

В. Н. Богословский В. П. Щеглов
Н. Н. Разумов

ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ



В. Н. БОГОСЛОВСКИЙ, В. П. ЩЕЛКОВ,
Н. Н. РАЗУМОВ

ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ

Издание второе, переработанное
и дополненное

*Допущено
Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся
по специальности «Водоснабжение и канализация»*



МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1980

ББК 38.762
Б 74
УДК 697(075.8)

Рецензент: кафедра теплогазоснабжения и вентиляции Горьковского инженерно-строительного института им. В. П. Чкалова (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. В. И. Бодров).

Богословский В. Н. и др.

Б 74 Отопление и вентиляция: Учебник для вузов/
В. Н. Богословский, В. П. Шеглов, Н. Н. Разумов. —
2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат,
1980. — 295 с., ил.

Приведены основные сведения о системах отопления, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также методы их расчетов. Даны примеры расчетов и необходимые справочные данные. Материал значительно обновлен и дополнен новыми техническими решениями. Изложены новые методики расчета теплового режима зданий и гидравлического расчета однотрубных систем отопления по характеристикам сопротивления.

Для студентов строительных вузов, обучающихся по специальности «Водоснабжение и канализация».

Б $\frac{30210-422}{047(01)-80}$ 173—80. 3206000000

ББК 38.762
6С9.4

© Стройиздат, 1980

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение эффективности общественного производства и качества работы во всех звеньях народного хозяйства, предусмотренное решениями XXV съезда КПСС, возможно только при постоянно возрастающих темпах научно-технического прогресса, внедрении передовой технологии, повышении творческой активности и производительности труда людей, улучшении условий их труда и быта. Необходимые для человека и технологических процессов условия внутренней среды на производстве, в жилых и общественных зданиях обеспечиваются с помощью систем отопления, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, поэтому создание и совершенствование этих систем непосредственно связаны с выполнением решений XXV съезда КПСС и указаний Генерального секретаря ЦК КПСС, Председателя Президиума Верховного Совета СССР товарища Л. И. Брежнева. На более полное использование научно-технического потенциала в нашей стране направлено и постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об улучшении планирования и усилении воздействия хозяйственного механизма на повышение эффективности производства и качества работы».

Масштабы строительства в нашей стране выдвинули строительную индустрию в число важнейших отраслей народного хозяйства. Строительная техника развивается на научной основе с широким использованием достижений смежных областей промышленности. Одной из составных ее частей является техника создания искусственного климата.

Учебная дисциплина, в которой излагаются научные и технические основы инженерных систем искусственного климата, носит название «Отопление и вентиляция». В ней рассматриваются вопросы расчета, проектирования, строительства и эксплуатации систем отопления, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Устройство этих систем и их отдельных элементов характеризуется высокой степенью сложности: большим многообразием схем, использованием сложных механизмов и приборов для регулирования и контроля их работы. Каждая из этих систем является предметом изучения в отдельных учебных курсах специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» строительных институтов. Данный учебник написан для специальности «Водоснабжение и канализация». Для инженера этой специальности теплоснабжение и вентиляция является родственным разделом, и в ряде случаев на производстве ему приходится сталкиваться с санитарно-техническими работами по этому профилю. В связи с этим специалист по водоснабжению и канализации должен хорошо знать и этот смежный раздел техники.

Основное назначение систем теплоснабжения и вентиляции состоит в обеспечении заданных климатических условий в помещениях зданий. Создание необходимых санитарно-гигиенических условий в помещениях для работающих должно быть увязано с требованиями технологического процесса.

Поддержание определенных параметров среды в помещении в течение года важно и в целях обеспечения долговечности конструкций. Это особенно существенно для многих зданий и сооружений систем водоснабжения и канализации, которым свойственна высокая влажность воздуха при сравнительно низкой температуре. Такие условия часто приводят к преждевременному разрушению конструкций. В настоящее время особую актуальность получили вопросы долговечности зданий и сооружений из панелей и других крупносерийных элементов с использованием новых строительных материалов. Успех полносерийного строительства в большой мере связан с правильным решением вопросов строительной теплотехники, отопления и вентиляции.

Решение отопительно-вентиляционных задач в нашей стране осложняется исключительным разнообразием климата на ее территории. Срок пользования отоплением и вентиляцией в нашей стране больше, чем во многих других странах. На территории Якутии, в районе Оймякона, расположен «полюс холода», где температура понижается до минус 71° С. Во многих пунктах северо-восточной части страны низкие температуры сочетаются с сильными

ветрами. На большей части территории холодный период столь продолжителен, что требуется непрерывное отопление зданий. В то же время для юга страны — Средняя Азия и Черноморское побережье — характерна высокая температура, например в районе Термеза (Узбекистан) она достигает 48° С. В таких жарких районах нормальное самочувствие человека летом в зданиях без применения кондиционирования воздуха невозможно.

Около $\frac{1}{3}$ всего топлива, сжигаемого в нашей стране, расходуется для целей отопления и вентиляции зданий. Поэтому с экономической точки зрения и в связи с большой напряженностью энергетического баланса страны оказывается очень важным рациональное использование топлива в этих системах. Правильное инженерное решение теплоснабжения и вентиляции зданий в масштабах всей страны может дать заметный экономический эффект.

Решениями XXV съезда КПСС предусмотрено снижение норм расхода котельно-печного топлива на 3—4%, а электрической и тепловой энергии на 5%. Сложность этой задачи связана с многообразием видов используемого топлива. Если во многих странах за рубежом в отопительных установках используется преимущественно один вид топлива (в Западной Европе — мазут, в странах Восточной Европы — бурый уголь), то в нашей стране применяются различные виды местного топлива — газ, мазут, уголь, торф, сланцы, дрова и т. д.

Эффективность капитальных вложений в строительство определяется в значительной мере стоимостью сооружения систем, особенно кондиционирования воздуха, доля которой в общем объеме затрат для ряда современных производств (радиотехническая промышленность, промышленность искусственного волокна) составляет до 30%. В расходах на эксплуатацию здания и его инженерного оборудования доля, приходящаяся на системы кондиционирования, может составлять 60—80%. Эти эксплуатационные расходы за обычный срок службы здания соизмеримы с полной стоимостью его постройки.

В настоящее время большинство городов имеет разветвленную систему теплоснабжения. Создаются системы дальнего прямооточного теплоснабжения. В практике строительства используются самые различные виды как отопительных, так и вентиляционных систем. В крупнообъемных зданиях наряду с радиаторными нашли применение панельно-лучистые, воздушные и конвекторные системы отопления. Начинают применяться системы электрического и газового отопления (газовые инфракрасные излучатели). В последние годы значительно возрос промышленный выпуск кондиционеров. Большинство крупных общественных зданий и многие промышленные производства обслуживаются системами кондиционирования воздуха. Ведутся работы по организации центрального хладоснабжения, выявлению и использованию дешевых источников тепла и холода; в системах кондиционирования используются озонирование, ионизация воздуха и пр. Таковы тенденции развития отдельных направлений техники теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха.

С учетом специфики предстоящей практической работы выпускника факультета «Водоснабжение и канализация» основное внимание в настоящем курсе уделено системам отопления и тепловлажностному режиму зданий, меньшее — системам вентиляции и кондиционирования воздуха. Системы теплоснабжения, а также монтаж и эксплуатация систем рассмотрены в общих чертах. При изложении курса учитывалось наличие в учебном плане специальности таких дисциплин, как «Санитарно-технические устройства зданий», «Технология и организация строительства», «Основы автоматизации» и др.

Предисловие и §§ 1—6, 8, 14—19, 26, 27, 48, 49, 63—67 написаны д-ром техн. наук, проф. В. Н. Богословским, остальные параграфы написаны канд. техн. наук, доц. Н. Н. Разумовым, которым использован материал первого издания, написанный канд. техн. наук, доц. В. П. Щегловым. Приложения составлены авторами совместно.

Авторы выражают признательность рецензенту — коллективу кафедры теплогасоснабжения и вентиляции Горьковского инженерно-строительного института им. В. П. Чкалова, возглавляемой канд. техн. наук, доц. В. И. Бодровым, за ценные замечания.

Глава I. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗДАНИЙ

§ 1. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ПОМЕЩЕНИИ

Люди, находящиеся в жилых, общественных и промышленных зданиях, а также технологические процессы, осуществляемые в промышленных цехах, требуют поддержания в помещениях необходимых метеорологических условий — определенного микроклимата. Ограждающие конструкции зданий защищают помещения от непосредственных атмосферных воздействий, однако только внешней защиты для круглогодичного поддержания необходимых внутренних условий недостаточно. Требуемые условия создаются с помощью систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, или, как их собирательно можно назвать, систем кондиционирования микроклимата. В закрытых помещениях в зависимости от их назначения и характера проводимой в них работы создаются различные температурно-влажностные условия.

В человеческом организме в результате физиологических процессов непрерывно вырабатывается тепло. Это тепло должно быть отдано окружающей среде, так как организм человека стремится сохранять постоянную температуру ($36,6^{\circ}\text{C}$).

Количество тепла, вырабатываемого в организме, различно и зависит от возраста, индивидуальных особенностей человека, степени тяжести выполняемой им работы и др. В спокойном состоянии взрослый человек вырабатывает 88—105 Вт, при тяжелой работе — 300—460 Вт, а при максимально возможных кратковременных нагрузках — до 1000 Вт. Основная часть этого тепла отдается окружающей среде и только небольшая часть (меньше 10%) теряется в результате естественного обмена веществ.

Отдача тепла происходит путем лучистого теплообмена с окружающими поверхностями, конвективной теплоотдачи воздуху и в результате испарения влаги с поверхности тела. При интенсивной физической работе основная доля отдаваемого тепла расходуется на испарение пота. Взрослый человек в спокойном состоянии при обычных условиях теряет приблизительно половину тепла излучением, четверть конвекцией, а четверть тепла расходует на испарение.

На рис. I.1 приведен график зависимости явной теплоотдачи, а также тепла, идущего на испарение пота человека, выполняющего работу различной тяжести, от температуры помещения. Организм человека имеет систему терморегуляции и приспосабливается к некоторым изменениям климатических условий. Однако эта способность организма ограничена, и поэтому метеорологические парамет-

Т а б л и ц а 1.1. Расчетные метеорологические условия в рабочей зоне производственных, вспомогательных, жилых и общественных

Характеристика помещений	Категория работы	Для холодного период года ($t_{\text{н}}$ ниже 10 °С)						
		на постоянных рабочих местах или в обслуживаемой зоне						$t_{\text{в}}$, допустимая вне постоянных рабочих мест, °С
		оптимальные			допустимые			
		$t_{\text{в}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Phi_{\text{в}}, \%$	$v_{\text{в}}, \text{ м/с}$	$t_{\text{в}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Phi_{\text{в}}, \%$	$v_{\text{в}}, \text{ м/с}$	
							не более	
Производственные с незначительными избытками явно-го тепла (23,2 Вт/м³ и менее)	Легкая	20—22	60—30	≤0,2	17—22	75	0,3	15—22
	Средней тяжести	17—19	60—30	≤0,3	15—20	75	0,5	13—20
	Тяжелая	16—18	60—30	≤0,3	13—18	75	0,5	12—18
Производствен-ные со значи-тельными из-бытками явно-го тепла (более 23,2 Вт/м³)	Легкая	20—22	60—30	≤0,2	17—24	75	0,5	15—26
	Средней тяжести	17—19	60—30	≤0,3	16—22	75	0,5	15—24
	Тяжелая	16—18	60—30	≤0,3	13—17	75	0,5	12—19
Помещения жи-лых и общест-венных зданий и вспомо-гатель-ных зданий предприятий	—	20—22	45—30	0,1—0,15	18—22	65	0,3	—

* В СНиП расчетные наружные параметры климата делятся на категории

водственных помещений и в обслуживаемой зоне других помещений зданий

Для теплого периода года ($t_H = 10^\circ\text{C}$ и выше)

Для теплого периода года ($t_n = 10^\circ\text{C}$ и выше)										
на постоянных рабочих местах или в обслуживаемой зоне										t_B , допусти- мая вне по- стоянных ра- бочих мест, $^\circ\text{C}$
оптимальные			допустимые							
t_B , $^\circ\text{C}$	φ_B , %	v_B , м/с	t_B , $^\circ\text{C}$	φ_B , %, не более, при t_B , $^\circ\text{C}$					v_B , м/с	
				28	27	26	25	≤ 24		
22—25	60—30	0,2—0,5	Не более чем на 3°C выше рас- четной тем- пературы наружного воздуха (параметры A^*), но не выше 28°C То же, но не вы- ше 26°C	55	60	65	70	75	0,3—0,5	Не более чем на 3°C выше рас- четной тем- пературы наружного воздуха (парамет- ры A)
20—23	60—30	0,2—0,5		55	60	65	70	75	0,3—0,7	
18—21	60—30	0,3—0,7		—	—	65	70	75	0,5—1	
22—25	60—30	0,2—0,5	Не более чем на 5°C выше рас- четной тем- пературы наружного воздуха (параметры A), но не выше 28°C То же, но не выше 26°C	55	60	65	70	75	0,3—0,7	Не более чем на 5°C выше рас- четной температу- ры наруж- ного возду- ха (пара- метры A)
20—23	60—30	0,2—0,5		55	60	65	70	75	0,5—1	
18—21	60—30	0,3—0,7		—	—	65	70	75	0,5—1	
22—25	60—30	$\leq 0,25$	Не более чем на 3°C выше рас- четной температу- ры наруж- ного возду- ха (пара- метры A)	65					$\leq 0,5$	—

А, Б и В.

ры в помещении должны достаточно устойчиво поддерживаться системами кондиционирования микроклимата на заданном уровне.

Микроклимат помещения характеризуется температурой внутреннего воздуха t_v , радиационной температурой помещения (осредненной температурой его ограждающих поверхностей) t_R , скоростью движения (подвижностью) v_v и относительной влажностью ϕ_v воздуха. Сочетания этих параметров, обеспечивающие хорошее самочувствие человека, называют *зонами комфорта*. Поскольку скорость движения и относительная влажность воздуха имеют обычно незначительные колебания, особенно важно поддержание в помещении определенных температурных условий. Зоны комфортных сочетаний t_v и t_R для гражданских зданий в холодный и теплый периоды года приведены на рис. 1.2. Параметры микроклимата, определяющие эти зоны, являются *расчетными внутренними условиями* в помещении при проектировании ограждений здания и отопительно-вентиляционных систем.

Необходимо различать *оптимальные внутренние условия*, которые являются расчетными для автоматически регулируемых систем, и *допустимые внутренние условия*, которые должны быть обеспечены обычными системами. Расчетные внутренние условия в рабочей зоне производственных помещений и в обслуживаемой зоне общественных и жилых зданий в холодный и теплый периоды года приведены в табл. 1.1. Эти условия должны быть выполнены во всем объеме рабочей (обслуживаемой) зоны помещения (в пространстве высотой 2 м над уровнем пола) или на отдельных рабочих местах.

Состояние комфорта должно быть также обеспечено при нахождении человека в непосредственной близости от нагретых или охлажденных поверхностей.

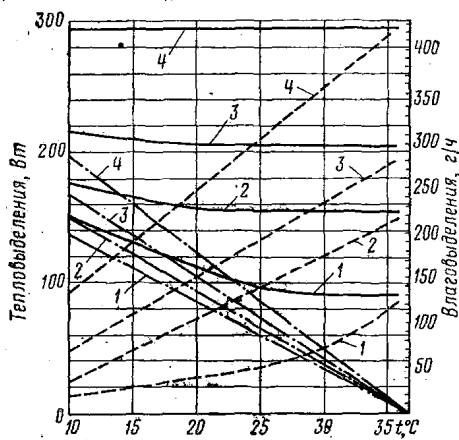


Рис. 1.1. График зависимости отдачи тепла и влаги человеком от температуры помещения и тяжести совершаемой им работы

1 — в состоянии покоя; 2 — при легкой работе; 3 — при работе средней тяжести; 4 — при тяжелой работе; — — — полное тепло; - - - скрытое тепло, идущее на испарение влаги, и количество испарившейся влаги; — · — · — явное тепло

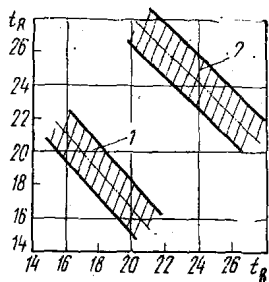


Рис. 1.2. Зоны комфортных сочетаний температур t_v и t_R в жилых помещениях

1 — для холодного периода года; 2 — для теплого периода года

§ 2. ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Теплопередача является физическим процессом обмена теплом через разделяющую стенку между средами, имеющими разную температуру. Этот сложный процесс складывается из трех элементарных видов обмена теплом: теплопроводности, конвекции и излучения.

В простейшей форме эти виды обмена теплом могут быть охарактеризованы следующим образом.

Теплопроводность условно можно представить как передачу тепла в теле от частицы к частице, когда не происходит их перемещения. Таким образом осуществляется передача тепла в твердых телах. В жидкостях и газах явление теплопроводности в чистом виде возможно только в условиях, когда нет переноса частиц.

Согласно закону Фурье, плотность теплового потока q_T , Вт/м², в теле, где передача тепла происходит путем теплопроводности, пропорциональна градиенту температуры $\partial t/\partial n$, °С/м:

$$q_T = -\lambda \partial t/\partial n. \quad (1.1)$$

Множитель пропорциональности в этой формуле λ есть коэффициент теплопроводности (теплопроводность); измеряемый в Вт/(м·°С).

В случае когда передача тепла происходит в стационарных условиях (неизменных во времени) через плоскую однородную стенку (рис. 1.3, а) в направлении, перпендикулярном ее поверхности (одномерное температурное поле), уравнение теплопроводности можно записать в виде:

$$Q_T = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F, \quad (1.2)$$

где Q_T — тепловой поток, Вт; δ — толщина стенки, м; t_1 и t_2 — температуры на ее поверхностях, °С; F — площадь поверхности стенки, м².

Конвективный теплообмен — это перенос тепла в жидкостях или газах перемещающимися частицами.

Благодаря конвекции происходит обмен теплом между поверхностью твердого тела и омывающим эту поверхность воздухом (рис. 1.3, б).

Конвективный теплообмен определяется законом Ньютона, согласно которому тепловой поток Q_K , Вт, передаваемый конвекцией, равен:

$$Q_K = \alpha_K (t_1 - t_2) F, \quad (1.3)$$

где α_K — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°С); t_1 и t_2 — температуры поверхности и воздуха, °С.

Лучистый теплообмен происходит при помощи электромагнитных волн между телами, разделенными лучепрозрачной средой (рис. 1.3, в). Тепловая энергия, превращаясь на

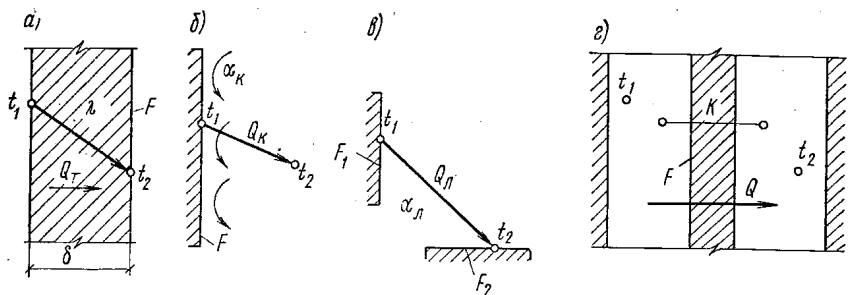


Рис. 1.3. Основные виды обмена теплом

а — теплопроводность; б — конвективный теплообмен; в — лучистый теплообмен; г — теплопередача

поверхности тела в лучистую энергию, передается через лучепрозрачную среду (воздух) на поверхность другого тела, где вновь превращается в тепловую (см. рис. 1.3, в). По закону Стефана—Больцмана тепловой поток $Q_{\text{л}}$, Вт, излучаемый поверхностью F_1 , м², имеющей абсолютную температуру T_1 , К, на поверхность F_2 , м², с температурой T_2 , К, равен:

$$Q_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 \varphi_{1-2}, \quad (1.4)$$

где $C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения системы тел, между которыми происходит лучистый теплообмен, Вт/(м² · К⁴); φ_{1-2} — коэффициент облученности (величина безразмерная, зависящая только от расположения и размеров поверхностей и показывающая долю лучистого потока, приходящуюся на поверхность F_2 , от всего потока, излучаемого поверхностью F_1).

Обычно для расчета лучистого теплообмена пользуются более простой формулой:

$$Q_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} (t_1 - t_2) F_1, \quad (1.5)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент лучистого теплообмена на поверхности F_1 , Вт/(м² × °С); t_1 и t_2 — температуры поверхностей, между которыми происходит теплообмен, °С.

По отдельности рассмотренные виды обмена теплом практически не встречаются. Обычно они сопутствуют друг другу, при этом их целесообразно рассматривать в совокупности как одно целое. Этот единый процесс передачи тепла от одной среды к другой (рис. 1.3, г) называют *теплопередачей*. Математическая формула для расчета теплопередачи имеет вид:

$$Q = K (t_1 - t_2) F, \quad (1.6)$$

где Q — тепловой поток, Вт, передаваемый от среды, имеющей температуру t_1 , к среде, имеющей температуру t_2 ; K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · °С).

Во всех рассмотренных случаях теплообмен выражается математическими зависимостями, в которых тепловой поток пропорцио-

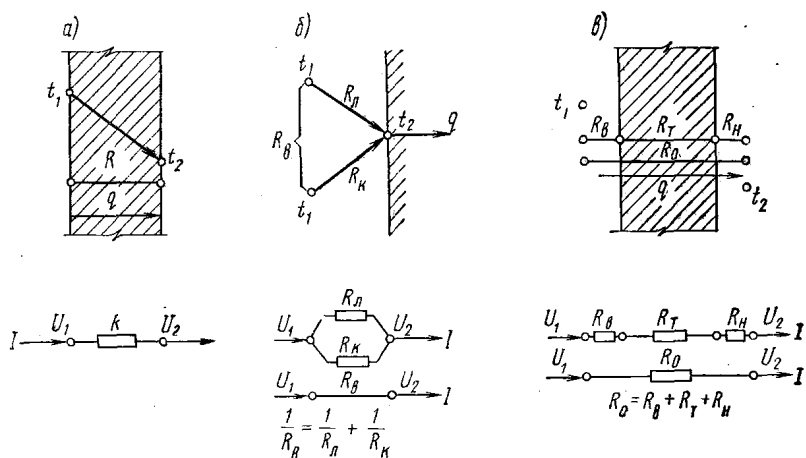


Рис. 1.4. Аналогия между процессами передачи тепла и электрического тока
 а — простейший случай; б — параллельное расположение сопротивлений; в — последовательное расположение сопротивлений

нален соответствующей разности температур в первой степени. Множители пропорциональности в этих зависимостях служат показателями проводимости тепла — λ/δ , α_k , α_l , K соответственно в формулах (1.2), (1.3), (1.5), (1.6).

Процесс обмена теплом аналогичен по принятому математическому описанию процессу передачи электрического тока (рис. 1.4, а). В соответствии с законом Ома для расчета электропередачи также принята линейная зависимость между силой тока I и разностью напряжений $U_1 - U_2$:

$$I = \frac{1}{R} (U_1 - U_2). \quad (1.7)$$

Множителем пропорциональности является величина $1/R$, обратная электрическому сопротивлению R среды, через которую происходит передача электрического тока.

В соответствии с *электротепловой аналогией* при рассмотрении переносов тепла часто оказывается удобным пользоваться не показателями проводимости тепла, а обратными величинами — сопротивлениями обмену теплом. Термические сопротивления обычно обозначаются буквой R с соответствующими индексами. В рассмотренных на рис. 1.4 случаях сопротивлением теплопроводности будет величина $R_T = \delta/\lambda$, сопротивлениями конвективному и лучистому теплообменам — величины $R_K = 1/\alpha_K$ и $R_L = 1/\alpha_L$, сопротивлением теплопередаче — $R = 1/K$.

Свойства процесса теплопередачи, которые полностью аналогичны соответствующим свойствам процесса электропередачи, удобно использовать при расчете сложных конструкций ограждений, когда по ходу движения тепла имеются параллельно (рис. 1.4, б) и последовательно (рис. 1.4, в) соединенные элементы.

Когда термические сопротивления R_i расположены последовательно по направлению движения потока тепла (рис. I.4, в), общее сопротивление R равно их сумме:

$$R = \sum R_i. \quad (I.8)$$

Если сопротивления расположены параллельно относительно проходящего через них потока тепла (рис. I.4, б), то общая проводимость такой системы $1/R$ равна сумме параллельно расположенных проводимостей $1/R_i$:

$$\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}. \quad (I.9)$$

§ 3. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ

Передача тепла из помещения наружной среде через ограждения является сложным процессом. При обычных условиях температура внутренней поверхности наружных ограждений τ_b ниже температуры воздуха помещения t_b и температуры поверхностей внутренних ограждений, обращенных в помещение, t_R . В связи с этим происходит поступление тепла на поверхность наружного ограждения от воздуха конвекцией и от поверхностей внутренних ограждений излучением.

Если условно принять, как это обычно делают в практических расчетах, что температуры внутреннего воздуха и поверхностей внутренних ограждений помещения равны между собой ($t_b = t_R$), то тепловой поток Q_1 (рис. I.5, а), воспринятый внутренней поверхностью наружного ограждения вследствие конвективного и лучистого теплообмена, составит:

$$Q_1 = [\alpha_k (t_b - \tau_b) + \alpha_{л} (t_R - \tau_b)] F = \alpha_b (t_b - \tau_b) F \quad (I.10)$$

или

$$Q_1 = \frac{1}{R_b} (t_b - \tau_b) F, \quad (I.11)$$

где α_b — коэффициент теплообмена на внутренней поверхности ограждения, Вт/(м² · °С); R_b — сопротивление теплообмену на внутренней поверхности, м² · °С/Вт.

Передача тепла конвекцией и излучением происходит в данном случае как бы параллельно, поэтому для получения результирующей проводимости в соответствии с формулой (I.9) необходимо сложить составляющие проводимости:

$$\alpha_b = \alpha_k + \alpha_{л}. \quad (I.12)$$

Наружная поверхность ограждения передает тепло окружающей среде также конвекцией и излучением. Конвекцией тепло передается наружному воздуху, а излучением — окружающим более холодным поверхностям. Обычно также условно принимают, что окружающие здание поверхности имеют температуру наружного воздуха.

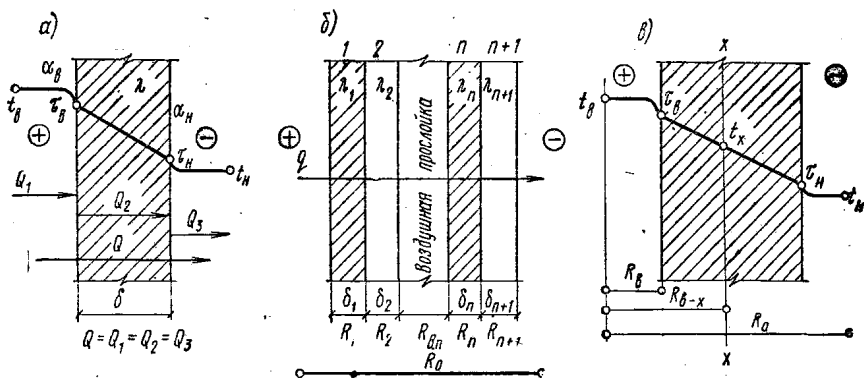


Рис. 1.5. Теплопередача через ограждение

а — однослойное; б — многослойное; в — определение температуры в произвольном сечении ограждения

Тогда отданный наружной поверхностью тепловой поток Q_3 , как и в формуле (I.10), составит:

$$Q_3 = \alpha_n (\tau_n - t_n) F \quad (I.13)$$

или

$$Q_3 = \frac{1}{R_n} (\tau_n - t_n) F, \quad (I.14)$$

где α_n — коэффициент теплообмена на наружной поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; R_n — соответствующее ему сопротивление, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; τ_n и t_n — температуры наружной поверхности ограждения и наружного воздуха, $^\circ\text{C}$.

Тепловой поток Q_2 , проходящий через толщу ограждения, определяется разностью температур на его поверхностях и его конструкцией. Если ограждение однослойное и состоит из однородного материала, как это изображено на рис. 1.5, а, то

$$Q_2 = \frac{\lambda}{\delta} (\tau_B - \tau_n) F = \frac{1}{R_T} (\tau_B - \tau_n) F. \quad (I.15)$$

В условиях установившегося теплового состояния, когда внутренние и наружные температуры и другие характеристики процесса остаются неизменными во времени, тепловой поток Q_1 , воспринятый внутренней поверхностью ограждения, будет равен тепловому потоку Q_2 , проходящему через толщу ограждения, и тепловому потоку Q_3 , отдаваемому наружной поверхностью:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q. \quad (I.16)$$

Общая формула для определения потока тепла Q , теряемого помещением через данное ограждение, может быть получена из выражений (I.8), (I.11), (I.15), (I.14) в виде:

$$Q = \frac{1}{R_B + R_T + R_n} (t_B - t_n) F = \frac{1}{R_0} (t_B - t_n) F. \quad (I.17)$$

Поток тепла последовательно преодолевает сопротивления теплообмену на внутренней поверхности $R_{в}$, теплопроводности материала ограждения $R_{т}$ и теплообмену на наружной поверхности $R_{н}$, поэтому с учетом выражения (1.8) общее сопротивление теплопередаче через ограждение R_o равно сумме этих сопротивлений, т. е.

$$R_o = R_{в} + R_{т} + R_{н}. \quad (1.18)$$

Если ограждение состоит из нескольких плоских слоев материала, расположенных перпендикулярно направлению теплового потока (например, внутренняя штукатурка, кирпичная стена, наружная штукатурка), то термическое сопротивление всей толщи ограждения $R_{т}$ будет равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев ограждения R_n :

$$R_{т} = \Sigma R_n. \quad (1.19)$$

Плоская воздушная прослойка, расположенная в ограждении перпендикулярно направлению теплового потока, также должна быть учтена в этой сумме как дополнительное последовательно расположенное сопротивление $R_{в.п}$.

Таким образом, в общем случае сложного многослойного ограждения с воздушной прослойкой (см. рис. 1.5, б) общее сопротивление теплопередаче через ограждение равно:

$$R_o = R_{в} + \Sigma R_n + R_{в.п} + R_{н}. \quad (1.20)$$

Коэффициент теплопередачи ограждения K (величина, обратная R_o) в общем случае равен:

$$K = \frac{1}{R_o} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{в}} + \Sigma (\delta_n / \lambda_n) + R_{в.п} + \frac{1}{\alpha_{н}}}. \quad (1.21)$$

где δ_n и λ_n — толщины слоев ограждения и теплопроводности их материалов.

Из рассмотрения единиц величин можно установить следующее. Коэффициент теплопередачи ограждения K есть величина, численно равная тепловому потоку в ваттах, проходящему в стационарных условиях через 1 м^2 площади ограждения при разности температур внутреннего и наружного воздуха 1°С [$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С})$]. Сопротивление теплопередаче ограждения R_o численно равно такой разности температур внутреннего и наружного воздуха в градусах Цельсия, которая обеспечивает прохождение через 1 м^2 площади ограждения теплового потока в 1 Вт [$^\circ \text{С} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$].

Сложнее рассчитать передачу тепла через ограждение с неоднородной конструкцией по поверхности, перпендикулярной направлению теплового потока. В этом случае нарушается одномерность температурного поля, и для точного решения необходим расчет сложного двухмерного температурного поля.

Если поверхность ограждения разбить на отдельные площади, в пределах которых конструкция однородна в направлении теплового потока, и условно считать, что в пределах такой площади сохраняется одномерность температурного поля, то для теплового расчета можно воспользоваться формулами (1.8) и (1.9). Термическое сопротивление толщии ограждения R_T в равенстве (1.18) в соответствии с формулой (1.9) получает выражение

$$\frac{1}{R_T} = \frac{\sum \frac{1}{R_n} F_n}{\sum F_n}; \quad R_T = \frac{\sum F_n}{\sum \frac{1}{R_n} F_n}, \quad (1.22)$$

где F_n — отдельные площади ограждения, м^2 , в пределах которых конструкция однородна в направлении, перпендикулярном направлению теплового потока; R_n — термическое сопротивление толщии ограждения в пределах этих площадей. $^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$.

Если конструкция ограждения состоит из неоднородных материалов как в параллельном, так и в перпендикулярном направлении по отношению к направлению теплового потока, а толщины слоев и стороны отдельных площадей имеют размеры одного порядка, то пользуются следующим условным расчетным методом. Определяют сопротивление теплопроводности толщии ограждения по формуле (1.22) и обозначают эту величину $R_{T\parallel}$, подчеркивая этим обозначением, что сопротивление определено в результате разбивки ограждения сечениями, параллельными теплового потока. Затем разбивают ограждение на характерные слои плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока. Определяют термические сопротивления этих слоев и суммируют их между собой в соответствии с формулой (1.8) как термические сопротивления слоев, последовательно расположенных по направлению теплового потока. Полученное таким образом термическое сопротивление толщии ограждения обозначают $R_{T\perp}$ в связи с тем, что эта величина рассчитана разбивкой ограждения на слои плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока.

Установлено, что в данном случае фактическое сопротивление теплопроводности ΣR_n , которое надо подставлять в формулу (1.20), составляет:

$$\Sigma R_n \approx \frac{2R_{T\perp} + R_{T\parallel}}{3}. \quad (1.23)$$

Для решения многих задач нужно не только определить тепловой поток, который проходит через ограждение, но и установить распределение температуры на его поверхности и в толще.

Из рассмотрения уравнений (1.11)—(1.17), а также в связи с электротепловой аналогией можно установить, что падение температуры в пределах каждого слоя многослойного ограждения пропорционально его термическому сопротивлению. Перепад между тем-

пературами воздуха помещения и внутренней поверхности ограждения $t_b - \tau_b$ получим из соотношения

$$\frac{t_b - \tau_b}{t_b - t_n} = \frac{R_b}{R_o};$$

$$t_b - \tau_b = R_b \frac{t_b - t_n}{R_o}. \quad (1.24)$$

Температура внутренней поверхности ограждения из выражения (1.24) равна:

$$\tau_b = t_b - \frac{R_b}{R_o} (t_b - t_n). \quad (1.25)$$

Рассуждая аналогичным образом, получаем температуру в любом произвольном сечении ограждения (см. рис. 1.5, в):

$$t_x = t_b - \frac{R_{b-x}}{R_o} (t_b - t_n), \quad (1.26)$$

где кроме известных обозначений R_{b-x} — сопротивление теплопередаче от внутренней среды помещения до сечения x в толще ограждения.

§ 4. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАЖДЕНИЙ

Условия теплопередачи через ограждения часто отличаются от стационарных. Температура наружного воздуха постоянно изменяется, испытывая суточные, сезонные и другой продолжительности колебания. Температура внутреннего воздуха может колебаться при изменении теплоотдачи нагревательных приборов, а также бытовых и технологических тепловыделений. Эти колебания температуры часто близки к гармоническим. Под их влиянием в ограждении происходят изменения температур и тепловых потоков, наблюдается сложное явление нестационарной теплопередачи.

Свойство ограждения сопротивляться изменениям температуры и тепловых потоков называется *теплоустойчивостью*. Теплоустойчивость ограждения проявляется в гашении проходящей через него волны колебаний температуры. По направлению движения температурной волны амплитуда ее изменений уменьшается и при определенных условиях может полностью затухать в толще ограждения.

Способность ограждения периодически аккумулировать и отдавать тепло под влиянием гармонических колебаний температуры его поверхности определяют *коэффициентом теплоусвоения* s . Он равен отношению амплитуды колебания теплового потока, проходящего через поверхность, A_q к амплитуде колебания температуры поверхности A_{τ_b} . Если ограждение однородно и имеет большую толщину, то коэффициент теплоусвоения s является одной из теплофизических характеристик материала этого ограждения. Величи-