник Р. Э. Классон построил под Москвой (около Ногинска) первую в мире электростанцию, работающую на торфе. Ныне она носит его имя. Им же был изобретен высокопроизводительный гидравлический способ добычи торфа, заменивший малопродуктивный машинно-формовочный способ.

Из выдающихся работ в области теплоэнергетики следует отметить капитальный труд академика М. В. Кирпичева по моделированию тепловых устройств. Созданная им теория подобия позволяет проводить исследования тепловых, аэродинамических и других явлений на моделях и пересчитывать полученные результаты применительно к реальным тепловым устройствам. Теория подобия М. В. Кирпичева широко используется в различных областях исследований, в том числе при проектировании современных систем отопления, вентиляции и кондиционирования.

Весьма важное значение для современной теплоэнергетики имеют работы коллективов научных работников Всероссийского теплотехнического института и Центрального котлотурбинного института, создавших строго научный метод расчета тепловых агрегатов, который обеспечивает совпадение их эксплуатационных характеристик с проектными, чего не удавалось достичь ранее.

В результате эксплуатационная надежность спроектированных по этому методу теплоснабжающих источников выше, чем у известных зарубежных аналогов.

Большой вклад в создание современных отечественных систем отопления и вентиляции внесли инженеры и ученые институтов Промстройпроект, Сантехниипроект, Гипронии РАН, Тюменского инженерно-строительного института, разработавшие строительные нормы и правила проектирования отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях зданий и сооружений (СНиП 2.04.05 — 91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»), а также К. С. Орлов, А. Н. Сканави, Г. В. Русланов, М. Я. Розкин, Э. Л. Ямпольский, В. Я. Меклер, А. Г. Егизаров, В. И. Богословский, В. П. Щеглов, Н. Н. Разумов, А. В. Нестеренко, Р. В. Щекин, В. А. Березовский, В. А. Потапов и другие, с трудами которых полезно ознакомится молодым специалистам.

Теплоснабжающее хозяйство России в начале XXI в. включало в себя 485 тепловых электростанций (ТЭС), на которых действуют теплофикационные турбины; 190 тыс. котельных разной единичной мощности, в том числе 84 тыс. промышленных котельных; около 260 тыс. км магистральных и распределительных тепловых сетей.

В последние годы идет процесс разукрупнения систем теплоснабжения, растет число мелких котельных и местных генераторов теплоты, расширяется зона децентрализованного теплоснабжения, увеличивается объем самозаготовок топлива населением в связи с развитием массовой загородной индивидуальной застройки в сельской местности и на свободных территориях вокруг населенных пунктов, а также из-за значительного подорожания теплоты в системах централизованного теплоснабжения.

Новые технологии различных производств немислимы без применения современных отопительно-вентиляционных систем и кондиционирования воздуха.

Главная цель отопления зданий — создание теплового комфорта в помещениях. Качество воздушной среды помещений в течение года определяется эффективностью работы систем вентиляции и кондиционирования. В условиях перехода от плановой системы управления хозяйством к рыночным отношениям отопительно-вентиляционная техника и устройства кондиционирования воздуха переживают бурное развитие в связи с коренной модернизацией практически всех отраслей промышленности.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

### 1.1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В научно-технических и справочных изданиях, а также в нормативных документах, относящихся к проектированию, монтажу, эксплуатации и ремонту систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, часто используются общетехнические и специальные термины. Рассмотрим некоторые из терминов, смысловое содержание которых необходимо четко знать читателям настоящей книги.

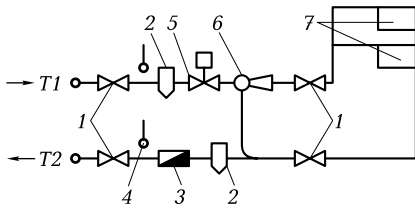
*Температурой* называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. С молекулярно-кинетической точки зрения температура есть мера интенсивности теплового движения молекул. Численное значение связано с величиной средней кинетической энергии молекул

В системе СИ единицей измерения абсолютной температуры является кельвин (К); на практике широкое распространение получило измерение температуры в градусах Цельсия (°С). Значения абсолютной температуры  $T$  и температуры  $t$  по шкале Цельсия связаны соотношением  $T = t + 273,15$ .

Совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого тела в данный момент времени называют *температурным полем*.

Поверхность внутри тела или на его границах, имеющую одинаковую температуру, называют *изотермической*.

*Давление* обусловлено взаимодействием молекул рабочего тела с поверхностью. Численно оно равно силе, действующей на единицу площади поверхности тела по нормали к ней.



**Рис. 1.1.** Схема индивидуального теплового пункта:

1 — отключающие задвижки; 2 — грязевик; 3 — водомер; 4 — термометр; 5 — регулятор расхода; 6 — элеватор; 7 — система отопления;  $T1$ ,  $T2$  — подающий и обратный трубопроводы

В Международной системе единиц (СИ) давление выражают в паскалях ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ ). Находят также применение такие внесистемные единицы измерения давления, как техническая атмосфера ( $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 \approx 10^5 \text{ Па}$ ), миллиметр ртутного столба ( $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$ ), миллиметр водяного столба ( $1 \text{ мм вод. ст.} \approx 10 \text{ Па}$ ).

Удельный объем  $v$  — это объем единицы массы вещества. Если однородное тело массой  $m$  занимает объем  $V$ , то  $v = V/m$ . Единица измерения удельного объема — кубический метр на килограмм ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ).

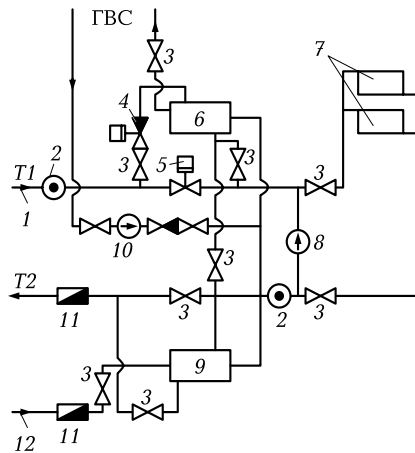
Отопление — процесс поддержания нормируемой температуры воздуха в закрытых помещениях.

Система отопления — техническая установка, состоящая из комплекта оборудования, связанного между собой конструктивными элементами, предназначенная для получения, переноса и передачи заданного количества теплоты в обогреваемое помещение.

Индивидуальный тепловой пункт (ИТП) (рис. 1.1) — пункт, предназначенный для подключения систем отопления, теплоснабжения вентиляционных установок и водоснабжения отдельных зданий к распределительным сетям городской тепловой сети и водопровода,

управления указанными системами и учета количества тепловой энергии и теплоносителя.

Центральный тепловой пункт (ЦТП) (рис. 1.2) — это



**Рис. 1.2.** Схема центрального теплового пункта:

1 — ввод горячей воды; 2 — грязевик; 3 — задвижки; 4, 5 — регуляторы температуры и расхода; 6, 9 — подогреватели ГВС 2-й и 1-й ступеней; 7 — система отопления; 8 — подмешивающий насос; 10 — циркуляционный насос; 11 — водомеры; 12 — ввод холодной воды



пункт, предназначенный для подключения систем тепло- и водоснабжения микрорайона (одного здания или группы) к распределительным сетям городской тепловой сети и водопровода, управления системами отопления, теплоснабжения вентиляционных установок, установок водоснабжения и учета количества тепловой энергии, теплоносителя и воды.

*Обслуживаемая зона (зона обитания)* — это пространство в помещении, ограниченное плоскостями, параллельными ограждениям, на высоте 0,1 и 2,0 м над уровнем пола, но не ближе чем 1,0 м от потолка при потолочном отоплении, на расстоянии 0,5 м от внутренних поверхностей наружных стен, окон и отопительных приборов, на расстоянии 1,0 м от раздающей поверхности воздухораспределителей.

*Скорость движения воздуха* — осредненная по объему обслуживаемой зоны скорость движения воздуха.

*Температура воздуха* — осредненная по объему обслуживаемой зоны температура воздуха.

*Теплый период года* — период года, характеризующийся средне-суточной температурой наружного воздуха выше 8 °С.

*Холодный период года* — период года, характеризующийся среднесуточной температурой наружного воздуха, равной 8 °С и ниже.

*Термическая нагрузка* — электрическая мощность, расходуемая непосредственно на отопление помещения.

*Узел ввода в здание (УВ)* — узел ввода трубопроводов теплоснабжения в здание, в котором при отсутствии ИТП устанавливают отсекающие задвижки и приборы учета количества тепловой энергии, теплоносителя и воды.

*Узел управления (УУ)* — узел подключения систем отопления здания (блок-секции) к распределительным сетям от ЦТП при непосредственном присоединении или с элеваторным узлом.

*Радиационная температура помещения* — осредненная по площади температура внутренних поверхностей ограждений помещения и отопительных приборов.

*Результирующая температура помещения (температура помещения)* — температура окружающей среды, в которой человек путем радиации и конвекции отдает столько же теплоты, что и в окружающей среде с одинаковой температурой воздуха и окружающих поверхностей при одинаковой влажности и скорости движения воздуха.

*Помещение с постоянным пребыванием людей* — помещение, в котором люди находятся не менее двух часов непрерывно или не менее шести часов в сумме в течение суток.

*Помещения с массовым пребыванием людей* — помещения площадью 50 м<sup>2</sup> и более (залы и фойе театров, кинотеатров, залы заседаний, совещаний, лекционные аудитории, рестораны, вестибюли, кассовые залы, производственные и др.) с постоянным или временным пребыванием людей (кроме аварийных ситуаций) в количестве более одного человека на 1 м<sup>2</sup>.

*Категории помещений общественных зданий:*

1 — помещения, в которых люди заняты умственным трудом, учебной;

2 — помещения, в которых люди в положении лежа или сидя находятся в состоянии покоя и отдыха;

3 — зрительные залы, в которых люди пребывают преимущественно в положении сидя без верхней одежды;

3а — зрительные залы, в которых люди пребывают преимущественно в положении сидя в верхней одежде;

3б — залы для занятий спортом без зрителей;

3в — залы совещаний, лекционные, актовые, читальные, предприятий общественного питания, залы для пассажиров;

4 — помещения с временным пребыванием людей (вестибюли, гардеробные, коридоры, лестницы, санузлы, курительные, кладовые).

*Постоянное рабочее место* — место, где люди работают более двух часов непрерывно или более 50 % рабочего времени.

*Непостоянное рабочее место* — место, где люди работают менее двух часов непрерывно или менее 50 % рабочего времени.

*Рабочая зона* — пространство над уровнем пола или рабочей площадки высотой 2 м при выполнении работы стоя или 1,5 м при выполнении работы сидя.

*Многоэтажное здание* — здание с числом этажей два и более.

*Надежность систем отопления, вентиляции и кондиционирования* — способность указанных систем обеспечить в обслуживаемом помещении нормируемые параметры микроклимата и чистоту воздуха в пределах заданной обеспеченности в интервале расчетного времени (год, сезон и т. п.).

*Микроклимат помещения* — состояние внутренней среды помещения, характеризующееся следующими показателями: температура воздуха помещения; радиационная температура помещения; скорость движения воздуха в помещении; относительная влажность воздуха в помещении.

*Оптимальные микроклиматические условия* — это сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нор-

мальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, обеспечивают ощущение теплового комфорта не менее чем у 80 % людей, находящихся в помещении.

*Обеспеченность* — накопленная вероятность обеспечения заданных параметров (в среднем за 50 лет) в долях продолжительности года, когда температура наружного воздуха и его энтальпия не будут для холодного периода года ниже, а для теплого периода выше расчетных значений.

*Отказ систем отопления, вентиляции и кондиционирования* — нарушение в работе оборудования и (или) элементов указанных систем, вызывающее отклонение параметров микроклимата в обслуживаемой или рабочей зоне помещения от нормируемых.

## 1.2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ

Вопросы передачи теплоты, или теплового обмена, являются основными вопросами отопительной техники. Необходимым условием теплообмена между телами или веществами является наличие разности температур. Чем больше эта разность, тем интенсивнее происходит теплообмен.

Различают три вида передачи теплоты: а) теплопроводностью, или кондукцией; б) конвекцией, или переносом теплоты движущимися частицами вещества; в) лучеиспусканием, или радиацией.

В большинстве случаев в различных тепловых процессах имеют место одновременно все три вида теплопередачи с преобладанием какого-либо из них.

**Передача теплоты теплопроводностью.** Такая передача осуществляется при непосредственном соприкосновении каких-либо двух тел или веществ. Теплопередача происходит внутри самого тела или вещества, которое проводит теплоту. В отопительной технике теплопередача теплопроводностью играет большую роль.

Теплопроводность обусловлена различием температур отдельных частей тела, поэтому можно считать, что распространение теплоты неразрывно связано с распределением температуры. Температурное поле, изменяющееся с течением времени, называют неустановившимся, или нестационарным. Если же температурное поле не меняется, его называют установившимся, или стационарным.

Для характеристики процесса распространения теплоты вводят понятие о тепловом потоке. *Тепловой поток  $Q$*  — это количество

теплоты  $W$ , Дж, проходящей за время  $\tau$ , с, через данную поверхность в направлении нормали к ней:

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (1.1)$$

Тепловой поток измеряют в ваттах (Вт).

Если количество переданной теплоты  $W$  отнести к площади поверхности  $F$  и времени  $\tau$ , то получим величину

$$q = \frac{W}{F\tau} = \frac{Q}{F}, \quad (1.2)$$

которую называют *плотностью теплового потока*, или удельным тепловым потоком, и измеряют в Вт/м<sup>2</sup>.

Рассмотрим стационарный процесс распространения теплоты через однородную плоскую однослойную стенку (рис. 1.3, а).

Из закона распространения теплоты путем теплопроводности (закона Фурье) следует:

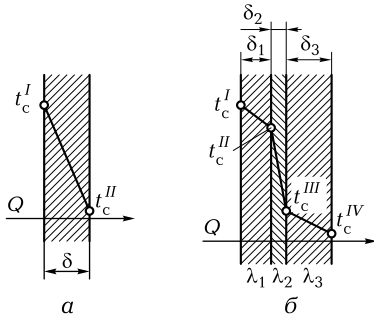
$$W = \lambda \frac{t_c^I - t_c^{II}}{\delta} F \tau, \quad (1.3)$$

где  $W$  — количество переданной теплоты, Дж;  $\lambda$  — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом теплопроводности*, Вт/(м·К);  $t_c^I$  — температура одной поверхности стенки, К;  $t_c^{II}$  — температура другой поверхности стенки, К;  $\delta$  — толщина стенки, м;  $F$  — площадь поверхности стенки, м<sup>2</sup>;  $\tau$  — время, с.

Отсюда

$$\lambda = \frac{W\delta}{(t_c^I - t_c^{II})F\tau}, \quad (1.4)$$

т. е. коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, которое проходит в единицу времени (1 с) в теле через единицу поверхности (1 м<sup>2</sup>) при падении температуры на 1 К на 1 м пути теплового потока.



**Рис. 1.3.** Передача теплоты через плоскую стенку:

а — однослойную; б — многослойную

Если обе части уравнения (1.3) разделить на  $F\tau$ , то получим

$$q = \lambda \frac{t_c^I - t_c^{II}}{\delta}, \quad (1.5)$$

или

$$q = \frac{t_c^I - t_c^{II}}{\frac{\delta}{\lambda}}, \quad (1.6)$$

где  $\frac{\delta}{\lambda}$  — *термическое сопротивление теплопроводности*.

Таким образом, плотность теплового потока  $q$  прямо пропорциональна разности температур на поверхностях стенки и обратно пропорциональна термическому сопротивлению теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  у различных материалов неодинаков и зависит от их свойств, а у газообразных и жидких веществ — от плотности, влажности, давления и температуры этих веществ. При технических расчетах значения  $\lambda$  выбирают по соответствующим справочным таблицам.

Рассмотрим теперь процесс передачи теплоты через многослойную стенку.

На рис. 1.3, б изображена плоская стенка, состоящая из трех слоев, указаны промежуточные температуры на границах этих слоев, а также толщина слоев и значения коэффициентов теплопроводности для каждого слоя. При стационарном режиме тепловой поток, проходящий через каждый отдельный слой, будет один и тот же. Тогда для каждого слоя в соответствии с формулой (1.6) можно записать:

$$q = \frac{t_c^I - t_c^{II}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}}; \quad q = \frac{t_c^{II} - t_c^{III}}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}}; \quad q = \frac{t_c^{III} - t_c^{IV}}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}}.$$

Отсюда

$$t_c^I - t_c^{II} = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad t_c^{II} - t_c^{III} = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad t_c^{III} - t_c^{IV} = q \frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

Сложив правые и левые части этих уравнений, получим

$$t_c^I - t_c^{IV} = q \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right).$$

Следовательно, плотность теплового потока многослойной стенки

$$q = \frac{t_c^I - t_c^{IV}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}. \quad (1.7)$$

Из записанных уравнений для трех разностей температур можно получить формулы для вычисления промежуточных температур. Например:

$$t_c^{III} = t_c^{II} - q \frac{\delta_2}{\lambda_2}$$

и

$$t_c^{III} = t_c^{IV} + q \frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

**Передача теплоты конвекцией.** *Конвекция* — это перенос теплоты движущейся массой жидкости или газа из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, этот процесс называют конвективным теплообменом.

Теплоотдача конвекцией зависит от большого числа различных факторов:

характера конвекции — конвекции свободной, происходящей под действием внутренних сил, возникающих вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц, или вынужденной, происходящей под действием внешних сил — ветра, насоса, вентилятора;

режима течения жидкости — течения при малых скоростях параллельно-струйчатого характера без перемешивания (ламинарный режим) или течения при больших скоростях (течение неупорядоченное, вихревое), когда в теплоносителе наблюдаются вихри, перемещающие жидкость не только в направлении движения, но и в поперечном направлении (турбулентный режим);

скорости движения теплоносителя;

направления теплового потока (нагревание или охлаждение);

физических свойств теплоносителя — коэффициента теплопроводности, теплоемкости, плотности, вязкости, температурного напора, зависящего от разности температур теплоносителя и поверхности стенок;

площади поверхности стенки  $F$ , омываемой теплоносителем;

формы стенки, ее размеров и других факторов.

Расчет процесса конвективного теплообмена производят на основе закона Ньютона, который выражается формулой

$$W = \alpha F(t - t_c^l)\tau, \quad (1.8)$$

где  $W$  — количество переданной теплоты, Дж;  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом теплоотдачи*, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  — площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $t$  и  $t_c^l$  — температуры соответственно жидкости и стенки, К;  $\tau$  — время, с.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  показывает, какое количество теплоты передается от жидкости (греющего тела) к стенке или наоборот в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью стенки и жидкостью в 1 К.

Разделив обе части уравнения (1.8) на  $F\tau$ , получим выражение для плотности теплового потока при теплоотдаче:

$$q = \alpha(t - t_c^l), \quad (1.9)$$

или

$$q = \frac{t - t_c^l}{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1.10)$$

где  $\frac{1}{\alpha}$  — *термическое сопротивление теплоотдачи*.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяют опытным или аналитическим методом. Аналитический метод весьма сложен и не обеспечивает нужной точности.

**Передача теплоты излучением.** Все тела излучают электромагнитные волны. Излучение, причиной которого является возбуждение атомов и молекул вещества вследствие их теплового движения, называют тепловым. Лучистый поток — это энергия излучения, Дж, проходящая в единицу времени (1 с) через поверхность площадью  $F$ , м<sup>2</sup>, во всех направлениях пространства.

Излучение зависит от температуры тела: чем выше температура тела, тем интенсивнее испускание тепловых лучей.

Тела, полностью поглощающие падающую на них лучистую энергию, называют *абсолютно черными*. Тела, обладающие свойством полного и правильного отражения всей падающей лучистой энергии, называют *зеркальными*, а тела, обладающие свойством полного диффузного отражения этой энергии, называют *абсолютно белыми*. Тела, полностью пропускающие сквозь себя падающую

лучистую энергию, называют *абсолютно прозрачными*, или *прозрачными*.

Согласно закону Стефана — Больцмана полное количество энергии, излучаемой единицей поверхности абсолютно черного тела в единицу времени,

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.11)$$

где  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $T$  — абсолютная температура поверхности тела, К.

Из этого уравнения следует, что энергия излучения пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени.

Поток излучения  $\Delta Q$ , проходящий через единицу поверхности, называют плотностью потока излучения,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ,

$$E = \Delta Q / \Delta F. \quad (1.12)$$

Энергия излучения, падающего на тело  $E_{\text{пад}}$ , частично поглощается ( $E_A$ ), частично отражается ( $E_R$ ) и частично проникает сквозь него ( $E_D$ ):

$$E_{\text{пад}} = E_A + E_R + E_D.$$

Отношение  $A = E_A / E_{\text{пад}}$  называют коэффициентом поглощения,  $R = E_R / E_{\text{пад}}$  — коэффициентом отражения,  $D = E_D / E_{\text{пад}}$  — коэффициентом пропускания. Для абсолютно черного тела  $A = 1$ . Тела, для которых  $A < 1$ , называют серыми. Для абсолютно белого тела  $R = 1$ , для абсолютно прозрачного тела  $D = 1$ .

Согласно закону Кирхгофа, учитывающему способность различных тел к лучеиспусканию и лучепоглощению, коэффициент лучеиспускания любого тела при определенной температуре и определенной длине волны излучения пропорционален поглощательной способности данного тела при той же температуре и той же длине волны. При данной температуре тело излучает тем больше теплоты, чем больше оно поглощает лучей, т. е. чем оно чернее. Идеальное абсолютно черное тело поглощает все падающие на него лучи, поэтому абсолютно черное тело и излучает наибольшее количество тепловых лучей.

При термодинамическом равновесии отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а является одинаковой для всех тел функцией температуры и равно излучательной способности абсолютно черного тела  $E_0$  при той же температуре:

$$E_1 / A_1 = E_2 / A_2 = E_0 / A_0 = E_0 = f(T). \quad (1.13)$$



Отношение излучательной способности данного тела к излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре называют *степенью черноты тела*

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C}{C_0}. \quad (1.14)$$

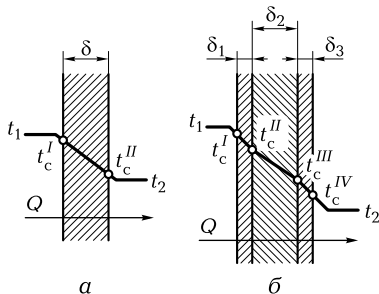
Следовательно, излучательную способность тела можно представить как степень его черноты, умноженную на излучательную способность абсолютно черного тела:  $E = \varepsilon E_0$

Степень черноты различных тел меняется от нуля до единицы и зависит от состояния поверхности, материала, температуры и других факторов.

**Сложный теплообмен.** Рассмотренные выше явления передачи теплоты протекают обычно одновременно. Например, когда тело (поверхность нагрева) омывается газом, то наряду с конвективным теплообменом имеется теплообмен излучением (радиацией). В системах отопления, вентиляции и кондиционирования наиболее часто встречающийся случай теплообмена — это передача теплоты от греющей жидкости нагреваемой среде (воздух, жидкость) через разделительную стенку (рис. 1.4, а). В этом случае вначале происходит теплоотдача от греющей жидкости со средней температурой  $t_1$  стенке с температурой  $t_c^I$ . Далее теплота передается в результате теплопроводности стенки ее противоположной поверхности с температурой  $t_c^{II}$  и, наконец, эта поверхность стенки отдает теплоту нагреваемой среде со средней температурой  $t_2$ . Тогда плотность теплового потока для однослойной стенки с учетом формул (1.6) и (1.10) примет вид

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.15)$$

где  $\alpha_1$  — коэффициент теплоотдачи от греющей жидкости левой (см. рис. 1.4, а) поверхности стенки;  $\delta$  — толщина стенки;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности разделительной стенки;  $\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи от правой поверхности стенки нагреваемой среде.



**Рис. 1.4.** Передача теплоты от греющей жидкости нагреваемой среде через разделительную стенку:

а — однослойную; б — многослойную

Если дробь  $\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$  обозначить буквой  $k$ , то формула для

подсчета количества теплоты, передаваемой через площадь  $F$  за время  $\tau$ , примет следующий вид:

$$W = qF\tau = k(t_1 - t_2)F\tau. \quad (1.16)$$

Величину  $k$  называют *коэффициентом теплопередачи* [измеряется в Вт/(м<sup>2</sup>·К)], а обратную ему величину — *полным термическим сопротивлением теплопередачи*  $R_0 = 1/k = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2$ .

Если разделительная стенка состоит из нескольких слоев, например из трех (рис. 1.4, б), то плотность теплового потока с учетом формул (1.7) и (1.10) будет

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.17)$$

а коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (1.18)$$

В многочисленных теплообменных устройствах, применяемых в любой области промышленности, в том числе в системах отопления, вентиляции и кондиционирования, основным рабочим процессом является теплообмен между теплоносителями. Такой теплообмен называют *теплопередачей*.

### 1.3. НАЗНАЧЕНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Котельная установка служит для выработки пара с заданными параметрами для паровых двигателей (турбин, поршневых машин), а также для нужд производства или отопления. В зависимости от назначения котельные установки бывают энергетические (обслуживающие электрические станции), производственные, производственно-отопительные и отопительные. Назначение котельной установки обуславливает ее производительность и параметры вырабатываемого пара.