

В. И. БОДРОВ, М. В. БОДРОВ, В. Ф. БОДРОВА, В. Ю. КУЗИН

# СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Учебное пособие

Международный проект *TEMPUS* 530793  
«Магистерские программы по возобновляемым источникам энергии  
и энергоэффективности в зданиях в Центральной Азии и России» (*MAPREE*)



Нижний Новгород  
2015

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

В. И. Бодров, М. В. Бодров, В. Ф. Бодрова, В. Ю. Кузин

## Строительная теплофизика

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

Нижний Новгород  
ННГАСУ  
2015

ББК 38.762  
С86  
УДК 697.1:699.8

**Рецензенты:**

- А. М. Береговой* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»  
*М. Н. Кучеренко* – кандидат технических наук, доцент, зав. каф. «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»

Бодров В. И. Строительная теплофизика: учеб. пособие / В. И. Бодров, М. В. Бодров, В. Ф. Бодрова, В. Ю. Кузин; Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2015. – 156 с. ISBN 978-5-528-00064-0

Ключевые слова: излучение, конвекция, микроклимат, потенциал влажности, сопротивление влагопередаче, сопротивление теплопередаче, тепловой режим помещений, теплопроводность, теплофизика.

Изложены теплофизические основы техники отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха с использованием теории тепло- и массообмена, термодинамики состояния и переноса тепла и влаги, аэродинамики сложных систем, климатологии и санитарной гигиены. Рассмотрены инженерные методы расчета лучисто-конвективного и струйного теплообмена в помещении, стационарной и нестационарной тепловлагопередачи через ограждения, воздушного режима здания, теплоустойчивости, регулирования теплового режима, определения расчетных характеристик климата, годового расхода энергии в системах кондиционирования микроклимата. Приводится практикум по расчету тепловой защиты наружных ограждающих конструкций зданий по действующим методикам проектирования.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 08.04.01 Строительство, профили «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» и «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях», 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Тепломассообменные процессы и установки», 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Промышленная теплоэнергетика» и 08.03.01 Строительство, профиль «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных пунктов» и «Промышленное и гражданское строительство».

ББК 38.762

ISBN 978-5-528-00064-0

© В.И. Бодров, М.В. Бодров,  
В.Ф. Бодрова, В.Ю. Кузин, 2015  
© ННГАСУ, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Строительная теплофизика» предназначено для формирования общих и специальных знаний о явлениях передачи теплоты, переноса влаги, фильтрации воздуха применительно к вопросам строительства и овладения методиками расчета теплофизических показателей ограждающих конструкций и комфортности помещений.

Учебное пособие разработано и предназначено для магистрантов, обучающихся в ННГАСУ по направлению подготовки магистратуры 08.04.01 Строительство, профиль «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях» в соответствии с Международным проектом *TEMPUS* 530793 «Магистерские программы по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности в зданиях в Центральной Азии и России» (*MAPREE*).

Данное учебное пособие может быть успешно использовано для обучения студентов по направлениям подготовки магистратуры – 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Тепломассообменные процессы и установки», 08.04.01 Строительство, профиль «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» и бакалавриата – 08.03.01 Строительство, профили «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных пунктов» и «Промышленное и гражданское строительство», а также 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Промышленная теплоэнергетика».

Для рассмотрения процессов тепло- и массообмена, создающих микроклимат помещения, необходимо знать: требования к характеристикам внутреннего климата и факторы, влияющие на них; законы взаимодействия ограждений с внутренней и наружной средами; тепло- и массообменные процессы обогревающих и охлаждающих поверхностей и потоков воздуха систем кондиционирования в помещении; явления, происходящие в конструкциях при передаче через них теплоты, влаги и воздуха; характеристики наружного климата и законы их изменения.

Климат нашей страны исключительно многообразен: в районе Оймякона (Якутия) расположен полюс холода обжитых районов Земли, где температура понижается до  $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$  при среднегодовой температуре  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Полюс абсолютного холода Земли расположен в районе станции «Восток» в Российском секторе Антарктиды, где температура понижается до  $-86,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  при среднегодовом ее значении около  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Во многих пунктах побережья Ледовитого океана отопительный период продолжается круглый год, в то время как в южных районах страны он продолжается не более трех месяцев. Но в этих районах необходимо защищать здания от перегрева солнечной радиацией и обеспечивать искусственное охлаждение помещений в течение жаркого периода года.

Строительная теплофизика рассматривает вопросы, относящиеся к области деятельности специалистов по конструкциям зданий и отопительно-вентиляционным системам. Теплотехники-строители занимаются вопросами создания микроклимата в помещениях с помощью систем кондиционирования (отопления, охлаждения и вентиляции) и с учетом влияния наружного климата через ограждения. Строители, специалисты по конструкциям зданий учитывают режим ограждений под действием внутреннего и наружного климата для оценки долговечности конструкций и особенностей их эксплуатации.

Цель настоящего пособия – сформировать подход к физической сущности тепловоздушного и влажностного режимов здания как к основе технологии обеспечения параметров микроклимата, а также помочь усвоить базовые инженерные методики расчета наружных ограждающих конструкций жилых и общественных зданий.

Пособие содержит сведения о теплотехнической роли внешней оболочки здания и работе инженерных систем, обеспечивающих его микроклимат, как о единой энергетической системе; теоретические положения и методы расчета, необходимые в профессиональной работе, т.е. при проектировании и эксплуатации систем обеспечения параметров микроклимата зданий.

Данное пособие условно разделено на две части. В первой части (главы 1...6) приведены фундаментальные научные положения строительной теплофи-

зики, как науки. Вторая часть (глава 7) содержит практикум по расчету тепловой защиты зданий в соответствии с действующими методиками проектирования.

В результате освоения курса студент должен знать параметры, определяющие тепловой, воздушный и влажностный режим здания, в том числе климатологическую и микроклиматическую терминологию; законы передачи теплоты, влаги, воздуха в материалах, конструкциях и элементах систем здания и величины, определяющие тепловые и влажностные процессы; нормативы теплозащиты наружных ограждающих конструкций, нормирование параметров теплозащитной оболочки зданий. Студент должен уметь формулировать и решать задачи передачи теплоты и массы во всех элементах здания, выполнять тепло-технический расчет наружных ограждающих конструкций, а также рассчитывать коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена на поверхностях, обращенных в помещение.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам учебного пособия: доктору технических наук, профессору А.М. Береговому (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства); кандидату технических наук, доценту М.Н. Кучеренко (Тольяттинский государственный университет) за ценные советы и замечания, сделанные при рецензировании рукописи учебного пособия.

## Глава 1. ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

### 1.1. Тепловой режим помещения

*Тепловым режимом* помещения в здании называется совокупность всех факторов и процессов, определяющих тепловую обстановку в нем.

Наружные ограждения (пассивные элементы систем кондиционирования микроклимата) защищают помещения от непосредственных атмосферных воздействий, а системы кондиционирования воздуха, включающие системы охлаждения – нагрева воздуха и вентиляции (активные элементы систем кондиционирования микроклимата) поддерживают заданные параметры внутренней среды. Под действием разности наружной и внутренней температур, солнечной радиации и ветра помещение теряет теплоту через ограждения зимой и перегревается летом. Гравитационные силы, действие ветра и вентиляция создают перепады давлений, приводящие к перетеканию воздуха между помещениями и его фильтрации через поры материала и неплотности ограждений. Атмосферные осадки, влаговыделения в помещениях, разность влажности внутреннего и наружного воздуха приводят к влагообмену через ограждения, под влиянием которого возможно увлажнение материалов и ухудшение защитных свойств и долговечности наружных стен и покрытий.

При эксплуатации зданий определяющим является тепловой режим помещений, от которого зависит ощущение теплового комфорта людей, нормальное протекание производственных процессов, состояние и долговечность конструкций здания и его оборудования. Тепловая обстановка в помещении определяется совместным действием ряда факторов: температуры, подвижности и влажности воздуха помещения, наличием струйных течений, распределением параметров воздуха в плане и по высоте помещения, а также радиационным излучением окружающих поверхностей, зависящим от их температуры, геометрии и радиационных свойств. Под действием конвективного и лучистого теплообмена и процессов массопереноса температура воздуха и температура поверхностей в помещении взаимосвязаны и оказывают воздействие друг на друга.

Для изучения формирования микроклимата, его динамики и способов воздействия на него нужно знать законы теплообмена в помещении.

Перемещение теплоты всегда происходит от более теплой среды к более холодной. Процесс переноса теплоты от одной точки пространства в другую за счет разности температуры называют теплопередачей и он является собирательным, т.к. включает в себя три элементарных вида теплообмена: теплопроводность, излучение и конвекцию.

Тепловой баланс любой поверхности  $i$  в помещении (рис. 1.1) может быть представлен уравнением:

$$L_i + K_i + T_i = 0. \quad (1.1)$$

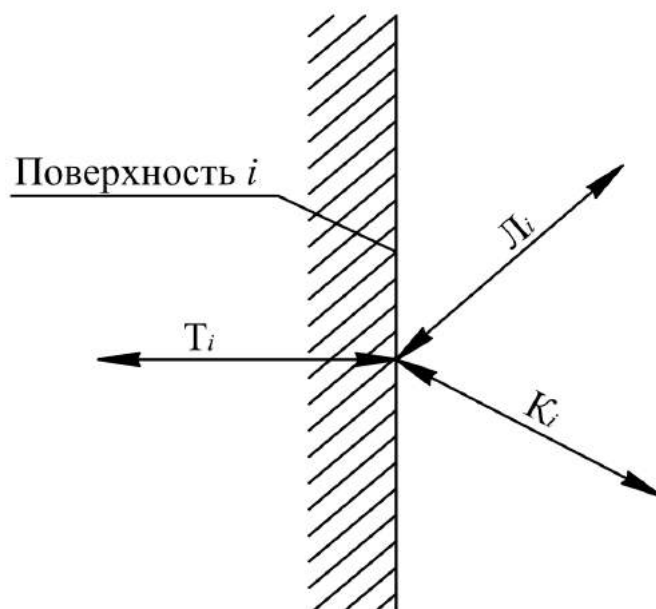


Рис. 1.1. Тепловой баланс поверхности в помещении

Лучистая  $L_i$ , конвективная  $K_i$  и кондуктивная (теплопроводностью)  $T_i$  составляющие теплообмена на поверхностях в помещении могут изменяться во времени, иметь различную величину и знак, но уравнение (1.1) остается неизменным для всех поверхностей в стационарных и нестационарных условиях теплообмена. Исключение составляют поверхности, на которых происходят явления, связанные с выделением и поглощением теплоты (испарение или конденсация водяного пара, облучение сосредоточенным источником и пр.).



## 1.2. Теплопроводность

Теплопроводность – вид передачи теплоты между неподвижными частицами твёрдого, жидкого или газообразного вещества, или, иными словами, это теплообмен между частицами или элементами структуры материальной среды, находящимися в непосредственном соприкосновении друг с другом. При изучении теплопроводности вещество рассматривается как сплошная масса, его молекулярное состояние игнорируется. В чистом виде теплопроводность встречается только в твердых телах, так как в жидких и газообразных средах практически невозможно обеспечить неподвижность вещества.

Большинство строительных материалов являются пористыми телами. В порах находится воздух, имеющий возможность двигаться, т.е. переносить теплоту конвекцией. Считается, что конвективной составляющей теплопроводности строительных материалов можно пренебречь ввиду ее малости. Внутри поры между поверхностями ее стенок происходит лучистый теплообмен. Передача теплоты излучением в порах материалов определяется главным образом размером пор, т.к. чем больше поры, тем больше разность температур на ее стенках. При рассмотрении теплопроводности характеристики этого процесса относят к общей массе вещества: скелету или порам совместно.

Ограждающие конструкции здания, как правило, являются плоскопараллельными стенками, теплоперенос в которых осуществляется в одном направлении. Кроме того, обычно в теплотехнических расчетах наружных ограждающих конструкций принимается, что теплопередача происходит при стационарных тепловых условиях, т.е. при постоянстве во времени всех характеристик процесса: теплового потока, температуры в каждой точке, теплофизических характеристик строительных материалов. Поэтому важно рассмотреть процесс одномерной стационарной теплопроводности в однородном материале, который описывается уравнением Фурье

$$q_T = -\frac{\lambda}{dx}, \quad (1.2)$$

где  $q_T$  – поверхностная плотность теплового потока, проходящего через плоскость, перпендикулярную тепловому потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м·°C);  $t$  – температура, изменяющаяся вдоль оси  $x$ , °C.

Отношение  $\frac{dt}{dx}$ , носит название градиента температуры, °C/м, и обозначается  $grad\ t$ .

Градиент температуры направлен в сторону возрастания температуры, которое связано с поглощением теплоты и уменьшением теплового потока. Знак минус, стоящий в правой части уравнения (1.2), показывает, что увеличение теплового потока не совпадает с увеличением температуры.

Теплопроводность  $\lambda$  является одной из основных тепловых характеристик материала. Как следует из уравнения (1.2), теплопроводность материала – это мера проводимости теплоты материалом, численно равная тепловому потоку, проходящему сквозь 1 м<sup>2</sup> площади, перпендикулярной направлению потока, при градиенте температуры вдоль потока, равном 1 °C/м (рис. 1.2). Чем больше значение  $\lambda$ , тем интенсивнее в таком материале процесс теплопроводности, больше тепловой поток, поэтому теплоизоляционными материалами принято считать материалы с теплопроводностью не менее 0,3 Вт/(м·°C).

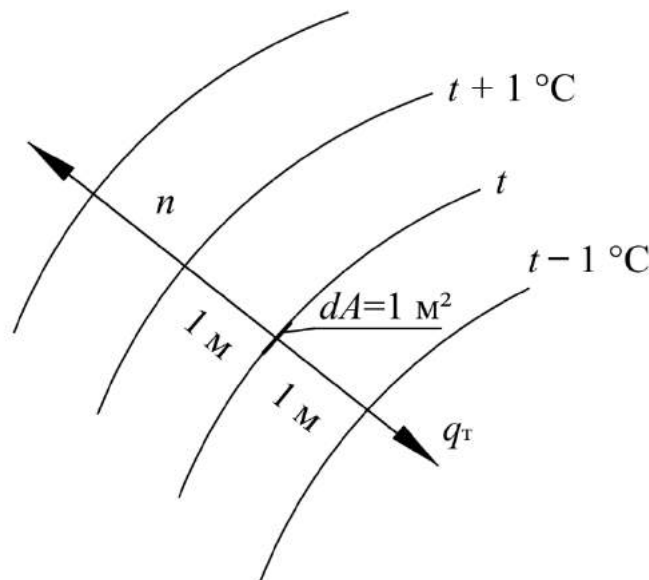


Рис. 1.2. Направления теплового потока и градиента температуры: — — — — — изотермы

Изменение теплопроводности строительных материалов с изменением их плотности происходит из-за того, что практически любой строительный материал состоит из скелета – основного строительного вещества – и воздуха.

Различия в пористости и теплопроводности скелета приводят к различию в теплопроводности материалов, даже при одинаковой их плотности. Например, следующие материалы (табл. 1.1) при одной и той же плотности,  $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$ , имеют различную теплопроводность [22].

Таблица 1.1

Теплопроводность материалов с одинаковой плотностью  $1800 \text{ кг/м}^3$  [22]

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Цементно-песчаный раствор	0,93
Кирпич	0,76
Асфальт	0,72
Портландцементный камень	0,46
Асбестоцемент	0,35

С уменьшением плотности материала его теплопроводность  $\lambda$  уменьшается, т. к. снижается влияние кондуктивной составляющей теплопроводности скелета материала, но, однако, при этом возрастает влияние радиационной составляющей. Поэтому, уменьшение плотности ниже некоторого значения приводит к росту теплопроводности, т. е. существует некоторое значение плотности, при котором теплопроводность имеет минимальное значение. Существуют оценки того, что при  $20 \text{ °С}$  в порах диаметром  $1 \text{ мм}$  теплопроводность излучением составляет  $0,0007 \text{ Вт/(м·°С)}$ , диаметром  $2 \text{ мм}$  –  $0,0014 \text{ Вт/(м·°С)}$ . Таким образом, теплопроводность излучением становится значимой у теплоизоляционных материалов с малой плотностью и значительными размерами пор.

Теплопроводность материала увеличивается с повышением температуры, при которой происходит передача теплоты. Увеличение теплопроводности материалов объясняется возрастанием кинетической энергии молекул скелета вещества. Увеличивается также и теплопроводность воздуха в порах материала, и интенсивность передачи в них теплоты излучением. В строительной практике зависимость теплопроводности от температуры большого значения не имеет. Для пересчета значений теплопроводности материалов, полученных при температуре до  $100 \text{ °С}$ , на значения при  $0 \text{ °С}$  служит эмпирическая формула [6]:

$$\lambda_0 = \lambda_t / (1 + \beta t), \quad (1.3)$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность материала при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\lambda$  – теплопроводность материала при  $t^\circ\text{C}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент изменения теплопроводности,  $1/^\circ\text{C}$ , для различных материалов, равный  $0,0025\ 1/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура материала, при которой его коэффициент теплопроводности равен  $\lambda_t$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Для плоской однородной стенки толщиной  $\delta$ , м, (рис. 1.3) тепловой поток,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , передаваемый теплопроводностью через однородную стенку, может быть выражен уравнением

$$q_T = \frac{\tau_1 - \tau_2}{(\delta/\lambda)}, \quad (1.4)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – значения температуры на поверхностях стенки,  $^\circ\text{C}$ .

Из выражения (1.4) следует, что распределение температуры по толщине стенки линейное. Величина  $\delta/\lambda$  названа термическим сопротивлением материального слоя и обозначается  $R_T$ ,  $\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$ :

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (1.5)$$

следовательно, тепловой поток через однородную плоско-параллельную стенку можно определить по формуле

$$q_T = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R_T}. \quad (1.6)$$

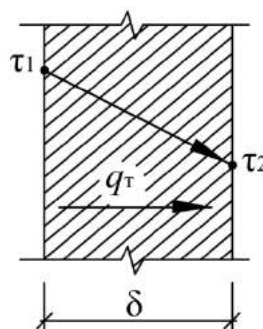


Рис. 1.3. Распределение температуры в плоской однородной стенке

Термическое сопротивление слоя – это сопротивление теплопроводности, равное разности температур на противоположных поверхностях слоя при прохождении через него теплового потока с поверхностной плотностью  $1\ \text{Вт}/\text{м}^2$ . Теплообмен теплопроводностью имеет место в материальных слоях ограждающих конструкций зданий.

### 1.3. Лучистый теплообмен в помещении

Температуры отдельных поверхностей в помещении неодинаковы. Между поверхностями происходит теплообмен излучением. Лучистый теплообмен в помещении происходит в условиях ограниченного диапазона значений температур, определенных радиационных свойств поверхностей, геометрии их расположения. Излучение (лучистый теплообмен) – это перенос теплоты с поверхности на поверхность через лучепрозрачную среду электромагнитными волнами, трансформирующимися в теплоту.

Величина интенсивности излучения  $E_o$ , Вт/м<sup>2</sup>, определяется законом Стефана – Больцмана:

$$E_o = C_o \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.7)$$

где  $C_o$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_o = 6,81$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Поверхности помещения являются серыми телами. В отличие от абсолютно черных серые тела излучают меньше теплоты, и падающий на них лучистый поток полностью ими не поглощается, а частично отражается. Коэффициенты излучения серых тел  $C$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), определяются по формуле

$$C = \varepsilon C_o, \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon$  – величина, показывающая степень черноты поверхности, равной относительно излучению поверхности.

Значения  $\varepsilon$  применительно к условиям теплообмена в помещении приведены в табл. 1.2. Там же даны значения коэффициентов поглощения материалами солнечной радиации  $p$ .

Воздух помещения при расчете лучистого теплообмена между поверхностями можно считать лучепрозрачной средой. Каждая поверхность отдает теплоту излучением и поглощает лучистую теплоту, приходящую от окружающих поверхностей. Нагретые поверхности теряют больше теплоты, чем поглощают, более холодные, наоборот, получают больше теплоты, чем отдают.

Таблица 1.2

Значения коэффициента излучения  $\varepsilon$  и коэффициента поглощения солнечной радиации  $\rho$  поверхностями различных строительных материалов

Наименование материала и состояние поверхности	$\varepsilon$	$\rho$
Мрамор серый шлифованный	0,93	0,30
Мрамор темный шлифованный	0,93	0,65
Гранит серый светлый полированный	0,42	0,80
Известняк светлый шлифованный	0,40	0,35
Известняк темный	0,40	0,50
Песчаник желто-коричневый шлифованный	-	0,54
То же, светлый	-	0,62
То же, красный	0,57	0,73
Кирпич обыкновенный красный	0,93	0,70...0,74
То же, светло-коричневый	-	0,55
То же, глазурованный белый	-	0,26
Бетон, гладкая поверхность	0,62	0,54...0,65
Штукатурка светлая	0,91	0,42
То же, темная	0,94	0,73
Дерево неокрашенное	0,7...0,9	0,59
То же, окрашенное, светло-желтое	-	0,60
Асбест белый	0,96	0,42
Рубероид	0,93	0,76...0,94
Толь черный	0,91	0,86...0,88
Железо полированное	0,128	0,45
То же, оцинкованное	0,28	0,64
Асбоцемент белый	0,96	0,61
Алюминий матовый	0,055	0,52
Алюминий полированный	0,039...0,057	0,26
Краски масляные:		
кармин светлый, красный	}	0,52
ультрамарин (синий)		0,64
кобальт зеленый светлый		0,58
марс коричневый		0,65
кобальт фиолетовый		0,83
зелень изумрудная		0,61
охра золотистая		0,44
охра красная		0,63
Стекло оконное, $\delta = 4,5$ мм		}
То же, $\delta = 7$ мм	0,76	

Общее количество теплоты, передаваемое излучением с поверхности 1 на поверхность 2, полные площади которых равны  $F_1$  и  $F_2$ :

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр.1-2}} C_0 \Phi_{1-2} F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (1.9)$$

Коэффициент облученности  $\varphi_{1-2}$  с поверхности 1 на поверхность 2 показывает долю лучистого потока, попадающую на поверхность 2, от всего потока, излучаемого поверхностью 1. Для определения коэффициента облученности  $\varphi_{1-2}$  при двух наиболее характерных случаях расположения поверхностей в помещении пользуются графиками, приведенными на рис. 1.4 и 1.5.

В формуле (1.3) величина  $\varepsilon_{\text{пр.1-2}}$  есть приведенный (относительный) коэффициент излучения при теплообмене между двумя серыми поверхностями. Для определения  $\varepsilon_{\text{пр}}$  рассмотрим три характерных случая.

Для двух параллельных поверхностей, расстояние между которыми мало по сравнению с их размерами, коэффициент облученности  $\varphi_{1-2} = 1$ , т.к. практически все излучение одной поверхности попадает на другую.

Приведенный коэффициент излучения теплообменивающихся поверхностей для этого случая равен

$$\varepsilon_{\text{пр.1-2}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (1.10)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – коэффициенты излучения поверхностей.

Одна поверхность со всех сторон окружена другой поверхностью. Это сфера в сфере, цилиндр в цилиндре или просто невогнутая поверхность, окруженная большей поверхностью такой же геометрии. В этом случае, если меньшая поверхность имеет площадь  $F_1$ , а большая  $F_2$ , величина  $\varepsilon_{\text{пр.1-2}}$  равна

$$\varepsilon_{\text{пр.1-2}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (1.11)$$

Если поверхности малы или велико расстояние между ними, часть отраженного излучения, возвращающаяся на излучающую поверхность, становится незначительной, а коэффициент  $\varepsilon_{\text{пр.1-2}}$  в этом случае составляет

$$\varepsilon_{\text{пр.1-2}} = \varepsilon_1 \varepsilon_2. \quad (1.12)$$

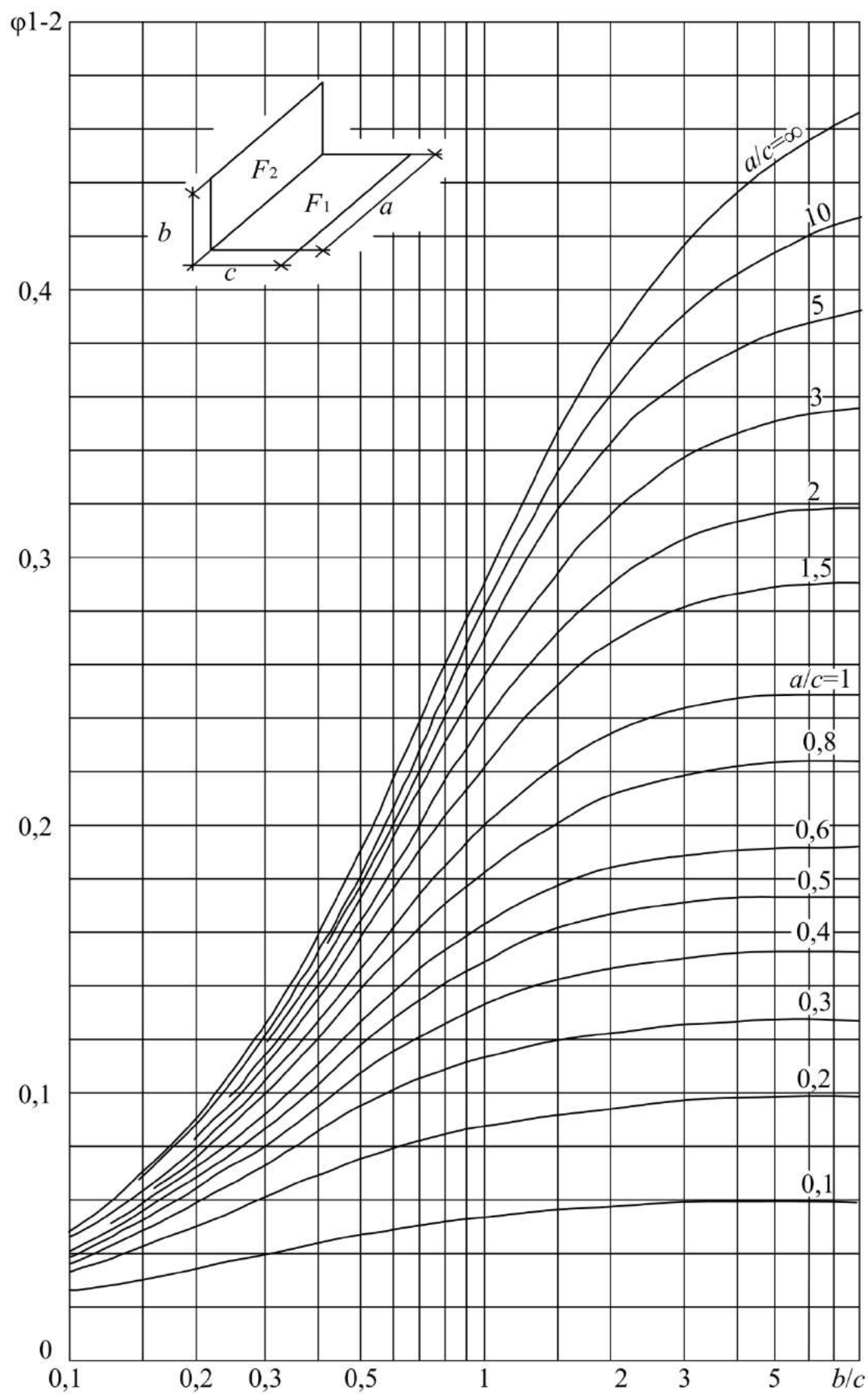


Рис. 1.4. Коэффициент облученности с поверхности на поверхность, расположенную в перпендикулярной плоскости



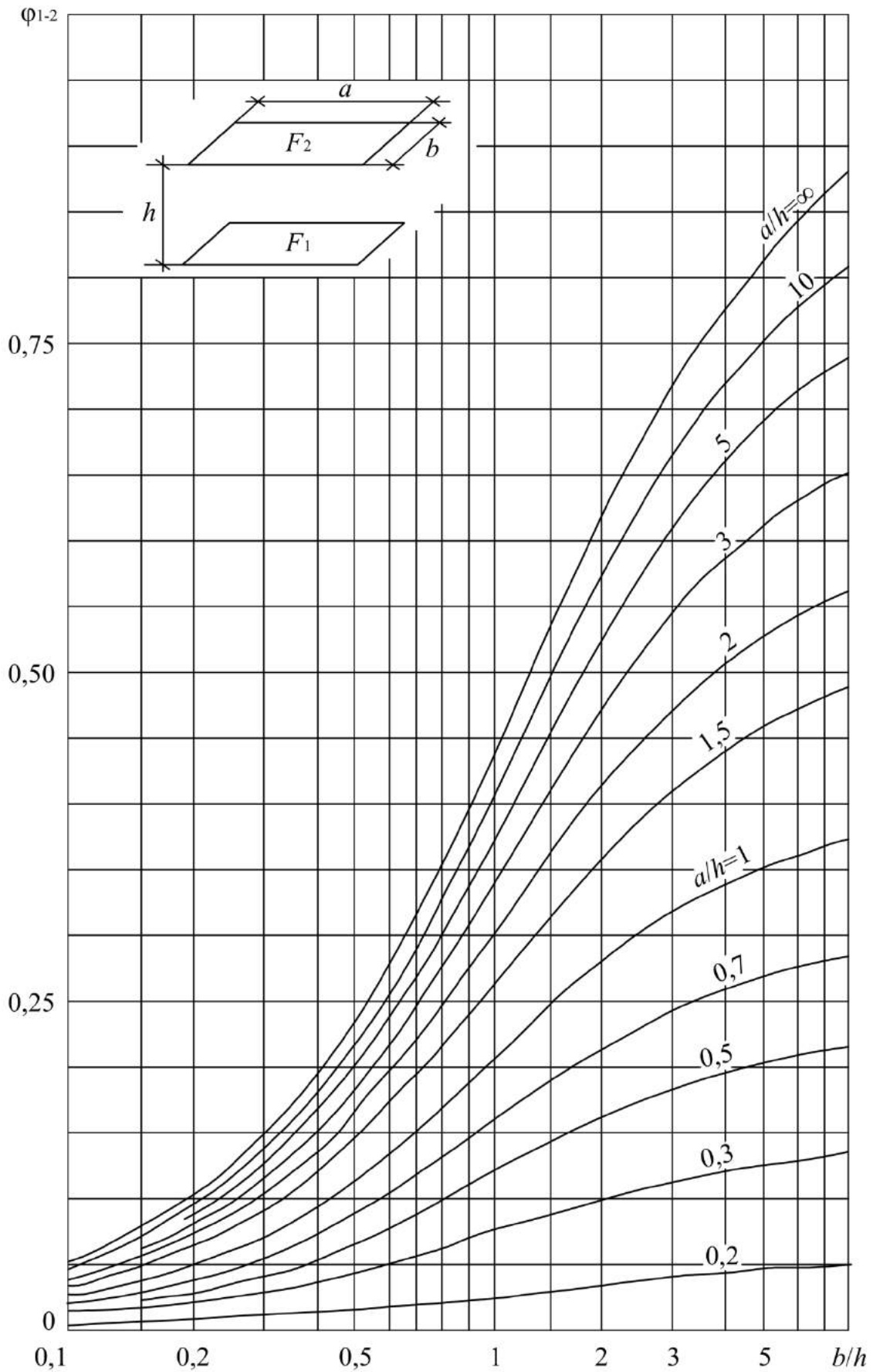


Рис. 1.5. Коэффициент облученности с поверхности на поверхность, расположенную в параллельной плоскости  
 Для инженерных расчетов в формуле (1.9) удобно заменить разность чет-

вертых степеней абсолютных температур разностью температур в градусах Цельсия в первой степени в виде

$$\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 = b_{1-2}(\tau_1 - \tau_2). \quad (1.13)$$

Множитель  $b_{1-2}$  называют температурным коэффициентом, величину которого при комнатных температурах  $\tau_{cp} = 0,5(\tau_1 + \tau_2)$  определяют по формуле

$$b_{1-2} = 0,81 + 0,01\tau_{cp}. \quad (1.14)$$

Количество передаваемой теплоты между двумя поверхностями определяется по формуле

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{np.1-2} C_o \varphi_{1-2} F_1 b_{1-2} (\tau_1 - \tau_2). \quad (1.15)$$

При расчете лучистого теплообмена поверхности  $l$  с  $j$ -ми поверхностями в помещении радиационный баланс поверхности с площадью  $F_1$  составляет

$$Л_i = \sum_j \varepsilon_{1-j} C_o \varphi_{1-j} b_{1-j} (\tau_1 - \tau_j) F_1. \quad (1.16)$$

#### 1.4. Конвективный теплообмен в помещении

Воздух обменивается теплотой с охлажденными и нагретыми поверхностями ограждений и приборов систем отопления и охлаждения. Нагретые потоки воздуха поднимаются вверх, охлажденные опускаются вниз, вызывая общую подвижность и перемешивание воздуха в помещении. Приток и удаление воздуха вентиляцией усиливает этот процесс.

В помещении могут быть различные формы конвективного теплообмена. В большинстве случаев обмен теплотой воздуха с нагретыми или охлажденными поверхностями происходит в режиме свободной (естественной) конвекции. В условиях вынужденного (принудительного) движения воздуха вдоль поверхностей теплообмен определяется закономерностями вынужденной конвекции. При подаче неизотермических струй теплообмен определяется также массообменом и происходит в результате перемешивания струй с воздухом помещения.

Все эти процессы достаточно сложны, и их протекание в ограниченном

объеме помещения имеют определенную специфичность.

*Свободная конвекция.* Около нагретых и охлажденных свободно расположенных поверхностей возникают конвективные токи, которые определяют интенсивность теплообмена между поверхностями и воздухом. Этот процесс называют свободной конвекцией. Если поверхность нагрета, то воздух около нее нагревается и поднимается вверх, вытесняемый снизу более холодным. В потоке около вертикальной поверхности образуется пограничный слой, толщина которого возрастает по направлению движения (рис. 1.6). В начальной зоне движения пограничный слой является ламинарным. На некотором расстоянии от нижней зоны нагретой поверхности, когда толщина пограничного слоя достигает определенной величины, режим течения становится турбулентным. Аналогичная картина наблюдается около охлажденной поверхности, поток свободной конвекции у которой направлен вниз.

Интенсивность естественной конвекции для любых форм поверхностей и сред в обобщенном виде определяется критерием Грасгофа ( $Gr$ ) или произведением критерия Грасгофа на критерий Прандтля ( $Gr \cdot Pr$ ). Для воздуха помещения при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$  произведение этих критериев равно

$$Gr \cdot Pr = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu^2} Pr = \frac{1}{293} \frac{9,81 l^3 \Delta t}{(15,06 \cdot 10^{-6})^2} 0,709 \approx 10^8 l^3 \Delta t, \quad (1.17)$$

где  $\beta$  – коэффициент температурного расширения воздуха,  $\beta = 1/T = 1/293, \text{ K}^{-1}$ ;  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  – ускорение силы тяжести;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, при  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$ ;  $l$  – определяющий размер поверхности в направлении потока воздуха, м;  $\Delta t$  – разность между температурой поверхности и температурой воздуха в помещении,  $^\circ\text{C}$ ;  $Pr$  – критерий Прандтля, для воздуха при  $20\text{ }^\circ\text{C}$   $Pr = 0,709$ .

Переход от ламинарного к турбулентному режиму течения происходит на расстоянии  $l_{кр}$  от начала поверхности, и сечения принимают значение произведения  $(Gr \cdot Pr)_{кр} \approx 2 \cdot 10^7$ .

Из этого критериального уравнения можно получить

$$l_{кр} \approx 1,89\Delta t^{-1/3}. \quad (1.18)$$

Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha_k$  в пределах всей области ламинарного режима теплообмена от 0 до  $l_{кр}$  составляет

$$\alpha_k = 1,01\Delta t^{-1/3}. \quad (1.19)$$

Этому значению  $\alpha_k$  соответствует среднеинтегральное значение критерия Нуссельта  $Nu = \alpha_k l / \lambda = 87$  (здесь  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха).

Вне пределов ламинарной области происходит турбулизация пограничного слоя. Критериальное уравнение теплообмена в области турбулентного режима имеет вид

$$Nu = 0,135(Gr \cdot Pr)^{1/3}. \quad (1.20)$$

Из формулы (1.20) уравнение для определения  $\alpha_k$  при  $t = 20$  °С имеет вид

$$\alpha_k = 1,43\sqrt[3]{\Delta t}. \quad (1.21)$$

Как видно из (1.21), величина коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha_k$  не зависит от геометрического параметра  $l$  и остается неизменной для всей области турбулентного режима, в пределах которой процесс конвективного теплообмена является автомодельным.

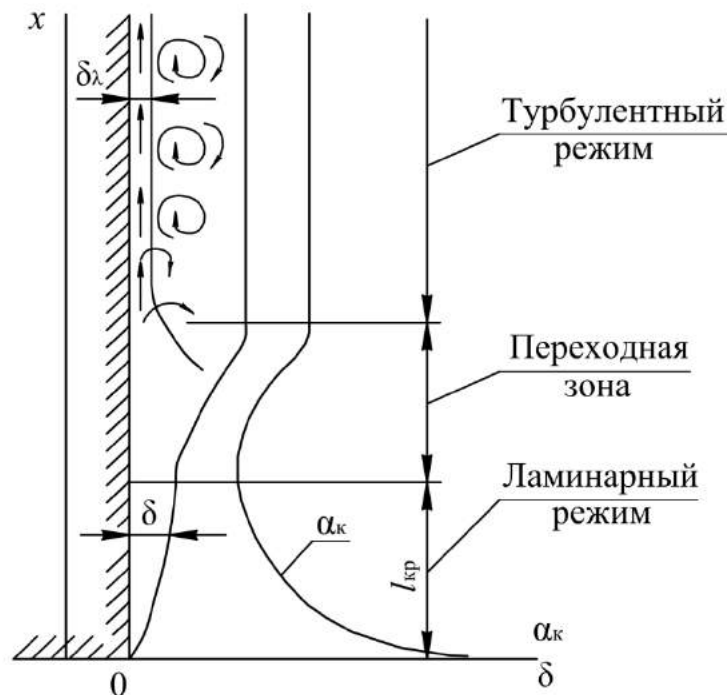


Рис. 1.6. Пограничный слой при свободной конвекции  
Все рассмотренные формулы, в том числе и уравнение (1.21), написаны

для вертикальной, свободно расположенной поверхности. При горизонтальном расположении нагретой или охлажденной свободной поверхности для расчета средней интенсивности конвективного теплообмена можно пользоваться формулой (1.21), но значение численного коэффициента в нем должно быть изменено (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Значения численного коэффициента в формуле (1.21)

Тип поверхности	Численный коэффициент
Вертикальные	1,43
Горизонтальная, обращенная вверх:	
- нагретая	1,86
- охлажденная	1,0
Горизонтальная, обращенная вниз:	
- нагретая	1,0
- охлажденная	1,86

*Свободная конвекция с учетом общей подвижности воздуха в помещении.* Усиление свободной конвекции в помещении связано с тем, что на интенсивность движения конвективного потока около поверхности влияет общая подвижность воздуха в помещении.

Смешанную подвижность воздуха вдоль поверхности можно характеризовать условной разностью температур  $\Delta t_{\text{усл}}$ , величина которой вызовет такую же интенсивность свободного конвективного потока, как при естественной конвекции и общей подвижности воздуха в помещении

$$\Delta t_{\text{усл}} = \Delta t + \Delta t_v, \quad (1.22)$$

где  $\Delta t$  – разность температур между поверхностью и воздухом, °С;  $\Delta t_v$  – разность температур, °С, эквивалентная подвижности воздуха в помещении  $v$ , м/с,

$\Delta t_v = 60 \frac{v^2}{l}$ . В помещении при общей подвижности воздуха свободную конвекцию можно рассчитать по приведенным выше формулам, пользуясь значением  $\Delta t_{\text{усл}}$  вместо  $\Delta t$ .

## 1.5. Общий теплообмен на поверхности в помещении

Количество теплоты, которое воспринимает или отдает произвольная поверхность  $i$  в результате лучисто-конвективного теплообмена в помещении, равно количеству теплоты, которое передается к поверхности или отдается от нее теплопроводностью, по формуле (1.1).

В стационарных условиях, когда температурный градиент в толще ограждения остается неизменным во времени, теплопроводностью будет передаваться количество теплоты  $T_i$  через площадь  $F_i$ :

$$T_i = K'_i(\tau_i - t_{cp,i})F_i, \quad (1.23)$$

где  $K'_i$  – коэффициент теплопередачи от внутренней поверхности ограждения до внешней среды, температура которой равна  $t_{cp,i}$ .

Таким образом, тепловой баланс поверхности с учетом выражений (1.16, 1.23) можно описать одним уравнением

$$\sum_j \varepsilon_{i-j} C_o \varphi_{i-j} b_{i-j} (\tau_i - \tau_j) F_i + \alpha_{ki} (\tau_i - t_B) F_i + K'_i (\tau_i - t_{cp,i}) F_i \pm Q_i = 0, \quad (1.24)$$

где  $Q_i$  – прочие источники и стоки теплоты на поверхности, Вт.

## 1.6. Тепловой баланс воздуха в помещении

Воздух помещения, соприкасаясь с нагретыми или охлажденными поверхностями, нагревается или охлаждается. Кроме того, он получает или отдает теплоту в процессе теплообмена. Уравнение теплового баланса воздуха в помещении имеет вид

$$\sum \alpha_{ki} (\tau_i - t_B) F_i \pm Q_B = 0, \quad (1.25)$$

где  $\alpha_{ki}$  – средние значения коэффициента теплообмена на поверхностях;  $Q_B$  – количество конвективной теплоты, которое непосредственно передается воздуху помещения или забирается из него.

В величину  $Q_B$  входит теплота, вносимая приточной вентиляцией и в результате неорганизованного проветривания помещения, а также конвективная теплота, получаемая воздухом от закрытых поверхностей.

Если приточный воздух настиляется на одну из поверхностей и его тем-

пература заметно отличается от температуры воздуха в помещении, как это имеет место при воздушном отоплении или охлаждении помещения, то для воздушной струи необходимо составить самостоятельные уравнения теплового баланса. В направлении движения струю разбивают на элементарные объемы в соответствии с разбивкой на элементарные площадки омываемой поверхности.

Уравнение теплового баланса для каждого элементарного объема, представленного на рис. 1.7, *a* (их границы на рисунке обозначены пунктиром), можно написать в виде

$$L_{n-1}c\gamma t_{n-1} + \Delta L_n c\gamma t_b - L_n c\gamma t_n + \alpha_{к.н}(\tau_n - t_n)\Delta F_n = 0, \quad (1.26)$$

где  $L_{n-1}$ ,  $L_n$  – объемные расходы воздуха в струе между элементарными объемами  $(n - 1) - n$  и  $n - (n + 1)$ ;  $\Delta L_n$  – объемный расход, который подмешивается к струе из помещения с температурой  $t_b$  в пределах элементарного объема  $n$ ;  $t_n$  и  $t_{n-1}$  – средние температуры в пределах элементарных объемов струи  $n$  и  $n - 1$ ;  $\tau_n$  – средняя температура поверхности в пределах элементарного объема  $n$ ;  $c\gamma$  – объемная теплоемкость воздуха;  $\alpha_{к.н}$  – средний коэффициент конвективного теплообмена на поверхности в пределах элементарного объема  $n$ .

Так как  $L_n = L_{n-1} + \Delta L_n$ , то уравнение (1.26) перепишем в виде

$$L_{n-1}c\gamma(t_{n-1} - t_n) + \Delta L_n c\gamma(t_b - t_n) + \alpha_{к.н}(\tau_n - t_n)\Delta F_n = 0. \quad (1.27)$$

Определим расход в элементарном объеме  $k$  струи

$$L_k = \sum \Delta L_n + L_o. \quad (1.28)$$

В общем случае, когда температура уходящего из помещения воздуха  $t_{yx}$  не равна  $t_b$ , то она определяется по зависимости:

$$L_k c\gamma t_k - \sum \Delta L_n c\gamma t_b = (L_k - L_o) c\gamma (t_k - t_b) + L_o c\gamma (t_k - t_{yx}), \quad (1.29)$$

где  $L_k$  и  $t_k$  – расход воздуха и температура в конце последнего элементарного объема  $k$  на границе с воздухом помещения, где условно заканчивается струя;  $L_o$  – количество воздуха, подаваемого вентиляцией.

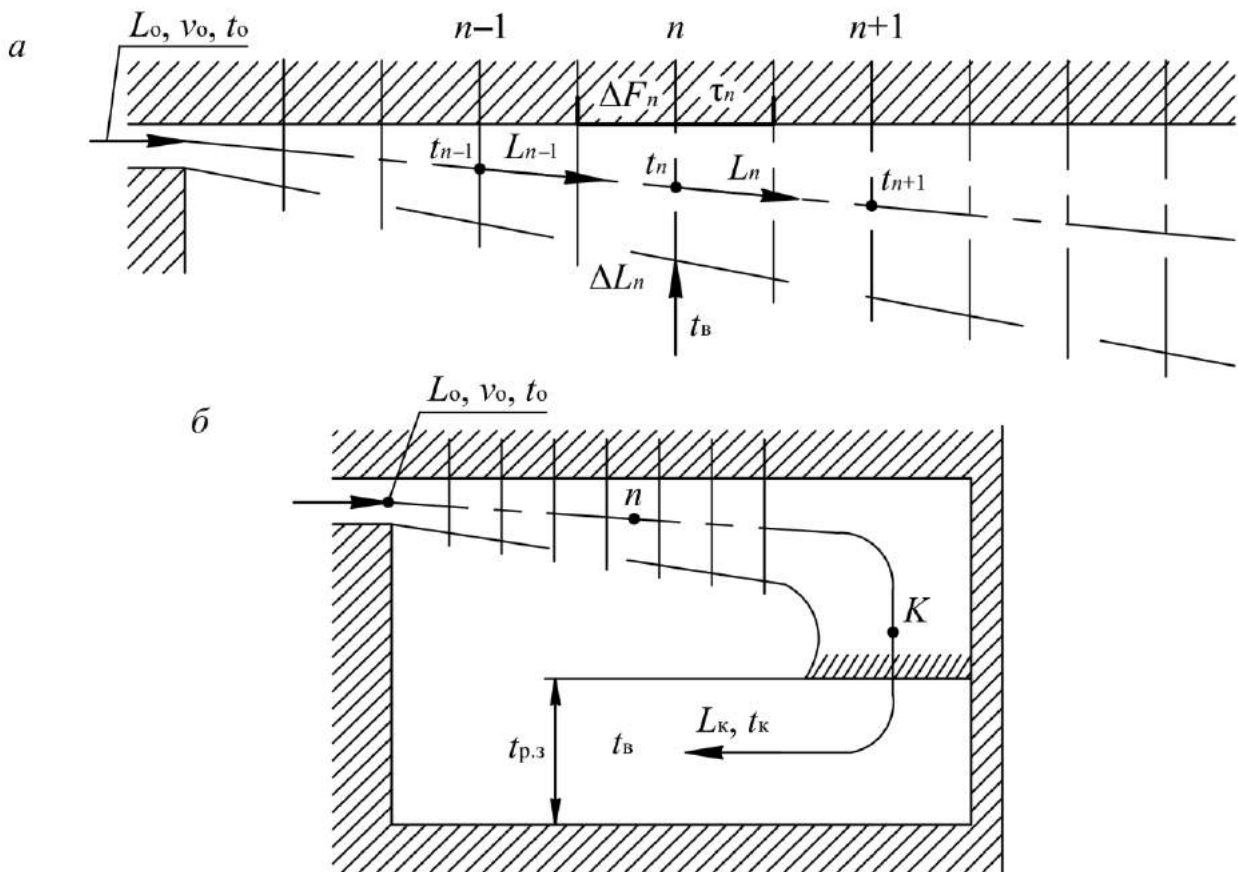


Рис. 1.7. Теплообмен настилающейся струи: *a* – тепловой баланс элементарного объема воздуха в струе, *б* – тепловой баланс воздуха помещения

Уравнение теплового баланса воздуха помещения в этом случае имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1} \alpha_{\kappa,i} (\tau_i - t_b) F_i + L_{\kappa} c \gamma (t_{\kappa} - t_b) + L_0 c \gamma (t_b - t_{yx}) \pm Q_b = 0. \quad (1.30)$$

В сумму первого слагаемого уравнения (1.30) входят все составляющие конвективного теплообмена, кроме поверхности, омываемой струей; второе и третье слагаемые учитывают теплоту приточной настилающейся струи.

### 1.7. Полная система уравнений общего теплообмена в помещении

В общем теплообмене в помещении участвуют все его поверхности, воздушные струи и воздух помещения. Температурное состояние каждого элемента, участвующего в теплообмене, можно установить решением системы уравнений теплового баланса всех характерных поверхностей, воздуха, а в общем случае и элементарных объемов струй воздуха.



Рассматривая полную физико-математическую постановку задачи о теплообмене в помещении, примем в качестве основной систему уравнений, состоящую из уравнений теплового баланса поверхностей (1.24), элементарных поверхностей и объемов настиляющихся струй (1.27), объемов свободных струй и уравнения теплового баланса воздуха (1.30):

$$\left. \begin{aligned} \sum C_{i-j} b_{i-j} (\tau_i - \tau_j) \rho_{i-j} F_i + \alpha_{k,i} (\tau_i - t_B) F_i + K'_i (\tau_i - \tau_{cp,i}) F_i \pm Q_i &= 0; \\ \sum C_{n-j} b_{n-j} (\tau_n - \tau_j) \rho_{n-j} \Delta F_n + \alpha_{k,n} (\tau_n - t_n) \Delta F_n + K'_n (\tau_n - \tau_{cp,n}) \Delta F_n \pm Q_n &= 0; \\ L_{n-1} c \gamma (t_{n-1} - t_n) + \Delta L_n c \gamma (t_B - t_n) + \alpha_{k,n} (\tau_n - t_n) \Delta F_n &= 0; \\ \sum \alpha_{k,i} (\tau_i - t_B) F_i + L_k c \gamma (t_k - t_B) + L_0 c \gamma (t_B - t_{yx}) \pm Q_B &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.31)$$

Граничные условия для решения системы обычно заданы в виде температуры наружного воздуха  $t_{cp,i}$  и теплоносителя  $t_{cp,n}$ , начальной температуры  $t_0$  и расхода воздуха  $L_0$  приточной струи, температуры уходящего воздуха  $t_{yx}$  и источников или стоков теплоты  $Q_n$ ,  $Q_i$  и  $Q_B$ . Искомыми в этом случае будут температуры поверхностей  $\tau_n$ , элементарных объемов воздуха настиляющихся и свободных струй  $t_n$  и воздуха  $t_B$  помещения. В зависимости от задачи расчета могут быть и другие сочетания заданных и искомых величин. Системой уравнений (1.31) можно воспользоваться для решения задачи о теплообмене при значительной неравномерности распределения температуры по высоте и в плане помещения и струйных течениях воздуха, которые специфичны для промышленных зданий.

Система (1.31) состоит из большого числа уравнений, что затрудняет ее решение. Кроме того, составляющие коэффициентов теплообмена в уравнениях зависят от искомых температур, что заставляет проводить расчет методом последовательного приближения.

### **1.8. Одно уравнение общего теплообмена в помещении (уравнение профессора В.Н. Богословского)**

При расчете теплообмена в помещении обычно задаются температурами на внутренних поверхностях наружных ограждений и воздуха в помещении. Значения этих температур представлены в нормативной документации.

Температуру внутренних ограждений приближенно можно считать равной температуре воздуха, в этом случае искомой величиной в расчете является только температура или площадь обогреваемой поверхности. Необходимость определения только одной неизвестной дает возможность заменить систему уравнений одним уравнением теплообмена в помещении. Полное количество теплоты  $Q_{\text{п}}$ , отдаваемое панелью площадью  $F_{\text{п}}$ , равно сумме ее лучистой  $Q_{\text{п.л}}$  и конвективной  $Q_{\text{п.к}}$  составляющих:

$$Q_{\text{п.л}} = C\Phi b(\tau_{\text{п}} - \tau_{\text{н.о}})F_{\text{п}}, \quad (1.32)$$

где  $\tau_{\text{п}}$  и  $\tau_{\text{н.о}}$  – температуры греющей панели и внутренней поверхности наружного ограждения;  $C$  и  $b$  – соответственно приведенный коэффициент излучения и температурный коэффициент для системы «панель – наружное ограждение»;  $\Phi$  – коэффициент полной облученности с панели на поверхность наружных ограждений, равный сумме коэффициентов прямой и косвенной облученности:

$$\Phi = \frac{F_{\text{н.о}} / F_{\text{п}} - \varphi^2}{F_{\text{н.о}} / F_{\text{п}} - 2\varphi + 1}; \quad (1.33)$$

$$Q_{\text{п}} = [C\Phi b(\tau_{\text{п}} - \tau_{\text{н.о}}) + \alpha_{\text{к}}(\tau_{\text{п}} - t_{\text{в}})]F_{\text{п}}, \quad (1.34)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент конвективного теплообмена на поверхности панели.

Возможен другой способ замены системы уравнений теплообмена в помещении одним уравнением. Все поверхности помещения, с которыми панель обменивается теплотой излучением, заменяются одной условной поверхностью, имеющей осредненную радиационную температуру  $t_{\text{R}}$ . Такая замена удобна тем, что коэффициент облученности с панели на условную поверхность равен единице. Составляющая отдачи теплоты панелью излучением в этом случае вычисляется по формуле

$$Q_{\text{п.л}} = Cb(\tau_{\text{п}} - \tau_{\text{R}})F_{\text{п}}. \quad (1.35)$$

Если в помещении одна нагретая панель, поэтому  $\Sigma\varphi_{\text{п-}i} = 1$ , то

$$t_{\text{R}} = \Sigma\varphi_{\text{п-}i}t_i. \quad (1.36)$$

Таким образом, в окончательном виде уравнение В.Н. Богословского имеет вид

$$Q_{\text{п}} = [C\Phi b(\tau_{\text{п}} - t_{\text{R}}) + \alpha_{\text{к}}(\tau_{\text{п}} - t_{\text{в}})]F_{\text{п}}. \quad (1.37)$$

## 1.9. Расчетные внутренние тепловые условия

Параметры микроклимата помещения должны быть в определенных соотношениях между собой и не отклоняться от заданных пределов, т.е. находиться в некоторой зоне комфортности тепловой обстановки. Таких зон несколько, они определяются временем года, назначением помещения, видом выполняемой работы и климатом района строительства.

Деятельность человека обычно происходит в определенной части объема помещения. Эту часть называют рабочей, или обслуживаемой, зоной. Системы кондиционирования микроклимата совместно с теплозащитой ограждений должны обеспечить расчетные условия в обслуживаемой зоне помещений.

Комфортными можно назвать условия в помещении, при которых человек, находясь в пределах обслуживаемой (рабочей) зоны помещения, не испытывает чувства перегрева или переохлаждения. Температурная обстановка в помещении может быть определена двумя условиями температурного комфорта: первое условие – температурный комфорт в помещении в целом; второе условие – температурный комфорт на границе обслуживаемой зоны в непосредственной близости относительно нагретых и охлажденных поверхностей.

*Первое условие комфортности.* Комфортной будет такая общая температурная обстановка в помещении, при которой человек, находясь в середине помещения, будет отдавать всю явную теплоту, не испытывая перегрева или переохлаждения. На теплоощущения человека в определенной мере влияют радиационная температура  $t_R$  и температура воздуха  $t_B$ . Температуру  $t_R$  следует определять как средневзвешенную по коэффициентам облученности:

$$t_R = \sum \varphi_{ч-i} t_i, \quad (1.38)$$

где  $\varphi_{ч-i}$  – коэффициенты облученности с человека на отдельные поверхности с температурой  $t_i$  при положении человека в середине помещения.

Коэффициенты  $\varphi_{ч-i}$  можно определить по графикам, приведенным на рис. 1.8 и 1.9, а, б.

Комфортная температурная обстановка в различных помещениях возможна при различных сочетаниях  $t_B$  и  $t_R$ .

Уравнение лучисто-конвективного теплообмена человека по аналогии с формулой (1.24) имеет вид

$$Q_{\text{ч}}^{\text{л+к}} = F_{\text{ч}}^{\text{л}} \sum C_{\text{ч-}i} \varphi_{\text{ч-}i} b_{\text{ч-}i} (\tau_{\text{ч}} - \tau_i) + F_{\text{ч}}^{\text{к}} \alpha_{\text{к}} (\tau_{\text{ч}} - t_B), \quad (1.39)$$

где  $F_{\text{ч}}^{\text{л}}$ ,  $F_{\text{ч}}^{\text{к}}$  – теплоотдающие поверхности тела человека соответственно при лучистом и конвективном теплообмене;  $\tau_{\text{ч}}$  – средняя температура поверхности одетого человека;  $\alpha_{\text{к}}$  – средний по  $F_{\text{ч}}^{\text{к}}$  коэффициент конвективного теплообмена.

Для зимнего режима принимают  $\tau_{\text{ч}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{\text{к}} = 2,0$ ;  $\alpha_{\text{л}} = 4,4$ ;  $F_{\text{ч}}^{\text{к}} = 1,9$  и  $F_{\text{ч}}^{\text{л}} = 1,7 \text{ м}^2$ ;  $Q_{\text{ч}}^{\text{л+к}} = 87,2 \text{ Вт}$ . После подстановки этих значений в зависимость (1.39) получим для зимнего периода

$$t_R = 29 - 0,57 t_B. \quad (1.40)$$

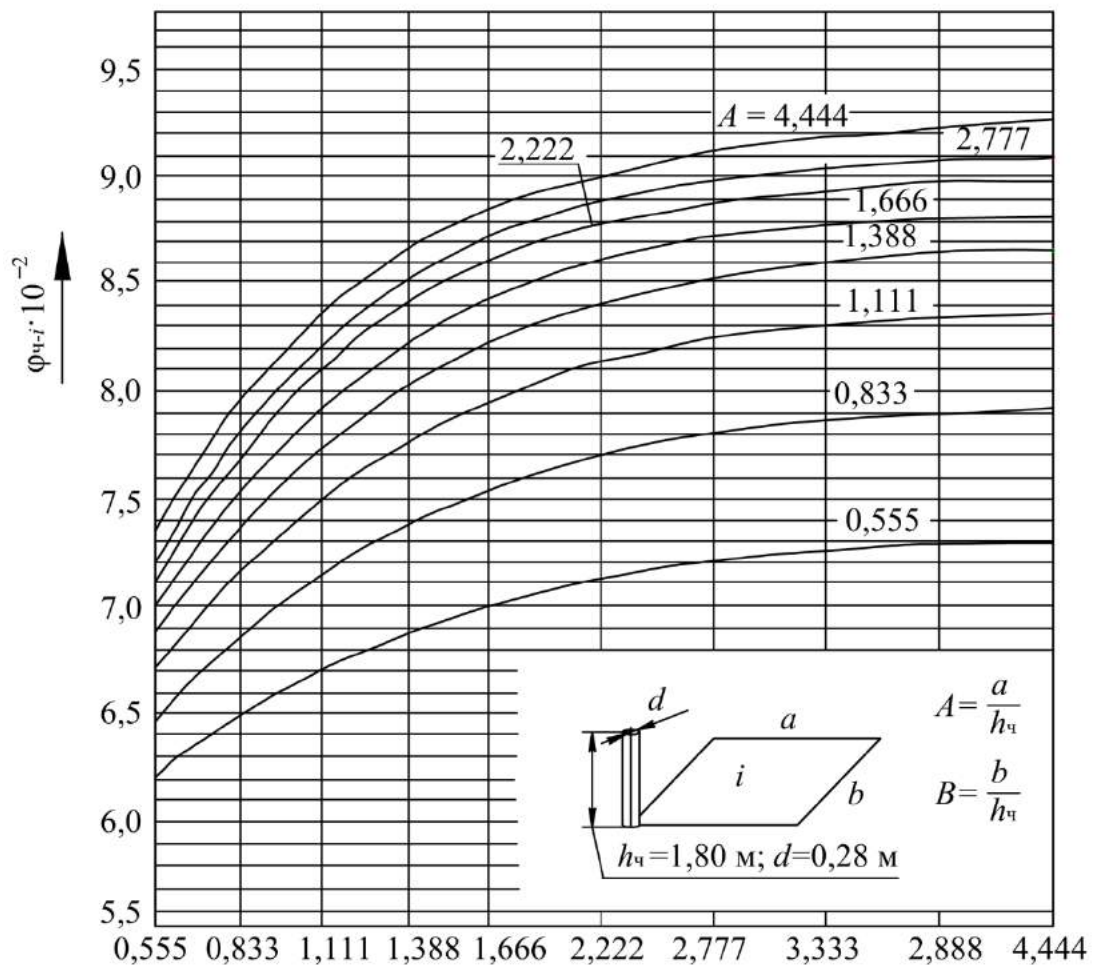


Рис. 1.8. Коэффициент облученности со всей поверхности тела человека на горизонтальную поверхность в помещении (на пол)

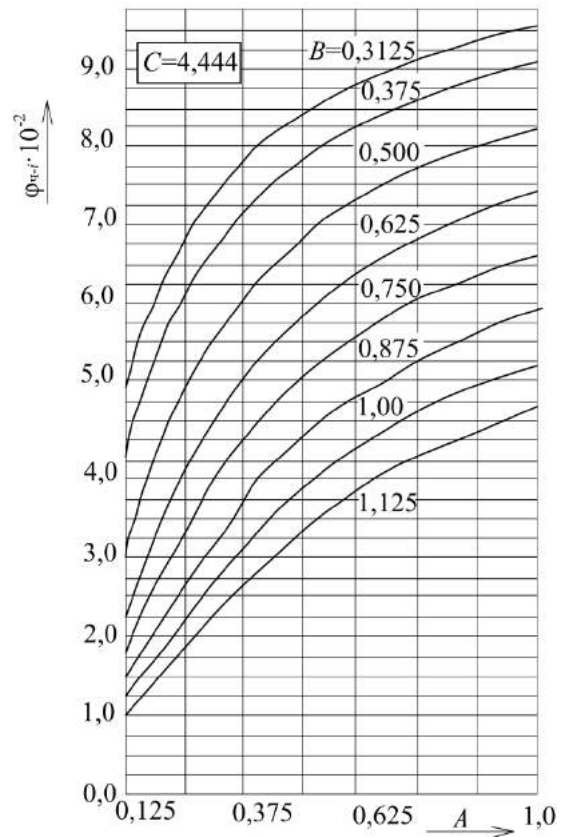
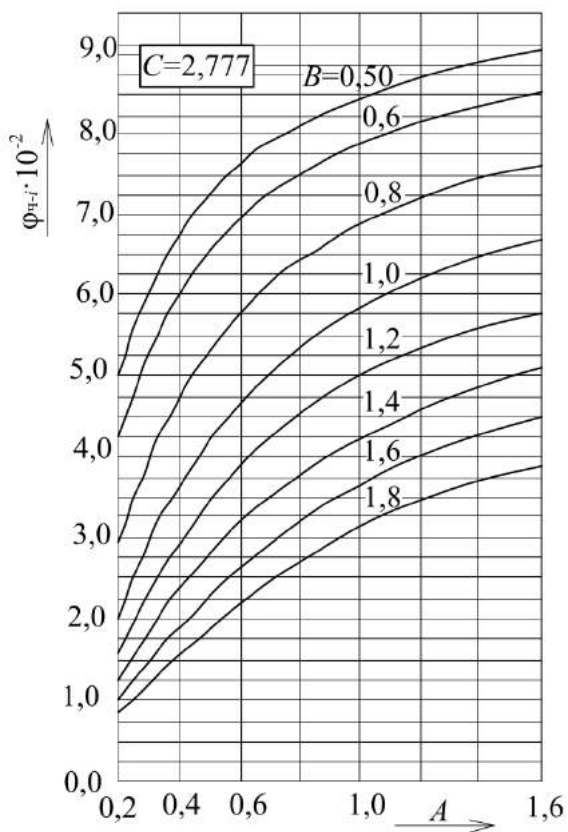
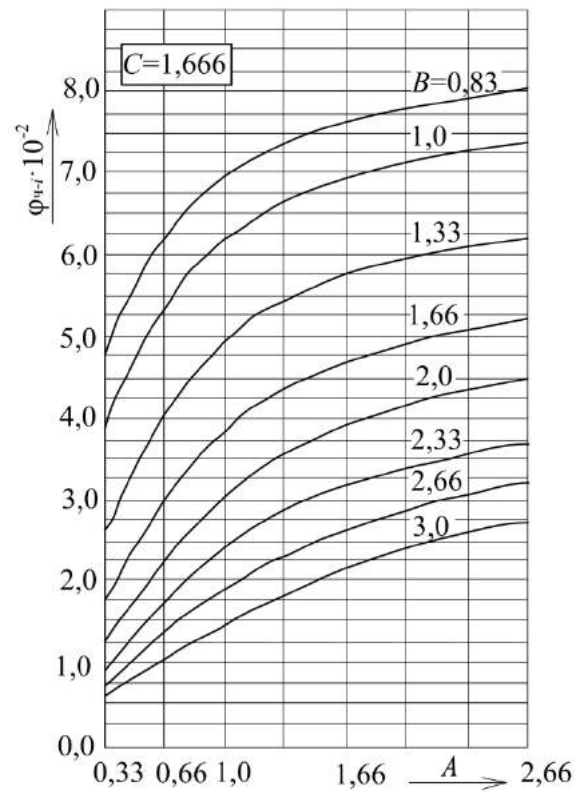
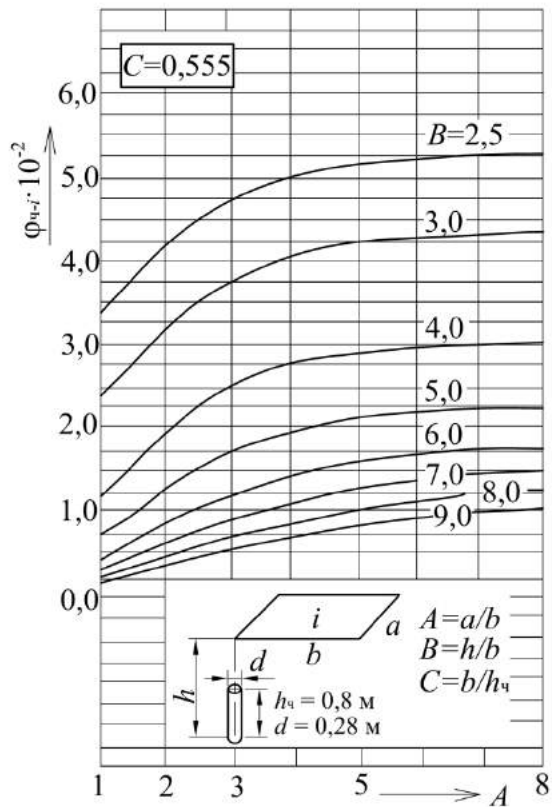


Рис. 1.9, а. Коэффициенты облученности со всей поверхности тела человека на горизонтальную поверхность в помещении (на потолок)

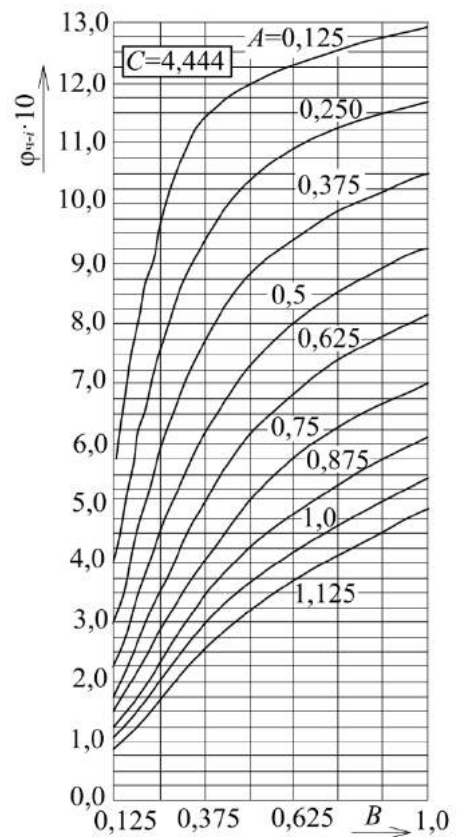
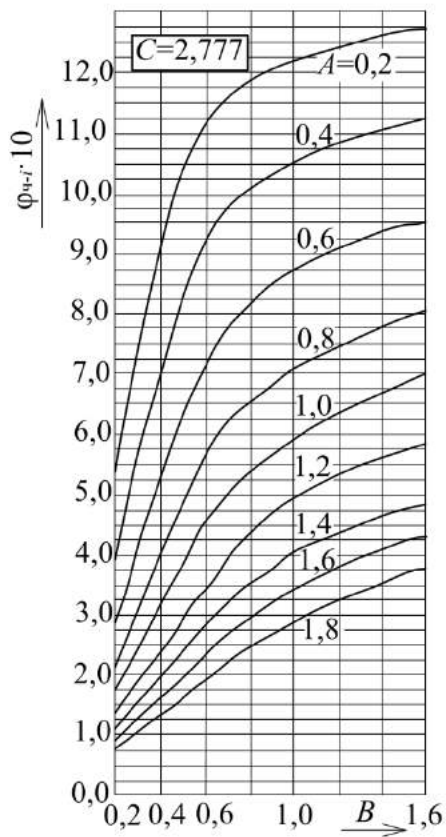
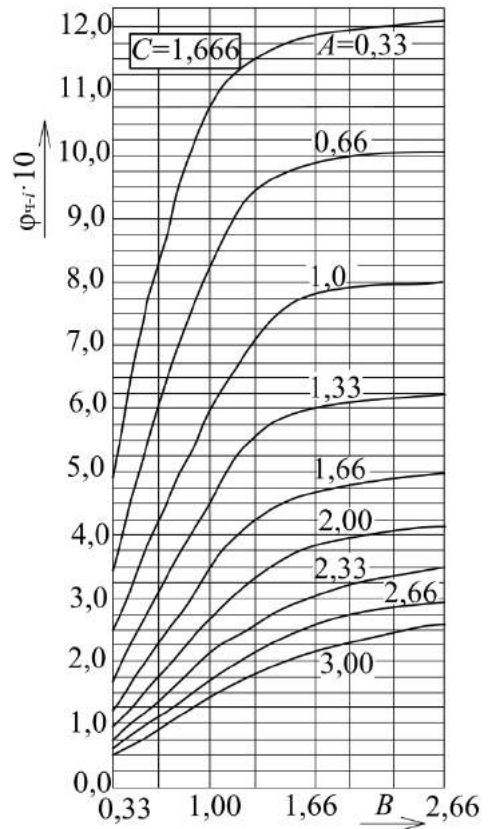
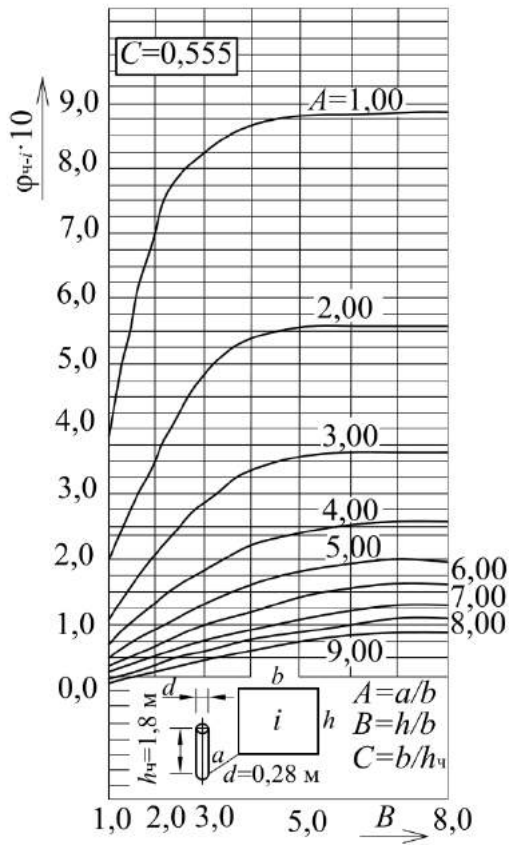


Рис. 1.9, б. Коэффициенты облученности со всей поверхности тела человека на вертикальную поверхность в помещении (стены)

Комфортные сочетания  $t_B$  и  $t_R$  отклоняются от средних значений приблизительно на  $\pm 1,5$  °С. В формулу (1.40) можно ввести  $t_{п}$  и записать ее с учетом отклонений в виде

$$t_R = 1,57t_{п} - 0,57t_B \pm 1,5 \text{ °С.} \quad (1.41)$$

Для летнего режима подстановка в уравнение (1.39) численных значений  $Q_{ч}^{л+к} = 64$  Вт, для летних условий  $t_{п} = 24$  °С при умеренной работе, имеем

$$t_R = 36 - 0,5t_B, \quad (1.42)$$

тогда

$$t_R = 1,5t_{п} - 0,5t_B \pm 1,5 \text{ °С.} \quad (1.43)$$

На рис. 1.10 приведено первое условие комфортности для зимы и лета.

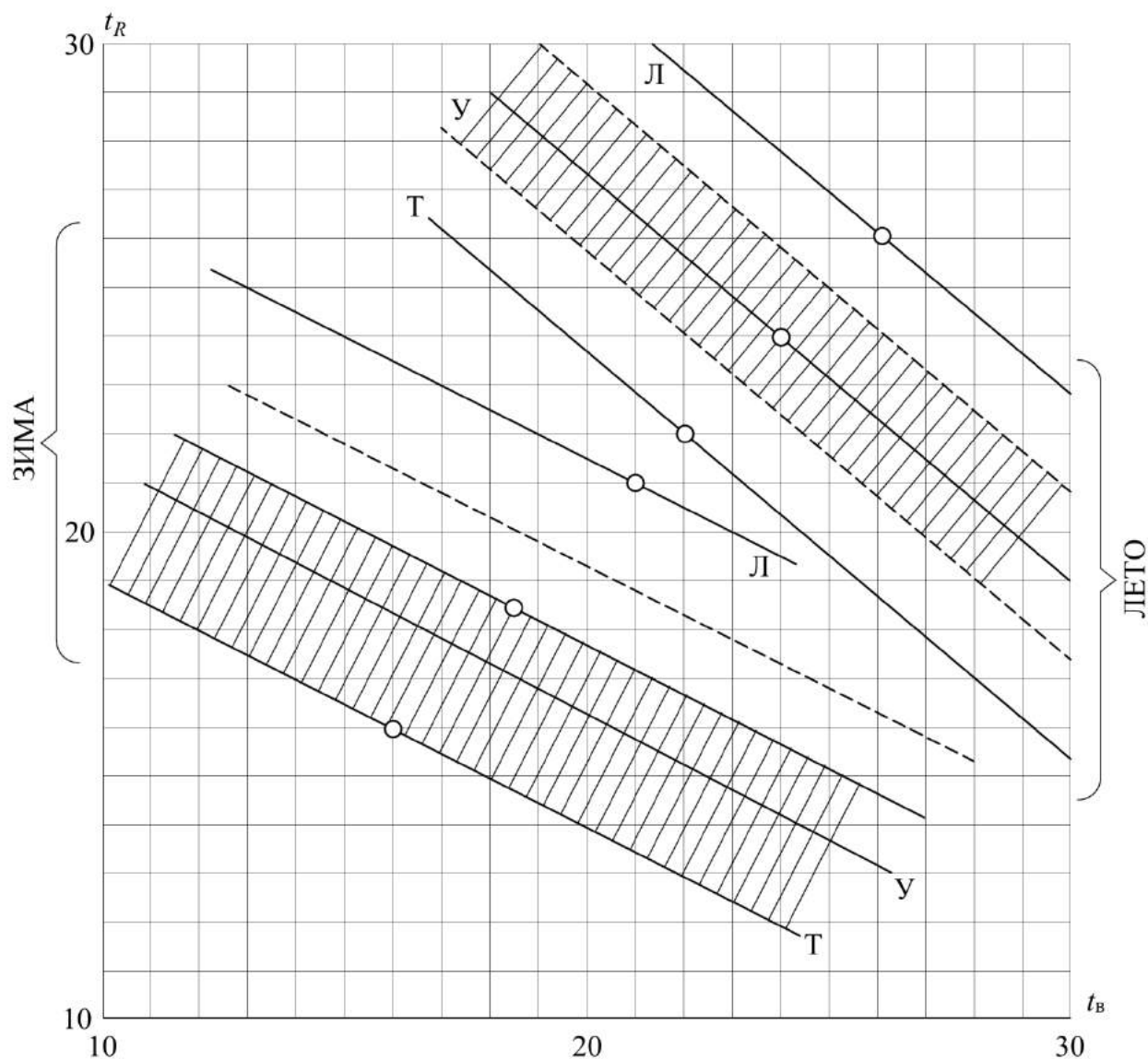


Рис. 1.10. Первое условие комфортности: Т – тяжелая, У – умеренная, Л – легкая работа (для умеренной работы заштрихована область допустимых отклонений)

*Второе условие комфортности* ограничивает интенсивность теплообмена при положении человека около нагретых и охлажденных поверхностей. Определяющей величиной в этом случае является интенсивность лучистого теплообмена (радиационный на наиболее невыгодно расположенной к излучению части поверхности тела человека). К радиационному теплообмену наиболее чувствительна поверхность головы. Радиационный баланс должен быть таким, чтобы любая элементарная площадка на поверхности головы отдавала излучением окружающим поверхностям не менее  $11,6 \text{ Вт/м}^2$ .

При расположении нагретой панели в потолке наиболее невыгодным (а потому расчетным) будет положение человека непосредственно под центром панели. При расположении панели в стене за расчетное принимают положение человека на расстоянии 1 м от нагретой поверхности.

Уравнение лучистого теплообмена для элементарной площадки на поверхности человека можно написать в виде

$$q_{\text{ч}}^{\text{л}} = C\varphi b_{\text{ч-п}}(\tau_{\text{ч}} - \tau_{\text{п}}) + C(1 - \varphi)b_{\text{ч-в.п}}(\tau_{\text{ч}} - \tau_{\text{в.п}}), \quad (1.44)$$

где  $\varphi$  – коэффициент облученности со стороны элементарной площадки на поверхности человека в сторону панели;  $C$  – приведенный коэффициент излучения;  $b$  – температурный коэффициент, который для зимнего режима при температуре поверхности головы человека  $\tau_{\text{ч}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура внутренних поверхностей  $\tau_{\text{в.п}} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и температура панели около  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  принимают:  $b_{\text{ч-п}} = 1,15$  и  $b_{\text{ч-в.п}} = 1,05$ .

Подставив в уравнение (1.44) принятые значения, при минимально допустимой теплоотдаче излучением  $q_{\text{ч}}^{\text{л}} = 11,6 \text{ Вт/м}^2$ , получаем формулу максимально допустимой температуры нагретой поверхности в помещении:

$$\tau_{\text{п}}^{\text{доп}} \leq 19,2 + \left( \frac{8,7}{\varphi_{\text{ч-п}}} \right). \quad (1.45)$$

Уравнение комфортности относительно нагретой поверхности (1.45) можно считать одной из составляющих второго условия комфортности.



Температура на охлажденных поверхностях для летнего режима при  $\tau_{\text{ч}} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{в.п}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\tau_{\text{п}}$  около  $12 \dots 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) по уравнению (1.44) при допустимой теплоотдаче излучением в сторону холодной поверхности  $q_{\text{ч}}^{\text{л}} = 69,8 \text{ Вт/м}^2$ , определяется по формуле

$$\tau_{\text{п}}^{\text{доп}} \geq 23 - \left( \frac{5}{\Phi_{\text{ч-п}}} \right). \quad (1.46)$$

Уравнение допустимой температуры на холодной поверхности в помещении (1.44) является второй составляющей второго условия комфортности. На холодной поверхности в помещении обычно недопустима конденсация водяных паров, и температура холодной поверхности, кроме условия (1.44), должна быть выше температуры точки росы воздуха в помещении.

На рис. 1.11 графически показаны зависимости (1.45 и 1.46), которые ограничивают область допустимых температур на поверхностях в помещении.

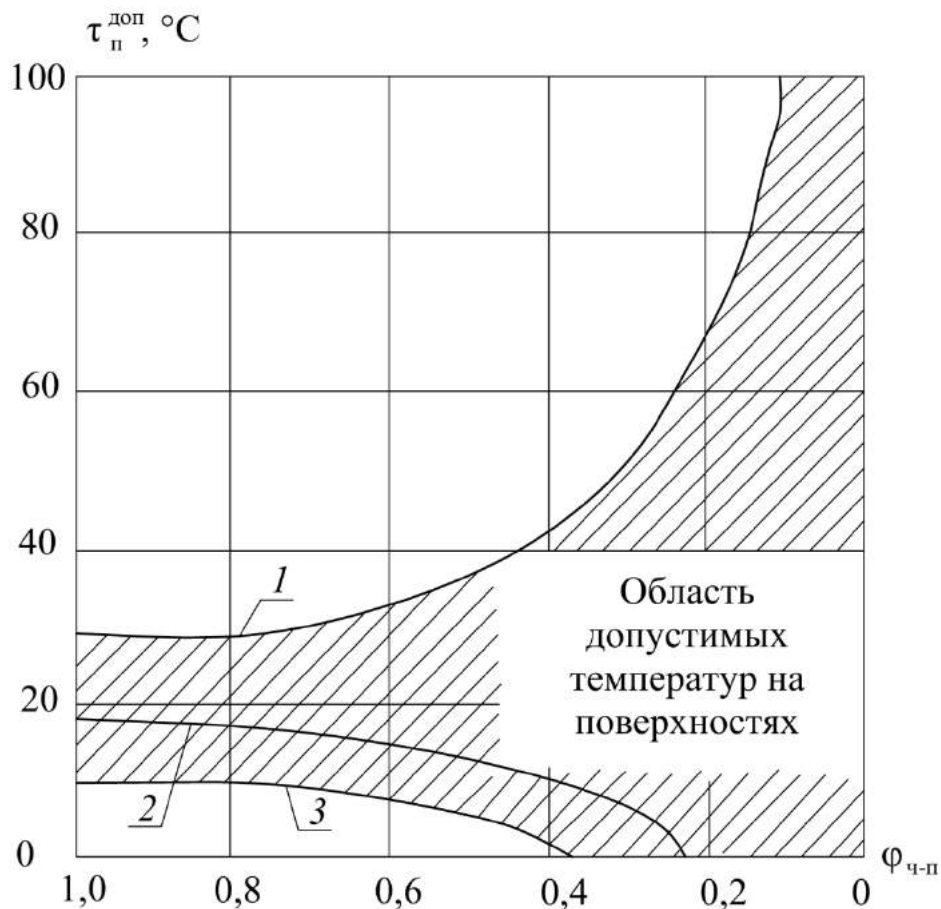


Рис. 1.11. Второе условие комфортности. Зависимость допустимых температур на нагретых (1), охлажденных (2) поверхностях и поверхности окон (3) от коэффициента облученности

Ориентировочно значения коэффициента  $\varphi_{\text{ч-п}}$  равны

$$\varphi_{\text{ч-п}} = 1 - 0,8 \left( \frac{x}{l} \right), \quad (1.47)$$

где  $l = \sqrt{F_{\text{п}}}$  – размер панели;  $x$  – расстояние от элементарной площадки на голове человека до греющей или охлаждающей панели.

Формулы (1.45 и 1.46) неприемлемы для определения допустимых температур на поверхности пола. Допустимые температуры для нагретой поверхности пола могут быть приняты по формуле

$$\tau_{\text{пл}} = 55,7 - 1,63t_{\text{в1}}, \quad (1.48)$$

где  $t_{\text{в1}}$  – температура воздуха на высоте 1 м.

Располагать панели систем летнего охлаждения помещений в плоскости пола обычно нецелесообразно.

В действующих нормах допускаются следующие температуры на поверхностях отопительных приборов в зависимости от их размещения в помещении:

- в зоне до 1,0 м от уровня пола 95 °С; в больницах и детских яслях 85 °С;
- на стенах и перегородках выше 1,0 м от уровня пола +45 °С;
- на потолках помещений высотой 2,5...2,8 м +28 °С; высотой 2,9...3,0 м +30 °С; высотой 3,1...3,4 м +33 °С;
- на полу +30 °С; в детских учреждениях до +24 °С; в плавательных бассейнах до +34 °С.

### **1.10. Контрольные вопросы для самостоятельной работы**

1. Что изучается в строительной теплофизике?
2. Дать определение теплового режима помещения.
3. Перечислите элементарные виды теплообмена.
4. Что такое теплопередача?
5. Дать определение теплопроводности.
6. Уравнение теплового баланса любой поверхности в помещении.
7. Напишите формулу теплового потока, передаваемого излучением от одной поверхности к другой.

8. Каким законом определяется величина интенсивности излучения.
9. Физический смысл величины приведенного коэффициента излучения при теплообмене между двумя серыми поверхностями.
10. Физический смысл коэффициента лучистой теплоотдачи.
11. Что такое конвекция?
12. Какими критериями определяется интенсивность конвекции для любых форм поверхностей?
13. Напишите формулу теплового потока, передаваемого конвекцией от воздуха в помещение.
14. Дайте описание свободной конвекции с учетом общей подвижности воздуха в помещении.
15. Запишите уравнение теплового баланса поверхности в помещении.
16. Приведите уравнение теплового баланса воздуха помещения.
17. Запишите систему уравнений общего теплообмена в помещении.
18. Напишите уравнение общего теплообмена в помещении (уравнение В.Н. Богословского).
19. Сформулируйте первое условие комфортности в помещении.
20. Напишите уравнения первого условия комфортности в помещении.
21. Сформулируйте физический смысл второго условия комфортности в помещении.
22. Напишите уравнения второго условия комфортности в помещении.

## Глава 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДЕНИЯ

### 2.1. Уравнение теплопроводности

Основной составляющей процесса передачи теплоты через ограждения является теплопроводность через материальные слои ограждения.

Процесс теплопроводности в материальных слоях конструкции подчиняется закону Фурье, уравнение которого в дифференциальной форме рассматривается в курсе тепломассообмена.

Выведем уравнение теплопроводности в конечных разностях на примере одномерного температурного поля при передаче теплоты через однородную стенку (рис. 2.1). Толща стенки разбивается на элементарные слои размером  $\Delta x$ .

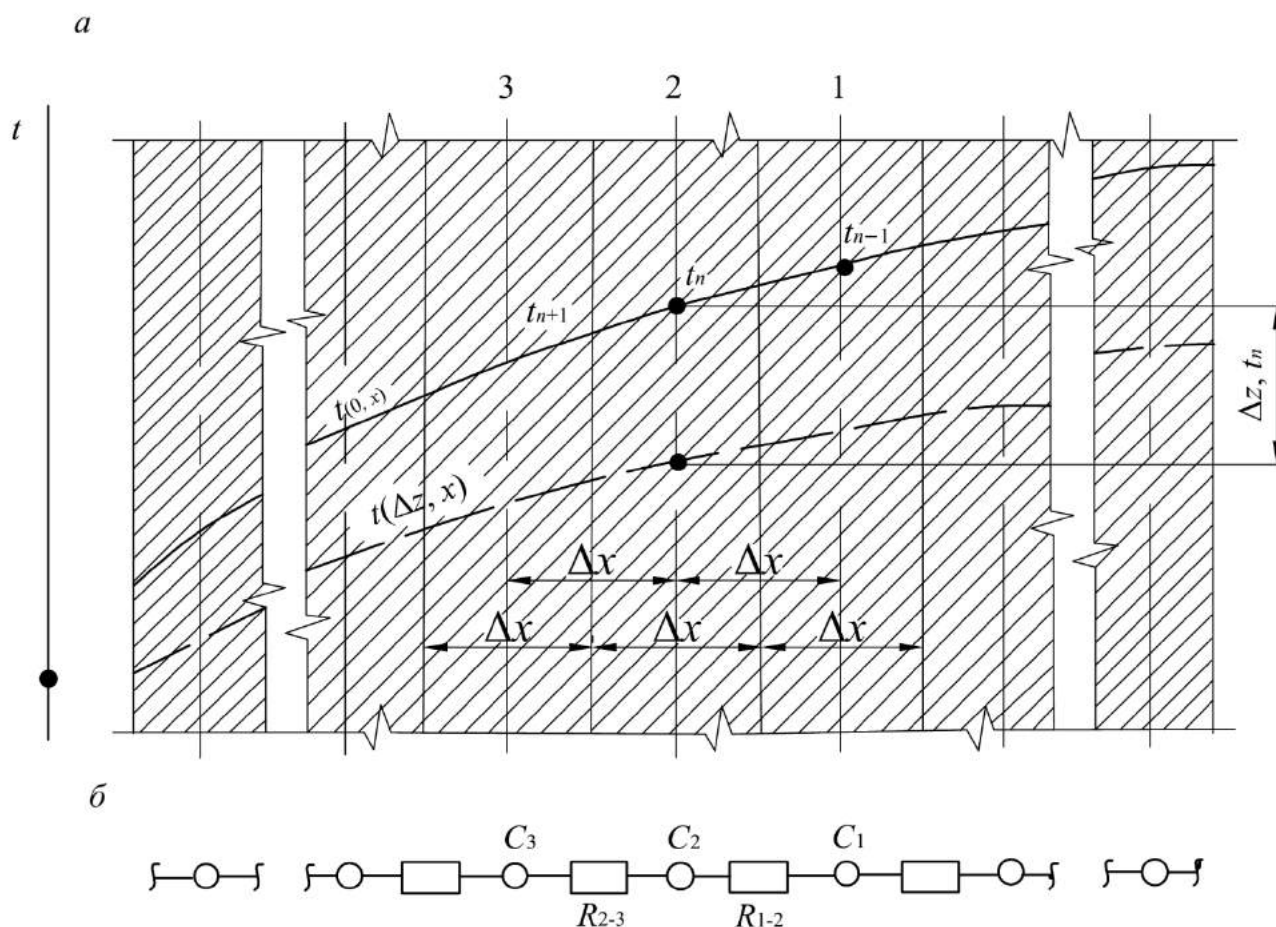


Рис. 2.1. Схема для вывода уравнения теплопроводности в конечных разностях:  
*a* – непрерывное поле; *б* – тепловая цепочка

Процесс нестационарной передачи в толще определяется двумя законами: проводимости и аккумуляции теплоты.

Согласно закону проводимости тепловой поток  $q$  пропорционален градиенту температуры  $dt/dx$ :

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (2.1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Для участка стены между осями элементарных слоев это уравнение можно написать в виде

$$q = \frac{\lambda}{\Delta x} (t_1 - t_2), \quad (2.2)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры на осях соседних элементарных слоев 1 и 2.

Уравнение (2.2) справедливо только для линейного распределения температур в условиях стационарной передачи теплоты.

При нестационарных условиях, учитывая криволинейное распределение температуры в слоях, уравнение проводимости может быть записано в виде

$$q = \frac{1}{(\Delta x / \lambda)} (t_1 - t_2), \quad (2.3)$$

где  $\frac{\Delta x}{\lambda} = R_{1-2}$  – сосредоточенное термическое сопротивление между сечениями 1 и 2 ограждающей конструкции.

Уравнение (2.3) справедливо как для стационарных, так и для нестационарных условий, в отличие от (2.2).

Закон аккумуляции теплоты устанавливает, что приращение количества теплоты  $dQ$ , аккумулированное слоем  $dx$ , пропорционально приращению во времени его температуры  $dt$ . Изменение количества аккумулированной теплоты  $\Delta Q$  для элементарного слоя  $\Delta x$  при изменении во времени ( $z$ ) его средней температуры на  $\Delta_z t$  составит

$$\Delta Q = c\gamma \cdot \Delta x \cdot \Delta_z t, \quad (2.4)$$

где  $c\gamma$  – объемная теплоемкость материала.

Составим уравнение теплового баланса элементарного слоя  $n$  при распределении температур в сечении, отмеченном на рис. 2.1 индексом  $l$ . Слой  $n$  обменивается теплотой с соседними элементарными слоями и, согласно закону проводимости, за время  $\Delta z$  он получит от слоя  $(n + 1)$  количество теплоты

$$q_{n+1,n}\Delta z = \frac{\lambda}{\Delta x}(t_{n+1} - t_n)\Delta z, \quad (2.5)$$

а отдаст слою  $(n - 1)$  количество теплоты

$$q_{n,n-1}\Delta z = \frac{\lambda}{\Delta x}(t_n - t_{n-1})\Delta z. \quad (2.6)$$

Разность  $\Delta Q_n$  между количеством теплоты, определенным уравнениями (2.5) и (2.6), будет аккумулирована слоем  $n$  и повысит его среднюю температуру по формуле (2.4) на  $\Delta_z t_n$ .

Уравнение теплового баланса слоя  $n$  можно записать в виде

$$c\gamma \cdot \Delta x \cdot \Delta_z t_n = \frac{\lambda}{\Delta x}[(t_{n+1} - t_n) - (t_n - t_{n-1})]\Delta z, \quad (2.7)$$

которое после преобразований может быть записано следующим образом

$$c\gamma \frac{\Delta_z t_n}{\Delta z} = \frac{\lambda}{\Delta x^2} \Delta_x^2 t_n, \quad (2.8)$$

где

$$\Delta_x^2 t_n = (t_{n+1} - t_n) - (t_n - t_{n-1}) = \Delta t_{n+1,n} - \Delta t_{n,n-1} = t_{n+1} + t_{n-1} - 2t_n \quad (2.9)$$

является второй конечной разностью температур, т. е. разностью разностей температур между элементарными слоями. Индекс  $x$  показывает, что имеется в виду изменение температуры в пространстве по координате  $x$ .

При переходе к пределу и замене конечных разностей бесконечно малыми приращениями из уравнения (2.8) получаем дифференциальное уравнение следующего вида (уравнение Фурье):

$$c\gamma \frac{dt}{dz} = \lambda \frac{d^2 t}{dx^2}. \quad (2.10)$$

## 2.2. Теплофизические характеристики строительных материалов

Строительные материалы являются в своем большинстве сложными капиллярно-пористыми телами, поры которых могут быть заполнены влажным воздухом, жидкой влагой и льдом. Особенности строения определяют большую изменчивость теплофизических характеристик строительных материалов.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), характеризует свойство материалов проводить теплоту.

В толще влажного материала передача теплоты происходит несколькими путями. Через твердый скелет, а также пленки жидкой влаги и лед теплота передается посредством теплопроводности. В порах, заполненных влажным воздухом, помимо теплопроводности, теплообмен происходит конвекцией и излучением. Определенное количество теплоты переносится фильтрующимся через материал воздухом. Свойство теплопроводности зависит при прочих равных условиях от размера пор. В сообщающихся порах могут возникать конвективные токи воздуха, которые повышают проводимость теплоты.

Всю совокупность сложных явлений, участвующих в передаче теплоты в толще материалов, обычно приводят к теплопроводности, выражающуюся через коэффициент теплопроводности. Этот коэффициент является собирательным эквивалентным коэффициентом, учитывающим все физические явления, происходящие в материале и связанные с передачей теплоты.

Важной для строительных материалов является зависимость  $\lambda$  от влажности. С увеличением влажности материалов коэффициент теплопроводности возрастает. Увеличение коэффициента связано с замещением воздуха в порах жидкой влагой, имеющей более высокий коэффициент теплопроводности.

Влажность материала в ограждениях изменяется во времени. В начальный момент это связано с внесением в конструкцию «строительной влаги». В процессе эксплуатации (после того как часть влаги испарится) материалы стен и перекрытий входят в некоторый установившийся квазистационарный влажностный режим. Значения коэффициента  $\lambda$  для расчета теплового режима зда-

ний принято устанавливать по так называемой нормальной влажности в период эксплуатации. В нормах даются три градации влажностного состояния конструкций, которые связаны с влажностными характеристиками внутреннего и наружного климата.

### 2.3. Основы термодинамики влажного материала

*Влага воздуха помещения.* Количество влаги в воздухе определяется его влагосодержанием  $d$  в г влаги на 1 кг сухой части влажного воздуха. Кроме того, его влажностное состояние характеризуют упругостью, или парциальным давлением водяных паров  $e$ , мм рт.ст., или относительной влажностью  $\varphi$ , %.

Воздух обладает определенной влагоудерживающей способностью. Например, при 20 °С каждый 1 кг сухого воздуха удерживает при полном насыщении 17,2 г водяных паров. При низкой температуре способность воздуха удерживать влагу становится незначительной (2 г при –12 °С), с повышением температуры она возрастает (51 г при 40 °С).

Упругость водяного пара  $e$  качественно отражает свободную энергию влаги в воздухе. Величина  $e$  возрастает от нуля до максимальной упругости  $E$ , соответствующей полному насыщению. Упругость  $e$  в этой связи можно рассматривать как измеритель энергетического потенциала водяных паров в воздухе. Диффузия влаги происходит в воздухе от мест с большей упругостью водяных паров к местам с меньшей упругостью.

*Основы термодинамики влажного материала.* Наиболее полная методика энергетической оценки форм влаги и система энергетической классификации связи влаги с материалом была предложена П.А. Ребиндером, согласно которой все формы связи влаги в зависимости от прочности делятся на три вида. Наиболее прочной является химическая форма связи. При рассмотрении влагопередачи в ограждениях ее можно не учитывать.

Вода, расположенная непосредственно на поверхности зерен и связанная силами молекулярного взаимодействия, называется адсорбционной. Адсорбционную влагу относят к физико-химической форме связи.



Основной объем жидкой влаги находится в порах и капиллярах материала вне сферы действия сил физико-химической формы связи и удерживается силами поверхностного натяжения воды и силами смачивания материала. Эту форму связи называют физико-механической. К ней относится влага макро- и частично микрокапилляров, стыковая и пленочная.

В расчете влажностного режима конструкций желательно воспользоваться наиболее общим методом, который позволил бы без анализа частных закономерностей и микроявлений получить общую картину влагообмена и его закономерности. Таким методом является термодинамический.

Фазы влаги в материале находятся в контакте между собой и между ними может происходить тепло- и массообмен. Компоненты и фазы имеют определенную энергию, энтальпию, энтропию, температуру и т. д. Определение этих термодинамических функций состояния возможно с помощью независимых переменных: массы  $n_i$ , геометрического параметра (например, объема)  $v_i$  и энтропии  $s_i$  или температуры  $T_i$  каждой части. Все остальные свойства части могут быть найдены с помощью этих трех независимых переменных.

Состояние влажного материала удобно оценивать изменением свободной энергии  $F_i$  фазы  $i$ :

$$dF_i = \frac{\partial F_i}{\partial T_i} dT_i + \frac{\partial F_i}{\partial v_i} dv_i + \frac{\partial F_i}{\partial n_i} dn_i. \quad (2.11)$$

В этом уравнении отношение  $\frac{\partial F_i}{\partial T_i} = -s_i$  – энтропия фазы;  $\frac{\partial F_i}{\partial v_i} = -p_i$  – давление,

действующее со стороны фазы;  $\frac{\partial F_i}{\partial n_i} = \mu_i$  – химический потенциал фаз.

С учетом принятых обозначений уравнение (2.11) для  $dF_i$  можно переписать в виде зависимости

$$dF_i = -s_i dT_i - p dv_i + \mu dn_i, \quad (2.12)$$

которая является формой записи основного термодинамического уравнения Гиббса для открытой системы при принятых независимых переменных.

Для каждой фазы влаги формула (2.12) будет иметь соответствующий вид.

Для жидкой фазы, в которой могут быть растворенные примеси, значение  $dF_{\text{ж}}$  равно

$$dF_{\text{ж}} = -s_{\text{ж}}dT_{\text{ж}} - p_{\text{ж}}dv_{\text{ж}} + \sum \mu_{\text{ж}i}dn_{\text{ж}}. \quad (2.13)$$

Величина  $\mu_{\text{ж}j}$  есть химический потенциал жидкой влаги, вызванный наличием в ней растворимого вещества  $j$ . Также необходимо учитывать действие на жидкую влагу гравитационного поля с потенциалом  $\theta_{\Gamma}$  и вводить в равенство (2.13) дополнительное слагаемое:

$$dF_{\text{ж}} = -s_{\text{ж}}dT_{\text{ж}} - p_{\text{ж}}dv_{\text{ж}} + \sum \mu_{\text{ж}i}dn_{\text{ж}} + \theta_{\Gamma}dn_{\text{ж}}. \quad (2.14)$$

Плотность жидкой влаги  $\rho_{\text{ж}}$  можно считать практически неизменной, поэтому второй член правой части уравнения (2.14) можно преобразовать, умножив и разделив на  $\rho_{\text{ж}}$ , и привести его к виду

$$dF_{\text{ж}} = -s_{\text{ж}}dT_{\text{ж}} + \left( -\frac{p_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} + \sum \mu_{\text{ж}} + \theta_{\Gamma} \right) dn_{\text{ж}}. \quad (2.15)$$

Из уравнения (2.15) следует, что перенос жидкой фазы происходит под влиянием величины, обозначенной скобками во втором слагаемом правой части уравнения. Эта величина по физическому смыслу является полным термодинамическим потенциалом  $\theta_{\text{ж}}$  жидкой влаги

$$\theta_{\text{ж}} = -\frac{p_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} + \sum \mu_{\text{ж}} + \theta_{\Gamma}. \quad (2.16)$$

Из уравнения (2.15) следует, что перенос массы жидкой фазы будет происходить от области с более высоким потенциалом к области с более низким потенциалом ( $d\theta_{\text{ж}} < 0$ ), поэтому разность потенциалов влажности  $\theta$  определяет возможность, направление и интенсивность переноса влаги (независимо от ее фазового состояния) и возможный предел влажностного равновесия в переходном процессе влагообмена.

Для измерения потенциала  $\theta$  необходимо введение специальной шкалы потенциала влажности. Потенциал влажности в процессе переноса влаги играет такую же роль, как температура, которая является потенциалом в процессе переноса теплоты. Введем постулат. Два влажных тела, находящиеся во влажностном равновесии с третьим, находятся во влажностном равновесии и друг с

другом. Потенциал влажности можно измерить, определяя равновесную влажность определенного материала. Наиболее удобно измерять величину  $\theta$  влажного тела равновесной влажностью фильтровальной бумаги, находящейся с ним в состоянии влажностного равновесия.

Потенциал влажности измеряют в градусах влажности (град В или  $^{\circ}\text{В}$ ). Равновесную массовую влажность фильтровальной бумаги, соответствующую максимальной гигроскопической влажности при эталонной температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , принимают за  $100^{\circ}\text{В}$ ; сухой бумаге соответствует  $0^{\circ}\text{В}$ . Изменение равновесной влажности фильтровальной бумаги на  $1/100$  величины ее максимальной гигроскопической влажности при эталонной температуре равно  $1^{\circ}\text{В}$ . На рис. 2.2 приведен график зависимости между потенциалом влажности  $\theta$  и влажностью фильтровальной бумаги при различных температурах.

Все положения о потенциале влажности остаются справедливыми и в области отрицательных температур.

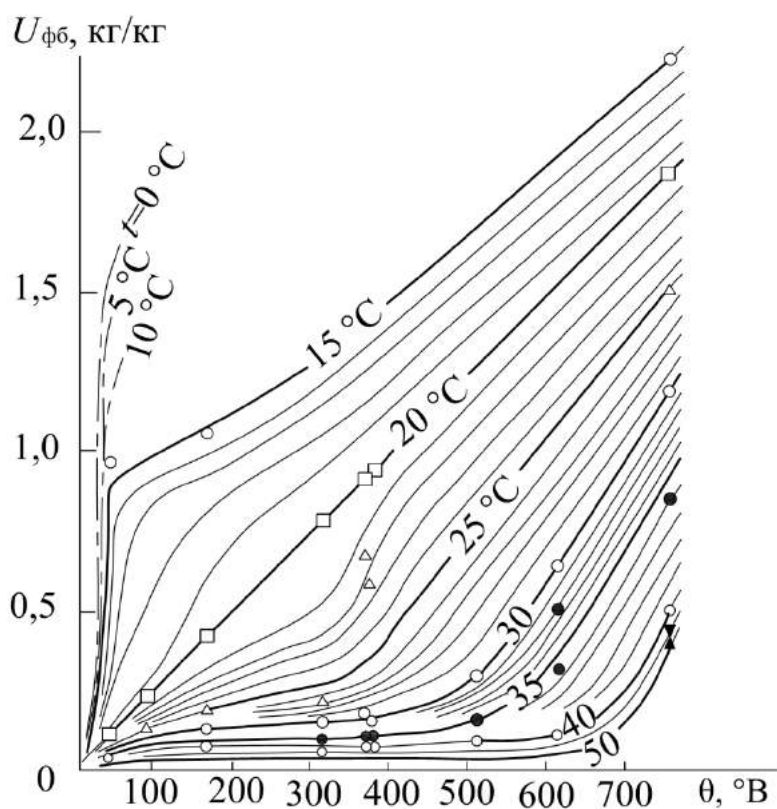


Рис. 2.2. Зависимость между потенциалом влажности и влажностью фильтровальной бумаги при различных температурах

Постановка задачи о нестационарной влагопередаче, основанная на потенциале влажности, обладает рядом достоинств. Однако в расчетной практике она применяется редко в связи с отсутствием данных о влажностных характеристиках в шкале потенциала влажности большинства строительных материалов.

#### **2.4. Учет влажностного режима при расчете теплопередачи через ограждения**

Влагосодержание материалов наружных ограждений периодически изменяется в течение года, несколько возрастая в апреле-мае. Зимой, в декабре-январе, значения влажности близки к средним за год. Теплотехнический расчет ограждений проводится для этого периода, поэтому выбор теплофизических характеристик материалов должен проводиться исходя из данных о среднегодовой влажности ограждений.

С помощью шкалы потенциала влажности можно определить влажностное состояние внутреннего воздуха, материалов и конструкций ограждения и оценить комплексное влажностное воздействие наружного климата на ограждение.

Для оценки среднегодового режима достаточно рассмотрения стационарной влагопередачи. Потенциал влажности толщи  $\theta_T$  однородного ограждения можно принять равным среднему между потенциалом внутренней  $\theta_B$  и наружной  $\theta_H$  сред:

$$\theta_T = \frac{1}{2}(\theta_B + \theta_H). \quad (2.17)$$

Значения  $\theta_B$  приведены в табл. 2.1 при средних за год температуре и относительной влажности внутреннего воздуха.

Влажностная обстановка внутри помещений зависит от их назначения. В соответствии с рекомендациями СНиП [3] помещения по степени влажности воздуха делятся на четыре группы. Диапазоны изменения  $\theta_B$  для каждой группы приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Значения потенциала влажности наружной среды для различных влажностных зон

Город	Влажностная зона по СНиП	Характеристики тепловлажностного состояния								Влажностный режим по СНиП $\theta_n, ^\circ\text{B}$
		внутреннего климата			массива ограждения			наружного климата		
		$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{в}, \%$	$\theta_{в}, ^\circ\text{B}$	$t_{т}, ^\circ\text{C}$	$U, \text{кг/кг}$	$\theta_{т}, ^\circ\text{B}$	$t_{н}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{н}, ^\circ\text{B}$	
Санкт-Петербург	Влажная	18,9	58,0	27	11,6	0,025	32	4,2	37	Более 37
Москва	Нормальная	18,8	47,0	24	11,2	0,020	30	3,6	36	24,5...37
Иркутск	Сухая	18,7	57,4	26	8,8	0,010	25	-1,2	24	До 24,5

Таблица 2.2

Значения потенциала влажности воздуха помещения

Назначение зданий и помещений	Влажностный режим помещения	Условия в помещении					Влажностный режим помещения по СНиП $\theta_{в}, ^\circ\text{B}$
		зимние		среднегодовые			
		$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{в}, \%$	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{в}, \%$	$\theta_{в}, ^\circ\text{B}$	
Проектное бюро, библиотека	Сухой	18	До 50	19	До 45	До 23	До 23
Жилой дом, поликлиника, детские ясли, сад	Нормальный	18	50...60	19	До 50	До 24,5	До 24,5
Душевые	Влажный	25	61...75	25	59...75	37...61	До 61
Бани, прачечные	Мокрый	30	Более 75	30	Более 75	Более 110	Более 61

Эксплуатационное влажностное состояние материалов в ограждении по СНиП определяется категориями *A*, *B* (ранее дополнительно *B'*), для которых приведены значения теплофизических характеристик строительных материалов. В табл. 2.3 приведены значения  $\theta_{т}$ , соответствующие категориям влажности *A*, *B*, *B'*. Зная влажностную зону района строительства и группу влажности помещений, для однородного ограждения по табл. 2.3 находят категорию эксплуатационной влажности для определения по СНиП значений теплофизических характеристик материала.

Табл. 2.3 может быть использована для расчета многослойных конструкций. В условиях стационарной влагопередачи среднее значение потенциала влажности произвольного слоя материала  $\theta_{т}$  в многослойном ограждении составляет

$$\theta_{т} = \theta_{в} - \frac{H_{в-x}}{H_0} (\theta_{в} - \theta_{н}), \quad (2.18)$$

где  $H_{в-х}/H_0$  – отношение сопротивлений влагопередаче части ограждения от внутренней среды до середины расчетного слоя материала и всего ограждения.

Таблица 2.3

Диапазоны значений потенциалов влажности  $\theta_t$  материала ограждений, соответствующие различным категориям эксплуатационной влажности

Влажностный режим помещений		Потенциал влажности, соответствующий влажностным зонам строительства					
Режим	$\theta_{в}, \text{°В}$	Сухая зона, $\theta_n = 24,5 \text{°В}$ и менее		Нормальная зона, $\theta_n$ от 24,5 до 37°В		Влажная зона, $\theta_n = 37\text{°В}$ и более	
		категория	°В	категория	°В	категория	°В
Сухой	До 23	<i>A</i>	До 23,7	<i>A</i>	До 30,0	<i>B</i>	Более 30
Нормальный	До 24,5	<i>A</i>	От 23,7	<i>A</i>	От 23,7	<i>B</i>	Более 30
			до 25		до 31,0		
Влажный	До 61	<i>B</i>	От 24,7	<i>B</i>	От 31,0	<i>B'</i>	Более 31
			до 42,7		до 49,0		
Мокрый	Более 61	<i>B'</i>	Более 42,7	<i>B'</i>	Более 49,0	<i>B'</i>	Более 49

Для всех слоев ограждения по формуле (2.18) и табл. 2.3 устанавливают категории влажности, в соответствии с которыми по СНиП выбирают теплофизические характеристики.

## 2.5. Сопротивление паропрооницанию ограждающих конструкций

Сопротивление паропрооницанию  $R_{п}, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ , ограждающей конструкции (в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации) должно быть не менее наибольшего из следующих требуемых сопротивлений паропрооницанию:

а) требуемого сопротивления паропрооницанию  $R_{п1}^{\text{тр}}, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ , (из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации), определяемого по формуле

$$R_{п1}^{\text{тр}} = \frac{(e_{в} - E)R_{п.н}}{E - e_{н}}; \quad (2.19)$$

б) требуемого сопротивления паропрооницанию  $R_{п2}^{\text{тр}}, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$  (из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицатель-

ными среднемесячными температурами наружного воздуха), определяемого по зависимости:

$$R_{п_2}^{тр} = \frac{0,0024z_0(e_B - E_0)}{\gamma_w \delta_w \Delta w_{cp} + \eta}. \quad (2.20)$$

В формулах (2.19) и (2.20):  $e_B$  – упругость водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетной температуре и влажности этого воздуха;  $R_{п.н}$  – сопротивление паропроницанию,  $m^2 \cdot ч \cdot Па / мг$ , части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и плоскостью возможной конденсации;  $e_n$  – средняя упругость водяного пара наружного воздуха, Па, за годовой период, определяемая согласно [11];  $z_0$  – продолжительность, сут, периода влагонакопления, принимаемая равной периоду с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха согласно [11];  $E_0$  – упругость водяного пара, Па, в плоскости возможной конденсации, определяемая при средней температуре наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами;  $\gamma_w$  – плотность материала увлажняемого слоя,  $кг/м^3$ , принимаемая равной  $\gamma_0$ ;  $\delta_w$  – толщина увлажняемого слоя ограждающей конструкции, м, принимаемая равной  $2/3$  толщины однородной (однослойной) стены или толщине теплоизоляционного слоя (утеплителя) многослойной ограждающей конструкции;  $\Delta w_{cp}$  – предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, %, за период влагонакопления  $z_0$ , принимаемое по табл. 2.4;  $E$  – упругость водяного пара, Па, в плоскости возможной конденсации за годовой период эксплуатации:

$$E = \frac{1}{12}(E_1 z_1 + E_2 z_2 + E_3 z_3), \quad (2.21)$$

где  $E_1, E_2, E_3$  – упругости водяного пара, Па, принимаемые по температуре в плоскости возможной конденсации, определяемой при средней температуре наружного воздуха соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего пе-

риодов;  $z_1, z_2, z_3$  – продолжительность, мес, зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов, определяемая согласно [11] с учетом следующих условий:

– к зимнему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха ниже минус 5 °С;

– к весенне-осеннему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха с минус 5 до плюс 5 °С;

– к летнему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха выше плюс 5 °С.

Коэффициент  $\eta$  определяется по зависимости

$$\eta = \frac{0,0024(E_o - e_{н.о})z_o}{R_{п.н}}, \quad (2.22)$$

где  $e_{н.о}$  – средняя упругость водяного пара наружного воздуха, Па, периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, определяемая по [11].

Сопротивление паропроницанию  $R_{п}$ , м<sup>2</sup>·ч·Па/мг, однослойной или отдельного слоя многослойной ограждающей конструкции равно

$$R_{п} = \frac{\delta}{\mu}, \quad (2.23)$$

где  $\delta$  – толщина слоя ограждающей конструкции, м;  $\mu$  – расчетный коэффициент паропроницаемости материала слоя ограждающей конструкции, мг/(м·ч·Па), см.

Приложение А.

Таблица 2.4

К определению величины предельно допустимого приращения расчетного массового отношения влаги в материале  $\Delta w_{ср}$ , %

Материал ограждающей конструкции	$\Delta w_{ср}$ , %
1. Кладка из глиняного кирпича и керамических блоков	1,5
2. Кладка из силикатного кирпича	2,0
3. Легкие бетоны на пористых заполнителях (керамзитобетон, шунгзитобетон, перлитобетон, пемзобетон и др.)	5,0
4. Ячеистые бетоны (газобетон, пенобетон, газосиликат)	6,0
5. Пеногазостекло	1,5
6. Фибролит цементный	7,5
7. Минераловатные плиты и маты	3,0
8. Пенополистирол и пенополиуретан	25,0
9. Теплоизоляционные засыпки из керамзита, шунгзита, шлака	3,0
10. Тяжелые бетоны	2,0



Сопротивление паропрооницанию многослойной ограждающей конструкции (или ее части) равно сумме сопротивлений паропрооницанию составляющих ее слоев. Сопротивление паропрооницанию воздушных прослоек в ограждающих конструкциях следует принимать равным нулю независимо от расположения и толщины этих прослоек.

Для обеспечения требуемого сопротивления паропрооницанию  $R_{п}^{тp}$  ограждающей конструкции следует определять сопротивление паропрооницанию  $R_{п}$  конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации.

Не требуется определять сопротивление паропрооницанию следующих ограждающих конструкций:

- однородных (однослойных) наружных стен помещений с сухим или нормальным режимом;
- двухслойных наружных стен помещений с сухим или нормальным режимом, если внутренний слой стены имеет сопротивление паропрооницанию более  $1,6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ .

Для защиты от увлажнения теплоизоляционного слоя (утеплителя) в покрытиях зданий с влажным или мокрым режимом следует предусматривать пароизоляцию (ниже теплоизоляционного слоя), которую следует учитывать при определении сопротивления паропрооницанию покрытия.

## **2.6. Контрольные вопросы для самостоятельной работы**

1. Что является основной составляющей процесса передачи теплоты через ограждения?
2. Что устанавливает закон аккумуляции теплоты?
3. Напишите дифференциальное уравнение Фурье.
4. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
5. Какой величиной определяется количество влаги в воздухе?
6. Приведите уравнение изменения свободной энергии состояния влажного материала.

7. В чем заключается физический смысл потенциала влажности?
8. Чем измеряют величину потенциала влажности?
9. Напишите формулу для определения среднего значения потенциала влажности в условиях стационарной влагопередаче.
10. Нормирование величины требуемого сопротивления паропрооницанию.
11. Приведите формулу для определения сопротивления паропрооницанию из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации.
12. Напишите формулу для определения сопротивления паропрооницанию из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха.
13. В чем состоит физический смысл коэффициента паропрооницаемости слоя материала ограждающей конструкции?
14. Для каких ограждающих конструкций допускается не определять величину сопротивления паропрооницанию?
15. Что следует предусматривать для защиты от увлажнения теплоизоляционного слоя зданий с влажным и мокрым режимами?

## Глава 3. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ

### 3.1. Одномерное температурное поле

Процесс передачи теплоты через ограждение, все параметры которого остаются неизменными во времени, называются стационарным.

Простейшим является одномерное стационарное температурное поле, которое для многослойного ограждения при принятии масштаба термического сопротивления  $R = x/\lambda$  имеет вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} = 0. \quad (3.1)$$

Конструкции современных многослойных ограждений характеризуются разделением функций между отдельными материальными слоями (рис. 3.1).

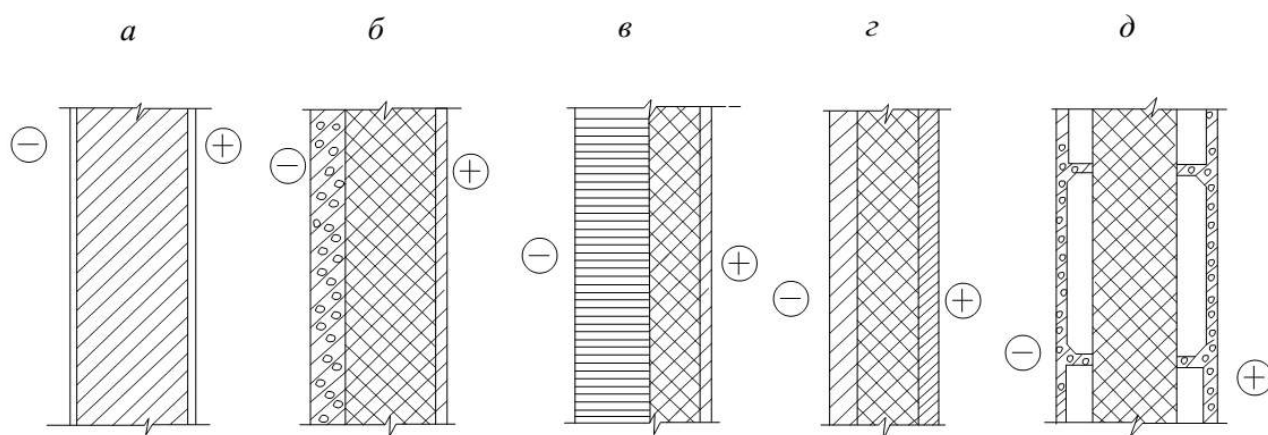


Рис. 3.1. Характерные типы современных конструкций наружных ограждений зданий: *a* – однослойная керамзитобетонная панель с внутренними и внешними фактурными слоями; *б* – двухслойная панель (бетон, эффективный теплоизоляционный материал с внешним фактурным слоем); *в* – виброкирпичная панель; *г* – трехслойная панель; *д* – трехслойная прокатная панель

В общем случае ограждение состоит из конструктивного (несущего) слоя, теплоизоляционного слоя, а также паро- или гидроизоляционного слоя и внутреннего и внешнего фактурных слоев. В отношении режима теплообмена основными являются конструктивный и теплоизоляционные слои. Несущим обычно является слой из плотного, а поэтому обладающего значительной теплопроводностью и плохо проницаемого для водяного пара и воздуха материала. Материал теплоизоляционного слоя обычно пористый, рыхлый, а поэтому малотеплопроводный и хорошо пропускающий водяной пар и воздух.

Теплоизоляционный слой может быть расположен с внутренней и внешней сторон ограждения (рис. 3.2). Следует иметь в виду, что с теплотехнической точки зрения выгоднее располагать теплоизоляционный слой с внешней стороны ограждения (рис. 3.2, а), т.к. в этом случае при прочих равных условиях:

- ограждения более теплоустойчивы как к сквозному затуханию колебаний температуры наружного воздуха, так и к колебаниям теплоступлений в помещение;

- отсутствует возможность выпадения конденсата и накопления жидкой влаги в толще конструкции, а поэтому не требуется устройства дополнительной пароизоляции с внутренней поверхности ограждения; стык между материальными слоями находится при положительных температурах, что исключает периодическое образование льда, нарушающего контакт между слоями.

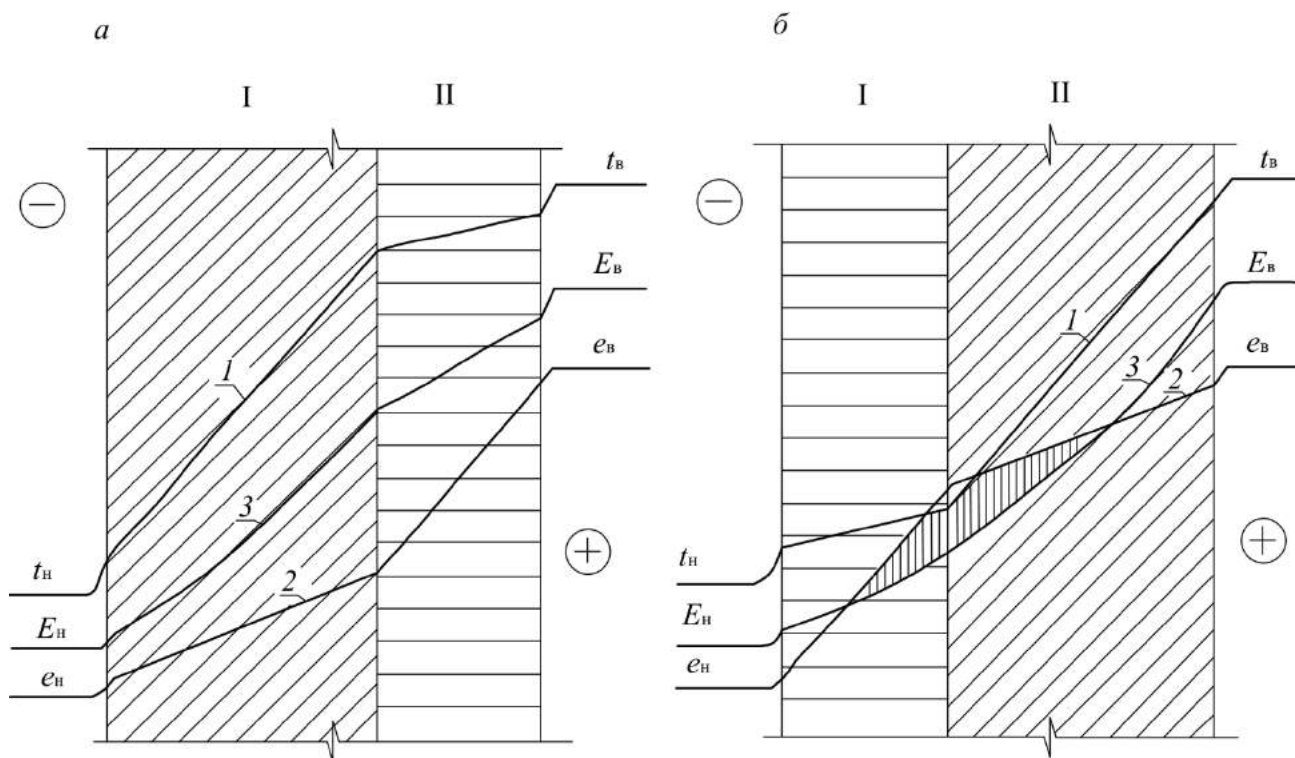


Рис. 3.2. Кривые распределения температуры  $t$  (1), упругости  $e$  (2) и максимальной упругости  $E$  (3) водяного пара по толще двухслойного ограждения при расположении теплоизоляционного слоя с наружной (а) и внутренней (б) сторон ограждения (вертикальной штриховкой отмечено условие возможной конденсации); I – конструктивный слой; II – изоляционный слой

Недостатком такого решения является влияние атмосферных воздействий непосредственно на теплоизоляционный материал, что вызывает необходимость устройства специального защитного слоя, т.к. обычные теплоизоляционные материалы обладают малой коррозионной стойкостью. Устройство плотного защитного слоя может привести к такой ситуации, когда более выгодной окажется конструкция с расположением теплоизоляции с внутренней стороны ограждения (рис. 3.2, б) с дополнительным при необходимости пароизоляционным слоем на внутренней поверхности.

Одномерное температурное поле ограждения может быть рассчитано достаточно просто (рис. 3.3). Его теплозащитные свойства определяются сопротивлением теплопередаче ограждения  $R_o$ , которое равно сумме сопротивлений теплопередаче отдельных материальных слоев  $R_i$ , воздушной прослойки  $R_{в.п}$  и теплообмену на внутренней  $R_b = 1/\alpha_b$  и наружной  $R_n = 1/\alpha_n$  поверхностях:

$$R_o = R_b + \sum R_i + R_{в.п} + R_n. \quad (3.2)$$

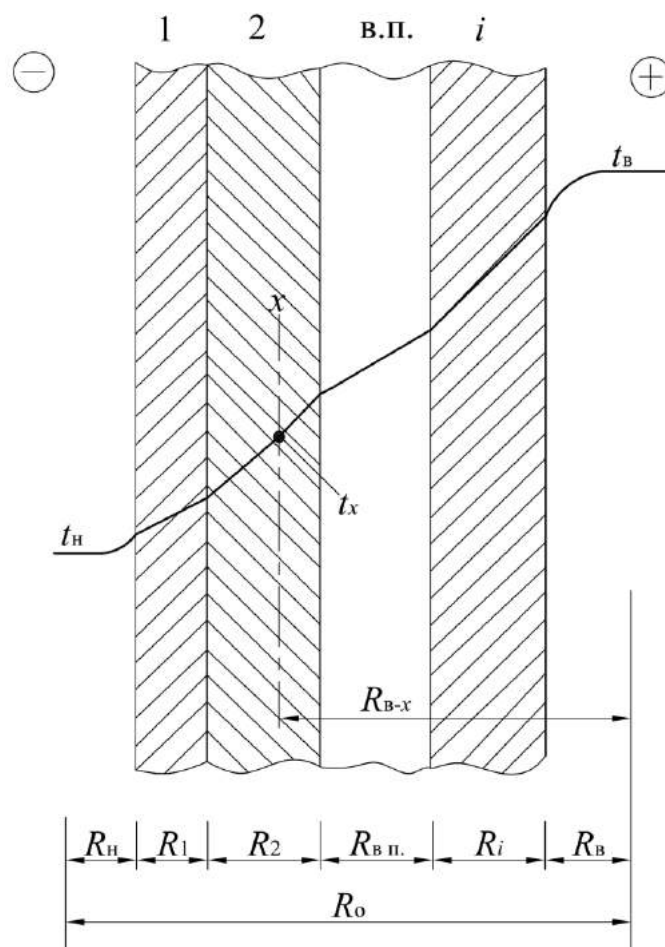


Рис. 3.3. Одномерное температурное поле многослойного ограждения

Распределение температуры по сечению ограждения  $t_x$  определяется по формуле

$$t_x = t_B - \frac{R_{B-x}}{R_0}(t_B - t_H), \quad (3.3)$$

где  $t_B$  и  $t_H$  – температуры внутренней и наружной сред;  $R_{B-x}$  – сопротивление теплопередаче от внутренней среды до сечения  $x$ .

### **3.2. Особенности теплопередачи через отдельные конструкции ограждений при стационарном режиме**

Стационарная теплопередача через характерные конструкции наружных ограждений рассматривается в специальной технической и справочной литературе, например [1, 16]. В них приведено решение следующих задач теплообмена в стационарных режимах теплопередачи, к которым относятся:

- интенсивность теплопередачи при двухмерном температурном поле, при наличии в конструкции теплопроводных включений в виде обрамляющих ребер панелей, обрамлений оконных проемов, внутренних и внешних выступающих частей, примыканий внутренних конструкций к наружным и т.д.;
- теплопередача через «тонкое» и «толстое» ребро, которая широко распространена в отопительной технике, при расчете передачи теплоты через перегородку или внутреннее перекрытие в стыке с наружной стеной;
- теплопередача ограждения с проемом в виде откоса оконного проема, который можно представить как торец «толстого» ребра.

Приведено два метода расчета двухмерных температурных полей в инженерной практике: метод сеток и графический метод. Показано, что изменения в конструкции ограждения (угол, стык, откос, включения и пр.) вызывают нарушение одномерности температурного поля на расстоянии до двух калибров по ширине ограждения. Поэтому для всех случаев двухмерных полей в ограждении введен так называемый фактор формы  $f$ , определяемый для двух калибров. За один калибр для реальных ограждений (многослойных, имеющих конечные значения сопротивления теплообмену) принимают условную тол-

щину однородного ограждения с сопротивлением теплопередаче  $R_0$  и коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ . Ширина  $a_i$  в два калибра для определения фактора формы составляет

$$a_i = 2\lambda R_0. \quad (3.4)$$

В расчете потерь теплоты помещением площадь ограждений принимают по наружному обмеру. В этом случае  $f$  следует определять по наружной поверхности.

Существуют типовые решения задачи теплопередачи через конструкции ограждений со сквозными и несквозными теплопроводными включениями, при которых определяют минимальную температуру на внутренней поверхности ограждения в зоне включения и теплопотери через эту зону.

### 3.3. Приведенное сопротивление теплопередаче сложного ограждения

Конструкции ограждений современных зданий из крупноразмерных элементов имеют определенное своеобразие. По площади наружной стены практически нет участков, в пределах которых передачу теплоты можно было бы считать проходящей по одномерной схеме. За счет этого потери теплоты по всей площади ограждения оказываются часто большими, чем теплопотери, рассчитанные при условии одномерности температурного поля. В практике проектирования провести такой расчет сложно.

Для правильного расчета теплопотерь через ограждения сложной конструкции используют так называемое приведенное сопротивление теплопередаче ограждения  $R_0^{пр}$ . Приведенным называется сопротивление теплопередаче такого условного ограждения с одномерным температурным полем, потери теплоты через которое при одинаковой площади равны теплопотерям сложного ограждения с двухмерным температурным полем.

В результате рассмотрения теплопередачи в двухмерных элементах определены факторы формы  $f_i$  для каждого случая. В табл. 3.1 дан сводный перечень их значений.

Значения факторов формы элементов ограждения

Характерный двумерный элемент ограждения	Фактор формы $f_i$ характерного элемента для ширины в два калибра	
	по наружному обмеру	по внутреннему обмеру
Наружный угол, $f_{уг}$	0,68	1,18
Внутренний угол, $f_{уг}$	1,18	0,68
Откос проема в ограждении, $f_{отк}$	1,50	1,50
Стык однородного внутреннего и наружного ограждений (в одну сторону от оси стыка), $f_{ст}$	$f_{ст}$ по графику (рис. 3.4)	$f_{ст} + \frac{\delta_2}{2\lambda R_0}$
Теплопроводное включение (в одну сторону от оси включения), $f_{вкл}$	$f_{вкл}$ по формуле (3.5)	

Фактор формы равен величине

$$f_{вкл} = 1 + \frac{a}{4\lambda} (K_{т.в} - K). \quad (3.5)$$

В формуле (3.5)  $K$  и  $K_{т.в}$  – коэффициенты теплопередачи, рассчитанные соответственно по сечению основной конструкции ограждения и по сечению теплопроводного включения. Остальные значения принимаются по формуле (3.4).

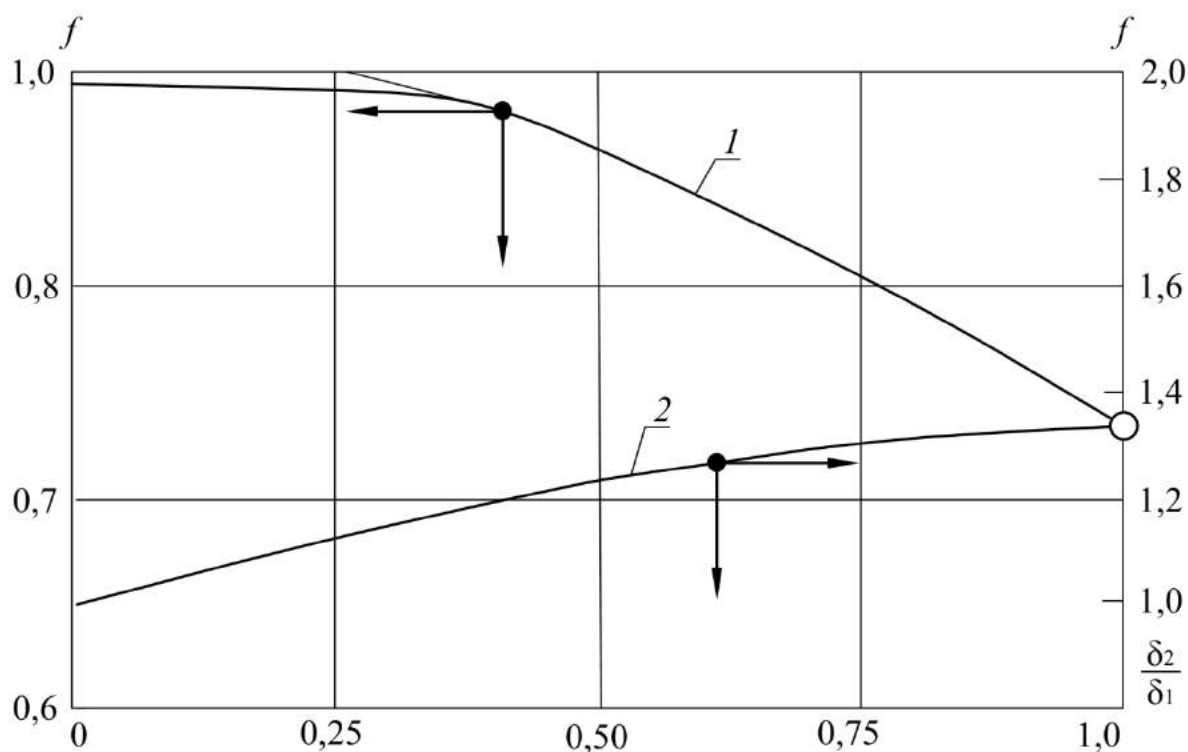


Рис. 3.4. График зависимости фактора формы  $f_{ст}$  для стыка наружной стены и внутренней перегородки от отношения  $\delta_2/\delta_1$ : 1 – по наружному обмеру; 2 – по внутреннему обмеру



Величины  $f$  показывают, во сколько раз общие теплопотери через единицу длины характерного элемента шириной в два калибра больше основных. Общие теплопотери ограждениями, имеющими несколько двухмерных элементов разной протяженности  $l$  и с различными значениями  $f$ , можно определить в виде суммы

$$Q = \frac{1}{R_0} F_0 (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) + \frac{1}{R_0} \sum a_f l_i (f_i - 1) (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}). \quad (3.6)$$

С помощью приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0^{\text{пр}}$  величина  $Q$  может быть определена по формуле

$$Q = \frac{1}{R_0^{\text{пр}}} F_0 (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}). \quad (3.7)$$

Приравнявая (3.6) и (3.7), получим аналитическую зависимость для определения  $R_0^{\text{пр}}$  ограждения в виде

$$R_0^{\text{пр}} = R_0 \frac{1}{1 + \frac{1}{F_0} \sum a_f l_i (f_i - 1)}. \quad (3.8)$$

### 3.4. Теплопередача герметичной и вентилируемой воздушных прослоек

#### *Герметичные воздушные прослойки*

Устройство воздушной прослойки является распространенным приемом теплозащиты. Прослойку используют в конструкциях окон, витражей, наружных стен и перекрытий, для экранирования при защите от излучения и как гравитационный побудитель для интенсификации конвективного теплообмена с обогревающих или охлаждающих устройств, а также для предупреждения переувлажнения конструкций.

Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки  $R_{\text{в.п}}$  не может быть определено как сопротивление теплопроводности слоя воздуха, т.к. передача теплоты через воздушную прослойку от одной поверхности к другой происходит совместно теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Поток теплоты от одной стенки к другой можно представить в виде суммы конвективной  $q_k$  и лучистой  $q_l$  составляющих:

$$q = q_k + q_l. \quad (3.9)$$

Конвективный (включает передачу теплоты через воздух посредством теплопроводности) теплообмен  $q_k$  в воздушной прослойке от одной поверхности к другой составляет

$$q_k = \alpha'_k (\tau_1 - \tau_2), \quad (3.10)$$

где  $\alpha'_k$  – коэффициент конвективного теплообмена, отнесенный к разности температур  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$  на поверхностях прослойки.

Конвективный теплообмен в прослойке связан с циркуляцией воздуха. При ламинарном режиме течения ( $Gr \cdot Pr < 1000$ ) критическая толщина прослойки  $\delta_{кр}$ , мм, для которой сохраняется ламинарный режим течения

$$\delta_{кр} \approx 20\Delta\tau^{1/3}. \quad (3.11)$$

При этом режиме в прослойке

$$\alpha'_k = \lambda_v / \delta, \quad (3.12)$$

т. е. передача теплоты через слой воздуха толщиной  $\delta < \delta_{кр}$  происходит теплопроводностью.

Если  $Gr \cdot Pr > 1000$ , то

$$\alpha'_k = 2,79 \left( \frac{\Delta\tau}{\delta} \right)^{0,25}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}). \quad (3.13)$$

Лучистая составляющая теплопередачи через воздушную прослойку

$$q_l = \alpha_l (\tau_1 - \tau_2), \quad (3.14)$$

где  $\alpha_l$  – коэффициент лучистого теплообмена.

Коэффициент  $\alpha_l$  определяется по общей формуле  $\alpha_l = \varepsilon_{пр} C_o b \varphi$  и при средней температуре  $0^\circ\text{С}$ ,  $b = 0,81$ :  $\alpha_l = 3,95 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ .

Наиболее эффективная толщина прослойки для вертикальных слоев в ограждении равна 76...95 мм. Обычно утолщение прослойки ограждения более 50 мм нерационально, т.к. это незначительно уменьшает теплопередачу. В конст-

рукции покрытия здания воздушную прослойку можно расположить наклонно. Угол наклона при  $Gr \cdot Pr < 1000$  не влияет на теплопередачу. При других режимах величину  $\alpha_k$  при заданном угле наклона можно определить линейной интерполяцией между его значениями при вертикальном и горизонтальном расположении.

Нормативные данные сопротивления теплопередаче воздушных прослоек приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Термические сопротивления герметичных воздушных прослоек

Толщина прослойки, мм	$R_{в.п.}, \text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$			
	для горизонтальных прослоек при потоке теплоты снизу вверх и для вертикальных прослоек		для горизонтальных прослоек при потоке теплоты сверху вниз	
	летом	зимой	летом	зимой
10	0,17	0,20	0,17	0,21
20	0,18	0,21	0,21	0,26
30	0,18	0,22	0,22	0,28
50	0,18	0,23	0,23	0,30
100	0,20	0,24	0,24	0,31
150	0,21	0,24	0,26	0,33
200...300	0,21	0,26	0,26	0,33

#### *Вентилируемые воздушные прослойки*

Рассмотрим стационарный тепловой режим ограждения с воздушной прослойкой, через которую непрерывно продувается воздух (рис. 3.5). Вентилируемая прослойка отделена от помещения с температурой  $t_v$  внутренней частью конструкции, имеющей коэффициент теплопередачи  $K_v$ .

Наружная часть конструкции имеет коэффициент теплопередачи  $K_n$  и отделяет воздух от наружного воздуха с температурой  $t_n$ . Воздух в прослойку поступает с температурой  $t_o$  (в общем случае отличной от  $t_n$  и  $t_v$ ) и, проходя через нее, изменяет свою температуру. На некотором расстоянии  $l_{кр}$  поток воздуха приобретает некоторую неизменную температуру  $t_{в.п.}$ , зависящую только от условий передачи теплоты через ограждение и не связанную с его начальной температурой.

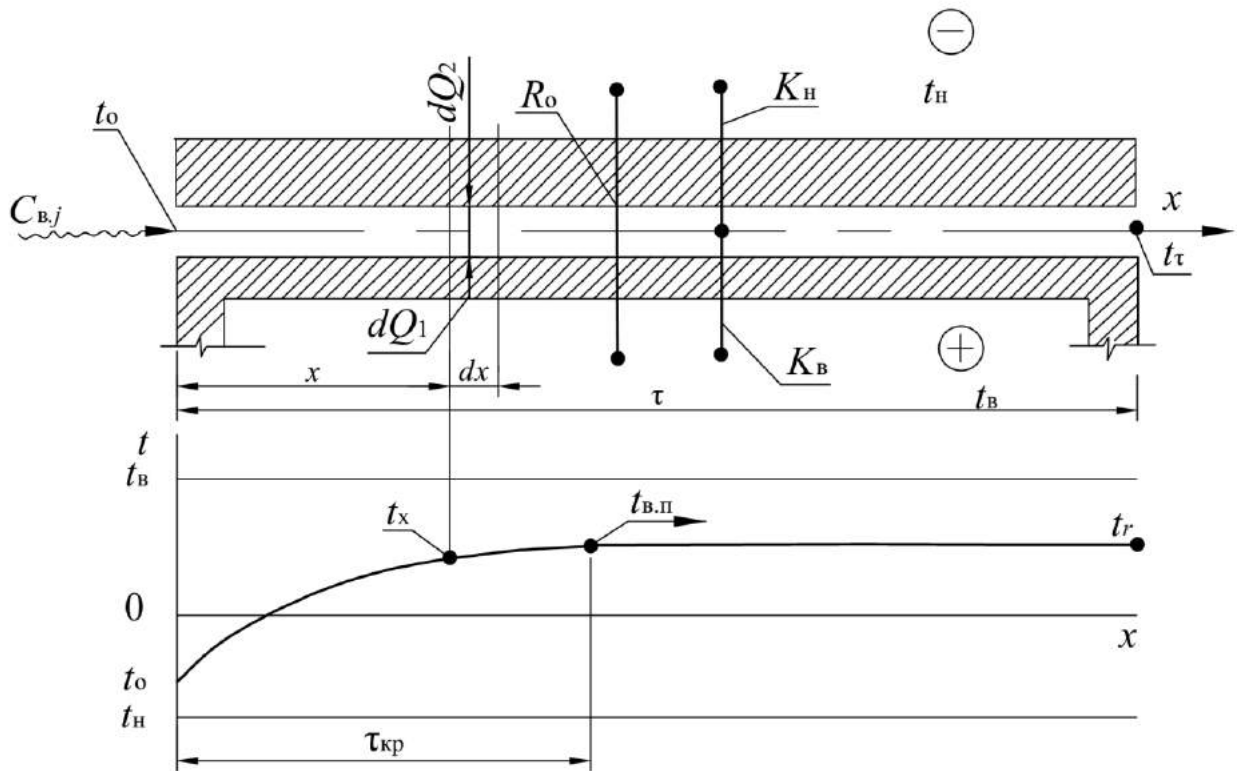


Рис. 3.5. К выводу уравнения теплопередачи через ограждение с вентилируемой воздушной прослойкой

Наружная часть конструкции имеет коэффициент теплопередачи  $K_H$  и отделяет воздух от наружного воздуха с температурой  $t_H$ . Воздух в прослойку поступает с температурой  $t_o$  (в общем случае отличной от  $t_H$  и  $t_B$ ) и, проходя через нее, изменяет свою температуру. На некотором расстоянии  $l_{кр}$  поток воздуха приобретает некоторую неизменную температуру  $t_{B,П}$ , зависящую только от условий передачи теплоты через ограждение и не связанную с его начальной температурой.

Задача состоит в определении температуры воздуха  $t$  в произвольном сечении прослойки и в определении теплопередачи через такую конструкцию. Определим температуру  $t_{B,П}$  по формуле (3.3):

$$t_{B,П} = t_B - \frac{1}{K_B R_o} (t_B - t_H) = \frac{K_B t_B + K_H t_H}{K_B + K_H}. \quad (3.15)$$

$$\theta_{B,П} = \frac{t_B - t_{B,П}}{t_B - t_H} = \frac{1}{K_B R_o} = \frac{K_H}{K_B + K_H}, \quad (3.16)$$

где  $R_o = \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_H} = \frac{K_B + K_H}{K_B K_H}$ .

Значения  $K_B$  и  $K_H$  равны

$$K_B = \frac{1}{\frac{1}{K'_B} + \frac{1}{\alpha_k}}; K_H = \frac{1}{\frac{1}{K'_H} + \frac{1}{\alpha_k}}, \quad (3.17)$$

где  $K'_B$  и  $K'_H$  – коэффициенты теплопередачи внутренней и наружной части ограждения от поверхностей воздушной прослойки;  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена одной поверхности с воздухом, движущимся в прослойке со скоростью  $v$ , м/с.

Среднее значение  $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), для воздуха по длине прослойки при ламинарном режиме движения ( $Re < 2 \cdot 10^3$ ) в канале

$$\alpha_k = 1,163(0,77 + 1,3 \cdot 10^{-3} t) \frac{(v\gamma)^{0,2} \Delta t^{0,1}}{d^{0,5}} \varepsilon, \quad (3.18)$$

$\Delta t$  – разность температур воздуха и поверхности воздушной прослойки;  $d$  – эквивалентный диаметр, равный  $d = \frac{4F}{P}$  ( $F$  – площадь и  $P$  – периметр канала), для прослойки (щелевой канал)  $d = 2\delta$ .

Коэффициент  $\varepsilon$  в формуле (3.18) отличается от 1,0 для каналов, длина которых  $l$  меньше  $50d$ .

При турбулентном режиме течения ( $Re > 2 \cdot 10^3$ )

$$\alpha_k = 1,163(2,7 + 1,5 \cdot 10^{-3} t) \frac{(v\gamma)^{0,2}}{d^{0,2}} \varepsilon. \quad (3.19)$$

При малых расходах воздуха температура  $t_{в.п}$  устанавливается на близком расстоянии от входа в прослойку и остается неизменной по всей длине прослойки. При определении сопротивления теплопередаче ограждения  $R_o$  величину  $R_{в.п}$  необходимо принимать

$$R_{в.п} = \frac{1}{0,5\alpha_k + \alpha_{л}}, \quad (3.20)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент, определяемый по (3.18) или (3.19);  $\alpha_{л}$  – коэффициент определяемый так же, как и в формуле (3.14).

Расход воздуха  $j$  (рис. 3.6) в вентилируемой прослойке определяется гидравлическим расчетом, заключающимся в определении разности давлений  $\Delta p$ , под влиянием которой происходит движение воздуха, и в получении расчетного расхода, при котором гидравлические потери в прослойке  $\Delta H$  равны перепаду давлений  $\Delta p$ .

Давление  $\Delta p$  равно сумме ветрового ( $\Delta p_v$ ) и гравитационного ( $\Delta p_t$ ) давлений:

$$\Delta p = \Delta p_v + \Delta p_t. \quad (3.21)$$

Величина  $\Delta p_v$  определяется как

$$\Delta p_v = (k_1 - k_2) \frac{v_H^2}{2g} \gamma \approx (k_1 - k_2) \left( \frac{v_H}{4} \right)^2, \quad (3.22)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – аэродинамические коэффициенты на входе в воздушную прослойку и на выходе из нее.

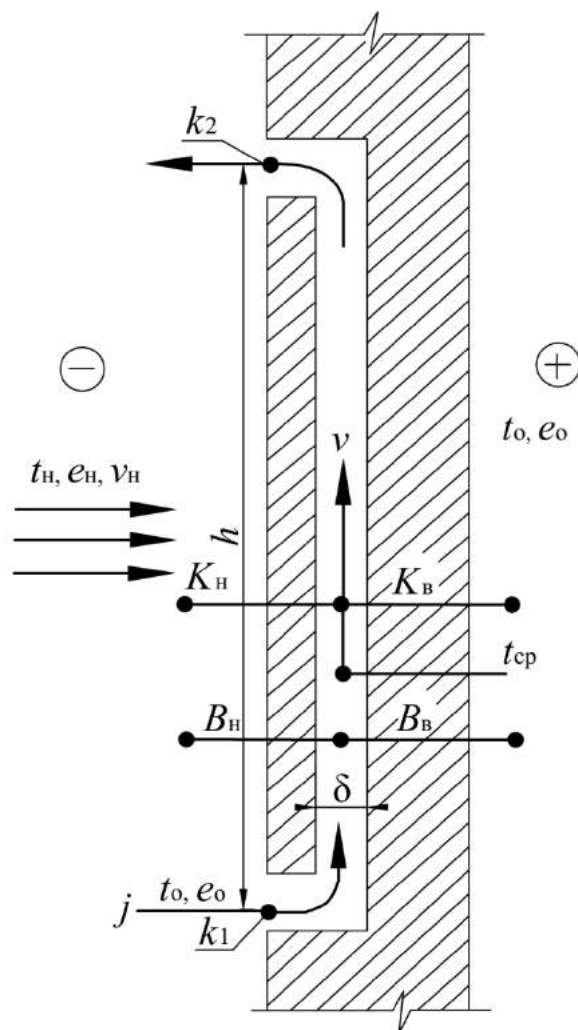


Рис. 3.6. Теплопередача через ограждение с прослойкой, вентилируемой за счет гравитационных сил и ветра

Гравитационное давление  $\Delta p_t$  возникает за счет разности объемных весов в прослойке  $\gamma_{cp}$  и наружного воздуха  $\gamma_n$ :

$$\Delta p_t = (\gamma_n - \gamma_{cp})h \approx 5 \cdot 10^{-3}(t_{cp} - t_n)h, \quad (3.23)$$

где  $h$  – разность высот отверстий входа воздуха в прослойку и выхода из нее.

Потери давления в воздушной прослойке определяются только местными сопротивлениями  $\xi$ :

$$\Delta H = \sum \xi \frac{v^2}{2g} \gamma \approx \sum \xi \left( \frac{v}{4} \right)^2, \quad (3.24)$$

где  $\xi = 0,5$  на входе,  $\xi = 1,0$  на выходе,  $\xi = 1,0$  на каждый поворот воздуха.

Определим расход воздуха

$$j = 3600v\gamma\delta, \quad (3.25)$$

где  $\delta$  – толщина воздушной прослойки, м.

Из условия равенства располагаемого давления (3.21) и гидравлических потерь (3.24) при  $\sum \xi = 0,5 + 1,0 + 2 \cdot 1,0 = 3,5$  и  $k_1 \approx k_2$  и после некоторых упрощений определим приближенную формулу для определения скорости воздуха в прослойке:

$$v = 0,15 \sqrt{h(t_{cp} - t_n)}. \quad (3.26)$$

Изложенный метод позволяет провести совместный расчет взаимосвязанных теплового и гидравлического режимов вентилируемой прослойки.

### 3.5. Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. С какой стороны ограждения следует располагать утепляющий слой?
2. Что такое фактор формы?
3. Напишите аналитическую зависимость для определения приведенного сопротивления теплопередаче.
4. Особенности расчета лучистого и конвективного теплообмена в герметичных воздушных прослойках.
5. Особенности расчета лучистого и конвективного теплообмена в вентилируемых воздушных прослойках.

## Глава 4. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЕ

В естественных условиях режим теплопередачи через ограждения всегда является нестационарным. Температуры внутри помещения и вне его изменяются в течение суток и в пределах отдельных сезонов вокруг некоторых средних значений. Умение рассчитывать переменные процессы необходимо для правильной замены сложного нестационарного явления простым стационарным, при которой точность упрощенного расчета не выйдет за пределы допустимых погрешностей.

### 4.1. Инженерный метод расчета теплоустойчивости ограждения

Рассмотрим случай теплопередачи через ограждение, когда температура внутреннего воздуха  $t_{в}$  постоянна, а температура наружного воздуха  $t_{н}$  изменяется (рис. 4.1).

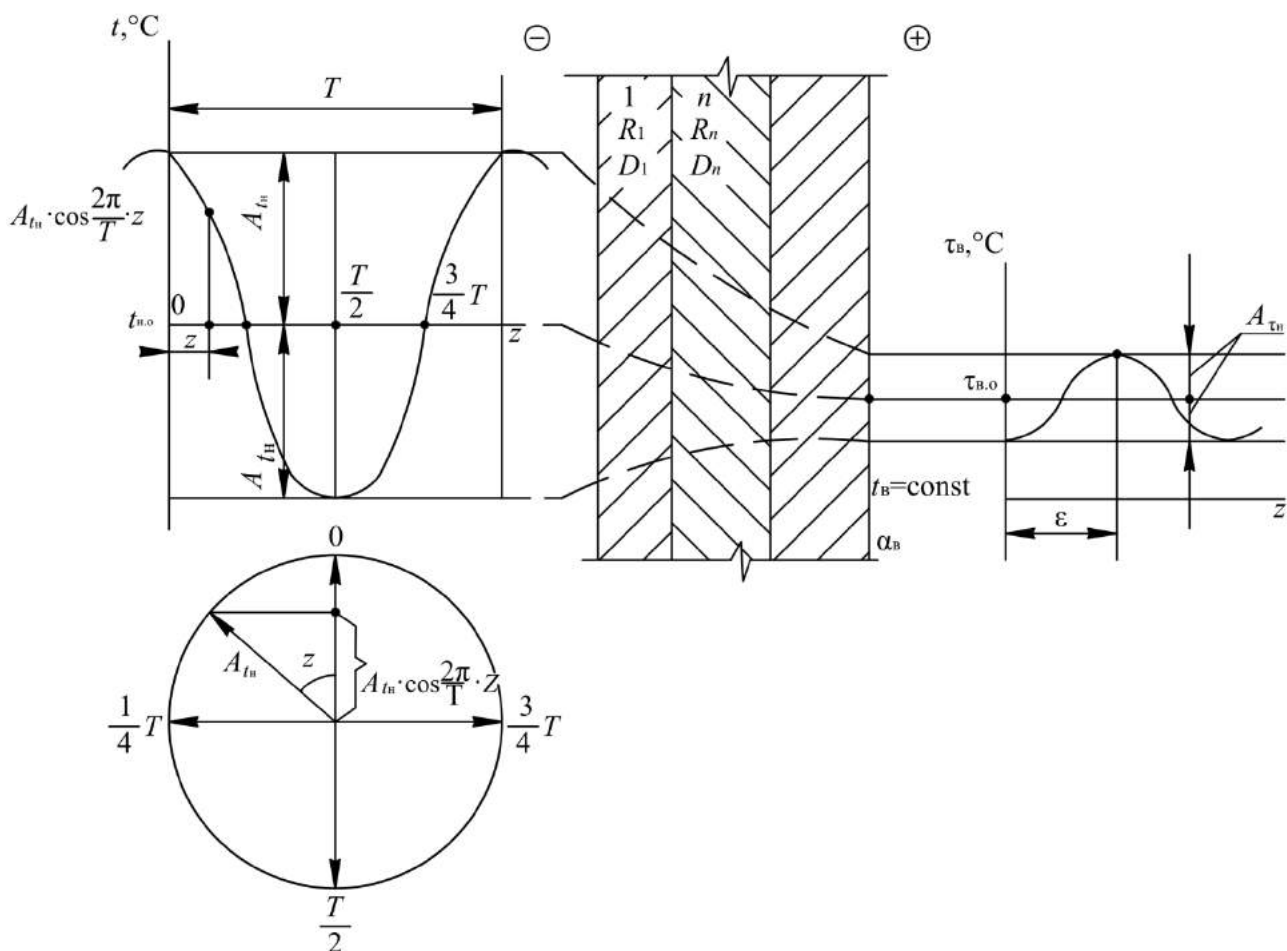


Рис. 4.1. Значение температурных колебаний в ограждении



При правильных гармонических колебаниях  $t_n$  изменяется около своего среднего значения  $t_{н.о}$  с периодом  $T$  так, что в любой момент времени  $z$  в часах ее величина равна

$$t_n = t_{н.о} + A_{t_n} \cos \frac{2\pi}{T} z, \quad (4.1)$$

где  $A_{t_n}$  – максимальное отклонение температуры от ее среднего значения, или амплитуда колебания температуры наружного воздуха.

Первое слагаемое в (4.1) неизменно во времени, а второе определяет отклонение во времени  $t_n$  от  $t_{н.о}$ . Это изменение происходит по косинусоиде, для которой начало отсчета времени  $z = 0$  совпадает с началом периода  $T$  или в общем виде с началом произвольного периода  $nT$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ). Можно принять начало отсчета времени на  $\varepsilon$ , ч, раньше или позднее начала периода. Тогда изменение температуры определяется уравнением

$$t_n = t_{н.о} + A_{t_n} \cos \frac{2\pi}{T} (z \pm \varepsilon). \quad (4.2)$$

Колебания температуры наружного воздуха вызовут изменения теплового потока и температуры на поверхности и в толще ограждения. Эти колебания будут также правильными и гармоническими колебаниями с периодом  $T$ .

В инженерных расчетах тепловых процессов пользуются приближенным определением коэффициента теплоусвоения  $Y$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), как отношения амплитуды колебания теплового потока  $A_q$ , Вт/м<sup>2</sup>, и температуры  $A_t$ , °С.

В средней части однородного слоя практически не сказывается влияние условий на поверхности и коэффициент теплоусвоения зависит только от свойств материала слоя. В пределах этой части величина  $Y$  равна коэффициенту теплоусвоения материала  $s$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Величина  $s$  связана с другими теплофизическими материалами зависимостью:

$$s = \sqrt{\frac{2\pi c\gamma}{T}}. \quad (4.3)$$

При  $T = 24$  часа величина  $s$  равна

$$s = 0,51\sqrt{\lambda c\gamma}. \quad (4.4)$$



2) слой резких колебаний захватывает второй от заданной поверхности материальный слой, т.е. только  $D_n + D_{n+1} \geq 1$ , тогда

$$Y_n = \frac{R_n s_n^2 + s_{n+1}}{1 + R_n s_{n+1}}; \quad (4.7)$$

3) если слой резких колебаний захватывает третий, четвертый и другие слои, т.е.  $D_n + D_{n+1} < 1$ , тогда необходимо учесть влияние на  $Y_n$  всех материальных слоев, которые захвачены резкими колебаниями. В этом случае

$$Y_n = \frac{R_n s_n^2 + Y_{n+1}}{1 + R_n Y_{n-1}}, \quad (4.8)$$

где  $Y_{n+1}$  – коэффициент теплоусвоения части ограждения, начиная от поверхности  $n+1$  материального слоя; эта величина должна быть также определена как  $Y_n$ , в зависимости от того, сколько материальных слоев от сечения  $n+1$  захватывает слой резких колебаний.

В [1] даны зависимости по определению величин коэффициентов теплоусвоения  $Y_n$  для следующих случаев: условная толщина всего ограждения меньше единицы ( $\sum D_n < 1,0$ ); если ограждение целиком или его отдельный слой практически не обладает тепловой инерцией (окна, воздушная прослойка в ограждении); если ограждение подвержено с обеих сторон воздействию периодических температурных колебаний и условная его толщина меньше 2 ( $\sum D_n < 2,0$ ).

При расчетах затухания колебания температуры наружного воздуха важно определить изменение температуры на внутренней поверхности ограждения  $\tau_b$ . Изменение  $\tau_b$  подчиняется уравнению

$$\tau_b = \tau_{b,0} + \frac{A_{t_H}}{v} \cos \frac{2\pi}{T} (z - \varepsilon). \quad (4.9)$$

Средние значения величин в периодическом тепловом процессе определяют по формулам стационарной теплопередачи:

$$\tau_{b,0} = t_b - \frac{R_b}{R_0} (t_b - t_{H,0}). \quad (4.10)$$

В инженерных расчетах теплоустойчивости используют упрощенную формулу для определения показателя сквозного затухания  $v$ .

Показатели затухания при переходе от наружного воздуха к наружной поверхности  $v_n$  и наружного воздуха  $v_{в.п}$  рассчитываются по формулам:

$$v_n = 1 + Y_1 R_n; \quad (4.11)$$

$$v_{в.п} = 1 + Y_{в.п} R_{в.п}; \quad (4.12)$$

где  $R_n$  и  $R_{в.п}$  – сопротивление теплообмену на наружной поверхности и сопротивление теплопередаче воздушной прослойки;  $Y_1$  и  $Y_{в.п}$  – коэффициенты теплоусвоения наружной поверхности ограждения и поверхности слоя после воздушной прослойки.

Для прикладных расчетов, когда слой имеет  $R_n s_n > 1$  ( $Y_n = s_n$ ), величина  $v_n$  многослойного ограждения составляет

$$v_n = 2^{D_n}. \quad (4.13)$$

Из формулы (4.13) видно, что амплитуда колебаний температур уменьшается в два раза в пределах слоя, условная толщина  $D$  которого равна 1,0.

Запаздывание сквозного проникания колебаний во времени для многослойного ограждения  $\varepsilon$ , ч, при периоде колебаний  $T = 24$  ч приближенно определяется по формуле

$$\varepsilon \approx 2,7D - 0,4. \quad (4.14)$$

Теплоинерционные ограждения являются своеобразным «гармоническим фильтром» в том смысле, что неправильные периодические колебания, пройдя через ограждения, создают на их внутренней поверхности практически правильные гармонические колебания температуры на внутренней поверхности ограждения.

## 4.2. Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. Какой тепловой режим называется нестационарным?
2. Основы инженерного метода расчета теплоустойчивости наружных ограждений.

3. Физический смысл величины тепловой инерции.
4. В каких единицах измеряется тепловая инерция?
5. Напишите единицу измерения удельного коэффициента теплоусвоения материала.
6. Приведите характерные случаи определения коэффициента теплоусвоения в многослойных ограждениях.
7. Напишите формулы показателей затухания при переходе от наружного воздуха к наружной поверхности.
8. Приведите зависимость запаздывания сквозного проникания колебаний во времени для многослойного ограждения.
9. Зависимость изменения величины температуры наружного воздуха при правильных гармонических колебаниях.
10. В чем физический смысл величины колебания теплового потока?
11. Связь величины теплоусвоения материала с другими теплофизическими материалами.
12. Напишите формулу определения тепловой инерции для многослойного ограждения.

## Глава 5. ЗИМНИЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЯ

### 5.1. Характеристики наружного климата

При выборе расчетных наружных параметров зимнего климата необходимо учитывать, что параметры климата должны быть общими для расчета всех составляющих теплового режима помещения (тепловая защита ограждений, теплопотери и др.), т.к. они отражают единый процесс теплопередачи через ограждения. Расчетные значения и сочетания параметров должны определяться с учетом коэффициента обеспеченности.

Данные о расчетных климатических условиях должны учитывать необходимость анализа нестационарного процесса теплопередачи, т. к. в расчетные наиболее холодные периоды быстро изменяется наружная температура, в то время как ограждения обладают теплоинерционностью.

В действующих нормах приняты два значения расчетной наружной температуры для каждого географического пункта: температура наиболее холодных суток  $t_{х.с}$  и температура холодной пятидневки  $t_{н5}$ . Эти температуры определены как средние за восемь наиболее суровых зим последних пятидесяти лет ( $k_{об} = 0,92$ ). Выбор расчетной температуры на практике зависит от степени тепловой массивности ограждения. Однако по последним действующим нормам это условие не учитывается.

Расчетная скорость ветра по СНиП (СП) [11, 15] принимается равной средней за январь с учетом повторяемости ветра на местности по основным направлениям с поправкой на высоту здания. В пределах города скорость ветра, начиная с 2,0 м от поверхности земли, возрастает с высотой практически по линейному закону: на каждый 1 м. высоты скорость ветра увеличивается в среднем на 0,03 м/с.

## 5.2. Нормирование и расчет теплозащитных свойств ограждения

Нормирование и расчет теплозащитных свойств наружных ограждений осуществляется согласно требованиям СП 50.13330 «Тепловая защита зданий» (актуализированная редакция СНиП 23-02) [18]. Теплозащитная оболочка здания должна отвечать следующим требованиям:

а) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений (*поэлементные требования*);

б) удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (*комплексное требование*);

в) температура на внутренних поверхностях ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений (*санитарно-гигиеническое требование*).

Требования тепловой защиты здания будут выполнены при одновременном соблюдении вышеприведенных требований.

### *Поэлементные требования*

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции  $R_0^{\text{норм}}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , следует определять по формуле

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{тп}} m_p, \quad (5.1)$$

где  $R_0^{\text{тп}}$  – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , которое следует принимать в зависимости от градусо-суток отопительного периода (ГСОП),  $^\circ\text{C} \cdot \text{сут}/\text{год}$ , региона строительства и определять по табл. 5.1;  $m_p$  – понижающий коэффициент, учитывающий особенности региона строительства.

Градусо-сутки отопительного периода определяются по зависимости

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) z_{\text{от}}, \quad (5.2)$$

где  $t_{от}$ ,  $z_{от}$  – средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут/год, отопительного периода для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более +8 °С.

Таблица 5.1

Базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Здания и помещения, коэффициенты $a$ и $b$	Градусо-сутки отопительного периода, °С·сут/год	Базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче $R_o^{TP}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт, ограждающих конструкций				
		Стен	Покрытий и перекрытий над проездами	Перекрытий чердачных над неотапливаемыми подпольями и подвалами	Окон и балконных дверей, витрин и витражей	Фонарей
Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты, гостиницы и общежития	2000	2,1	3,2	2,8	0,3	0,3
	4000	2,8	4,2	3,7	0,45	0,35
	6000	3,5	5,2	4,6	0,6	0,4
	8000	4,2	6,2	5,5	0,7	0,45
	10000	4,9	7,2	6,4	0,75	0,5
	12000	5,6	8,2	7,3	0,8	0,55
$a$	-	0,00035	0,0005	0,00045	-	0,000025
$b$	-	1,4	2,2	1,9	-	0,25
Общественные, кроме указанных выше, административные и бытовые, производственные и другие здания и помещения с влажным или мокрым режимом	2000	1,8	2,4	2,0	0,3	0,3
	4000	2,4	3,2	2,7	0,4	0,35
	6000	3,0	4,0	3,4	0,5	0,4
	8000	3,6	4,8	4,1	0,6	0,45
	10000	4,2	5,6	4,8	0,7	0,5
	12000	4,8	6,4	5,5	0,8	0,55
$a$	-	0,0003	0,0004	0,00035	0,00005	0,000025
$b$	-	1,2	1,6	1,3	0,2	0,25
Производственные с сухим и нормальным режимами	2000	1,4	2,0	1,4	0,25	0,2
	4000	1,8	2,5	1,8	0,3	0,25
	6000	2,2	3,0	2,2	0,35	0,3
	8000	2,6	3,5	2,6	0,4	0,35
	10000	3,0	4,0	3,0	0,45	0,4
	12000	3,4	4,5	3,4	0,5	0,45
$a$	-	0,0002	0,00025	0,0002	0,000025	0,000025
$b$	-	1,0	1,5	1,0	0,2	0,15



В случаях, когда средняя наружная или внутренняя температура для отдельных помещений отличается от принятых в расчете ГСОП, базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций, определенные по табл. 5.1, умножаются на коэффициент  $n_t$ :

$$n_t = \frac{t_{\text{в}}^* - t_{\text{от}}^*}{t_{\text{в}} - t_{\text{от}}}, \quad (5.3)$$

где  $t_{\text{в}}^*$ ,  $t_{\text{от}}^*$  – средняя температура внутреннего и наружного воздуха для данного помещения, °С.

При реконструкции зданий, для которых по архитектурным или историческим причинам невозможно утепление стен снаружи (например, музеи, исторические здания и др.) [18], нормируемое значение сопротивления теплопередаче стен допускается определять по формуле

$$R_0^{\text{норм}} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\Delta t^{\text{н}} \alpha_{\text{в}}}, \quad (5.4)$$

где  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), принимаемый в соответствии с табл. 5.2;  $\Delta t^{\text{н}}$  – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}$  и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции –  $\tau_{\text{в}}$ , °С, принимаемый согласно табл. 5.3.

Нормируемое значение сопротивления теплопередаче входных дверей и ворот  $R_0^{\text{норм}}$  должно быть не менее  $0,6R_0^{\text{норм}}$  стен зданий, определяемого по формуле (5.4). Если температура воздуха двух соседних помещений отличается больше чем на 8 °С, то минимально допустимое приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, разделяющих эти помещения (кроме светопрозрачных), следует определять по формуле (5.4), принимая за величину  $t_{\text{н}}$  расчётную температуру воздуха в более холодном помещении.

Таблица 5.2

Коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции

Внутренняя поверхность ограждений	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_v$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
Стен, полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты $h$ ребер к расстоянию $a$ , между гранями соседних ребер $h/a \leq 0,3$	8,7
Потолков с выступающими ребрами при отношении $h/a > 0,3$	7,6
Окон	8,0
Зенитных фонарей	9,9

Таблица 5.3

Нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции

Здания и помещения	Нормируемый температурный перепад $\Delta t^H$ , °С, для			
	наружных стен	покрытий и чердачных перекрытий	перекрытий над проездами, подвалами и подпольями	зенитных фонарей
Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты	4,0	3,0	2,0	$t_v - t_p$
Общественные, кроме указанных выше, административные и бытовые, за исключением помещений с влажным или мокрым режимом	4,5	4,0	2,5	$t_v - t_p$
Производственные с сухим и нормальными режимами	$t_v - t_p$ , но не более 7	$0,8(t_v - t_p)$ , но не более 6	2,5	$t_v - t_p$
Производственные и другие помещения с влажным или мокрым режимом	$t_v - t_p$	$0,8(t_v - t_p)$	2,5	нн
Производственные здания со значительными избытками явной теплоты (более 23 Вт/м <sup>3</sup> ) и расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха не более 50%	12	12	2,5	$t_v - t_p$

Обозначения: нн – не нормируется,  $t_p$  – температура точки росы, °С, при расчетной температуре  $t_v$  и относительной влажности внутреннего воздуха, принимаемым согласно СанПиН [7, 8], ГОСТ 12.1.005 [3] и СП [20] и нормам проектирования соответствующих зданий, например СП [13].

Примечание. Для зданий и овощехранилищ нормируемый температурный перепад  $\Delta t^H$  для наружных стен, покрытий и чердачных перекрытий следует принимать по СП [14]

Для помещений зданий с влажным или мокрым режимом, а также для производственных зданий со значительными избытками теплоты и расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха не более 50 % нормируемое значение сопротивления теплопередаче определяется по формуле (5.4).

Фактическое приведенное сопротивление теплопередаче  $R_0^{np}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ , фрагмента теплозащитной оболочки здания или любой выделенной ограждающей конструкции определяется по формуле

$$R_0^{np} = \frac{1}{\frac{1}{R_0^{ycl}} + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k}, \quad (5.5)$$

где  $R_0^{ycl}$  – осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания либо выделенной ограждающей конструкции,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ;  $l_j$  – протяженность линейной неоднородности  $j$ -го вида, приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки здания, или выделенной ограждающей конструкции,  $\text{м} / \text{м}^2$ ;  $\Psi_j$  – удельные потери теплоты через линейную неоднородность  $j$ -го вида,  $\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{°C}$  [17];  $n_k$  – количество точечных неоднородностей  $k$ -го типа, приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки здания, или выделенной ограждающей конструкции,  $\text{шт.} / \text{м}^2$ ;  $\chi_k$  – удельные потери теплоты через точечную неоднородность  $k$ -го вида,  $\text{Вт} / \text{шт.} \cdot \text{°C}$ .

Перечень теплотехнических неоднородностей, учитываемых при проектировании тепловой защиты наружных ограждающих конструкций зданий, приведен в Приложении А [17]. Коэффициент теплотехнической однородности,  $r$ , характеризующий эффективность конструкции, определяется по зависимости:

$$r = R_0^{np} / R_0^{ycl}. \quad (5.6)$$

Величина  $R_0^{ycl}$  определяется как среднее по общей площади значение условного сопротивления теплопередаче всех частей фрагментов теплозащитной оболочки здания:

$$R_0^{ycl} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (5.7)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, определяемый по табл. 5.4;  $R_s$  – термическое сопротивление  $S$ -го слоя однородной части фрагмента,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , определяемое для материальных слоев по следующей формуле:

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (5.8)$$

где  $\delta_s$  – толщина слоя, м;  $\lambda_s$  – теплопроводность материала слоя,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , принимается по данным Приложения А.

Таблица 5.4

Коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции

№ п.п.	Наружная поверхность ограждающих конструкций	Коэффициент теплоотдачи для зимних условий, $\alpha_n$ , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
1	Наружных стен, покрытий, перекрытий над проездами и над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в северной строительно-климатической зоне	23
2	Перекрытий над холодными подвалами, сообщающимися с наружным воздухом, перекрытий над холодными (с ограждающими стенками) подпольями и холодными этажами в северной строительно-климатической зоне	17
3	Перекрытий чердачных и над неотапливаемыми подвалами со световыми проемами в стенах, а также наружных стен с воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом	12
4	Перекрытий над неотапливаемыми подвалами и техническими, подпольями не вентилируемых наружным воздухом	6

Приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен следует рассчитывать для всех фасадов рассматриваемого здания с учетом откосов проемов, без учета их заполнений.

### Комплексное требование

Нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания,  $k_{об}^{тр}$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°С), следует принимать в зависимости от отапливаемого объема здания и градусо-суток отопительного периода района строительства по табл. 5.5 с учетом примечаний.

Удельная теплозащитная характеристика здания,  $k_{об}$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°С), рассчитывается по формуле

$$k_{об} = \frac{1}{V_{от}} \sum_i \left( n_{t,i} \frac{A_{ф,i}}{R_{о,i}^{пр}} \right) = K_{комп} K_{общ}, \quad (5.9)$$

где  $R_{о,i}^{пр}$  – приведенное сопротивление теплопередаче  $i$ -го фрагмента теплозащитной оболочки здания, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;  $A_{ф,i}$  – площадь  $i$ -го фрагмента теплозащитной оболочки здания, м<sup>2</sup>;  $V_{от}$  – отапливаемый объем здания, м<sup>3</sup>;  $n_{t,i}$  – коэффициент, учитывающий отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчете ГСОП, определяется по (5.3);  $K_{общ}$  – общий коэффициент теплопередачи здания, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), определяемый по формуле

$$K_{общ} = \frac{1}{A_{н}^{сум}} \sum_i \left( n_{t,i} \frac{A_{ф,i}}{R_{о,i}^{пр}} \right); \quad (5.10)$$

$K_{комп}$  – коэффициент компактности здания, м<sup>-1</sup>, определяемый по формуле

$$K_{комп} = \frac{A_{н}^{сум}}{V_{от}}; \quad (5.11)$$

$A_{н}^{сум}$  – сумма площадей (по внутреннему обмеру) всех наружных ограждений теплозащитной оболочки здания, м<sup>2</sup>.

Совокупность фрагментов теплозащитной оболочки здания, характеристики которых используются в (5.9), должна полностью замыкать оболочку отапливаемой части здания.

Удельная теплозащитная характеристика может быть найдена непосредственно через характеристики элементов составляющих все конструкции оболочки здания.

$$k_{об} = \frac{1}{V_{от}} \left[ \sum \left( n_{t,i} \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{пр}} \right) + \sum n_{t,j} L_j \Psi_j + \sum n_{t,k} N_k \chi_k \right], \quad (5.12)$$

где  $L_j$  – суммарная протяженность линейной неоднородности  $j$ -го вида по всей оболочке здания, м;  $N_k$  – суммарное количество точечных неоднородностей  $k$ -го вида по всей оболочке здания, шт.

Расчет удельной теплозащитной характеристики здания оформляется в виде таблицы, которая должна содержать следующие сведения: наименование каждого фрагмента, составляющего оболочку здания; площадь каждого фрагмента; приведенное сопротивление теплопередаче каждого фрагмента со ссылкой на расчет; коэффициент, учитывающий отличие внутренней или наружной температуры фрагмента конструкции от принятых в расчете ГСОП.

Таблица 5.5

Нормируемые значения удельной теплозащитной характеристики здания

Отапливаемый объем здания, $V_{от}, \text{м}^3$	Значения $k_{об}^{тр}$ , Вт/( $\text{м}^3 \cdot \text{°C}$ ), при значениях ГСОП, $\text{°C} \cdot \text{сут}/\text{год}$				
	1000	3000	5000	8000	12000
150	1,206	0,892	0,708	0,541	0,321
300	0,957	0,708	0,562	0,429	0,326
600	0,759	0,562	0,446	0,341	0,259
1200	0,606	0,449	0,356	0,272	0,207
2500	0,486	0,360	0,286	0,218	0,166
6000	0,391	0,289	0,229	0,175	0,133
15 000	0,327	0,242	0,192	0,146	0,111
50 000	0,277	0,205	0,162	0,124	0,094
200 000	0,269	0,182	0,145	0,111	0,084

Примечания.

1. Для промежуточных значений величин объема зданий и ГСОП, а также для зданий с отапливаемым объемом более 200 000  $\text{м}^3$  значения  $k_{об}^{тр}$  рассчитываются по формулам:

$$k_{об}^{тр} = \begin{cases} \frac{4,74}{0,00013\text{ГСОП} + 0,61} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{V_{от}}}, V_{от} \leq 960; \\ \frac{0,16 + \frac{10}{\sqrt{V_{от}}}}{0,00013\text{ГСОП} + 0,61}, V_{от} > 960; \end{cases} \quad (5.13)$$

$$k_{об}^{тр} = \frac{8,5}{\sqrt{\text{ГСОП}}}. \quad (5.14)$$

2. При достижении величиной  $k_{об}^{тр}$ , вычисленной по (5.13), значений меньших, чем определенные по формуле (5.14), следует принимать значения  $k_{об}^{тр}$ , определённые по формуле (5.14).

Форма представления результатов расчета приведена в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Результаты расчета удельной теплозащитной характеристики

Наименование фрагмента	$n_{t,i}$	$A_{\phi,i}$ , м <sup>2</sup>	$R_{o,i}^{pp}$ , (м <sup>2</sup> ·°C)/Вт	$n_{t,i} \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{pp}}$ , Вт/°C	%
...					
...					
Сумма:	-	-	-		100

### *Санитарно-гигиеническое требование*

Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции (за исключением вертикальных светопрозрачных конструкций, т.е. с углом наклона к горизонту 45° и более) в зоне теплопроводных включений, в углах и оконных откосах, а также зенитных фонарей должна быть не ниже точки росы внутреннего воздуха  $t_p$  при расчетной температуре наружного воздуха  $t_n$ , °C.

Минимальная температура внутренней поверхности остекления вертикальных светопрозрачных конструкций, т. е. с углом наклона к горизонту 45° и более (кроме производственных зданий) должна быть не ниже +3 °C, для производственных зданий – не ниже 0 °C. Минимальная температура внутренней поверхности непрозрачных элементов вертикальных светопрозрачных конструкций не должна быть ниже точки росы внутреннего воздуха помещения  $t_p$  при расчетной температуре наружного воздуха  $t_n$ , °C.

Относительную влажность внутреннего воздуха для определения точки росы следует принимать равной:

- для помещений жилых зданий, больничных учреждений, диспансеров, амбулаторно-поликлинических учреждений, родильных домов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, общеобразовательных детских школ, детских садов, яслей, яслей-садов (комбинатов) и детских домов – 55 %;
- для кухонь – 60 %;
- для ванных комнат – 65 %;
- для теплых подвалов и подполий с коммуникациями – 75 %;

- для теплых чердаков жилых зданий – 55 %;
- для других помещений общественных зданий (за исключением вышеуказанных) – 50 %.

### 5.3. Определение потерь теплоты помещением

Основные потери теплоты помещением  $\Sigma Q_o$ , Вт, определяют суммированием теплотерь через все ограждения по формуле [8]

$$\Sigma Q_o = \Sigma \frac{A}{R_o^{np}} (t_b - t_n) n (1 + \Sigma \beta), \quad (5.15)$$

где  $A$  – расчетная площадь ограждения, м<sup>2</sup>;  $R_o^{np}$  – приведенное сопротивление теплопередаче ограждения, определяемое согласно рекомендациям раздела 5.2;  $n$  – коэффициент, учитывающий положение ограждения по отношению к наружному воздуху, принимается по табл. 5.7;  $\beta$  – коэффициент учета добавочных потерь на ориентацию по сторонам света и угловые помещения принимается согласно Приложению 9 [10].

Наружные ограждения в помещении имеют различную теплоустойчивость. Через ограждение с малой теплоустойчивостью (окна, легкие конструкции) теплотери при похолодании будут резко возрастать, практически следуя во времени за изменением температуры наружного воздуха. Через теплоустойчивые ограждения потери тепла при похолодании возрастут немного и во времени эти изменения будут значительно отставать от наружной температуры. Максимальные потери тепла помещением в расчетных условиях не будут равны сумме потерь через отдельные ограждения. Сложение необходимо провести с учетом сдвига во времени теплотерь через отдельные ограждения.

В период резкого похолодания теплотери через окна составляют до 80 % от общих потерь. Основываясь на этом, можно считать, что наибольшие потери теплоты помещением  $Q_{пом}$  (рис. 5.1) совпадают во времени с наибольшими теплотерями через окна. Окна практически не обладают тепловой инерцией, поэтому момент времени и величина наибольших теплотерь через них практически совпадают во времени и по величине с минимальной наружной температурой.



Таблица 5.7

Коэффициент, учитывающий зависимость положения ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху

Ограждающие конструкции	Коэффициент $n$
Наружные стены и покрытия (в том числе вентилируемые наружным воздухом), зенитные фонари, перекрытия чердачные (с кровлей из штучных материалов) и над проездами; перекрытия над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в северной строительной-климатической зоне	1
Перекрытия над холодными подвалами, сообщающимися с наружным воздухом; перекрытия чердачные (с кровлей из рулонных материалов); перекрытия над холодными (с ограждающими стенками) подпольями и холодными этажами в северной строительной-климатической зоне	0,9
Перекрытия над неотапливаемыми подвалами со световыми проемами в стенах	0,75
Перекрытия над неотапливаемыми подвалами без световых проемов в стенах, расположенные выше уровня земли	0,6
Перекрытия над неотапливаемыми техническими подпольями, расположенными ниже уровня земли	0,4

Примечание. Для чердачных перекрытий теплых чердаков и цокольных перекрытий над подвалами с температурой воздуха в них  $t_c$  больше  $t_n$ , но меньше  $t_b$ , коэффициент  $n$  следует определять по формуле

$$n = \frac{t_b - t_c}{t_b - t_n} \quad (5.16)$$

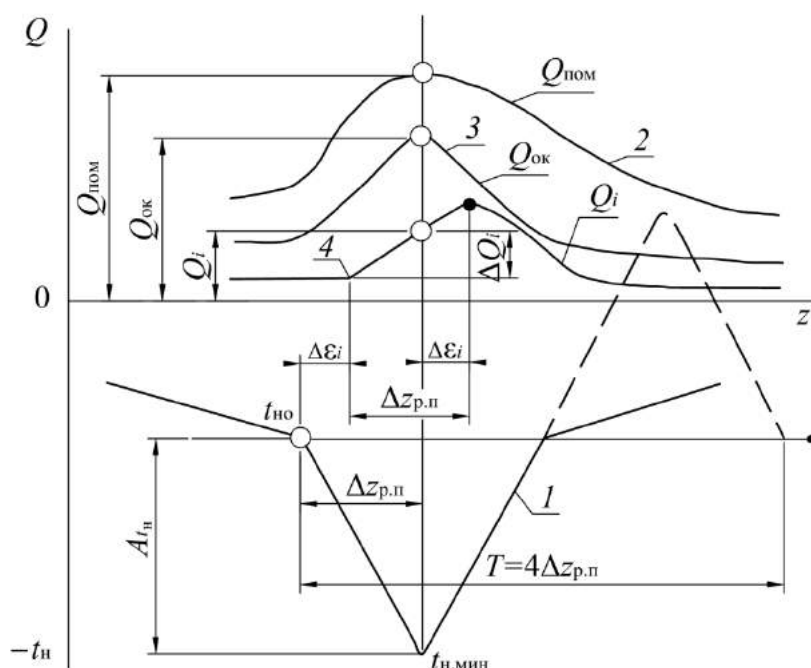


Рис. 5.1. Определение наибольших теплотерь помещения в период резкого похолодания: 1 – изменение наружной температуры; 2 – теплотери помещением, которое складывается из теплотерь через окна (3), стены и перекрытия (4)

Величину  $Q_{\text{пом}}$  в связи с этим можно представить в виде

$$Q_{\text{пом}} = Q_{\text{ок}} + \Sigma Q_i, \quad (5.17)$$

где  $Q_{\text{ок}}$  – наибольшие теплотери через окна, определяемые по (5.15) при  $t_{\text{н}} = t_{\text{но}} + A_{t_{\text{н}}}$ ;  $\Sigma Q_i$  – сумма теплотерь через прочие теплопередающие ограждения помещения в момент наибольших теплотерь через окна.

Величина  $Q_i$  для теплоустойчивого ограждения равна

$$Q_i = Q_{i0} + \Delta Q_i, \quad (5.18)$$

где  $Q_{i0}$  – теплотери в начале периода резкого похолодания при  $t_{\text{н}} = t_{\text{но}}$  по формуле (5.15);  $\Delta Q_i$  – дополнительные теплотери, соответствующие наружной температуре в момент наибольших теплотерь через окна.

Разница  $\Delta \varepsilon_i$  между временем наступления максимума теплотерь через теплоустойчивые ограждения и временем минимума наружной температуры с учетом формулы (4.14) составляет

$$\Delta \varepsilon_i = 4\Delta z_{\text{р.п}} (0,113D_i - 0,017), \quad (5.19)$$

$D_i$  – характеристика тепловой массивности, рассчитанная по формуле (4.5) для периода  $T = 4\Delta z_{\text{р.п}}$ ;  $\Delta z_{\text{р.п}}$  – продолжительность резкого похолодания, ч.

По действующим нормам тепловую мощность системы отопления принимают равной сумме теплотерь через отдельные ограждения, рассчитанные при  $t_{\text{н}} = t_{\text{н5}}$ , т. е. определенная по нормам установочная мощность системы отопления может заметно отличаться от максимальных теплотерь помещения. Способы определения расчетных теплотерь и соответствующие расчетные приемы подробно рассматриваются в дисциплине «Отопление».

#### **5.4. Контрольные вопросы для самостоятельной работы**

1. Каким требованиям должна отвечать теплозащитная оболочка зданий?
2. Физический смысл величины градусо-суток отопительного периода.
3. Опишите методику определения величины приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций.
4. Что такое условное сопротивление теплопередаче?

5. Напишите формулу для расчета удельной теплозащитной характеристики здания.
6. Приведите методику для расчета удельной теплозащитной характеристики здания.
7. Укажите санитарно-гигиеническое требование к теплозащитной оболочке здания.
8. Напишите зависимость для определения основных потерь теплоты помещением.
9. В чем смысл коэффициента, учитывающего зависимость положения ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху?
10. Через какую ограждающую конструкцию происходят наибольшие теплопотери в здании?

## Глава 6. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ПОМЕЩЕНИЯ

Теплоустойчивостью помещения называется его свойство поддерживать относительное постоянство температуры при периодически изменяющихся теплоступлениях.

### 6.1. Колебания температуры воздуха и теплопоглощение ограждением

При колебаниях температуры воздуха в помещении около среднего значения изменяются температуры поверхностей ограждений и проходящие через них тепловые потоки. Соотношение между колебаниями теплового потока и температуры на поверхности ограждения определяется ее коэффициентом теплоусвоения  $Y$ . Чтобы установить зависимость от температуры воздуха, нужно иметь дополнительную характеристику, связывающую изменения потока теплоты и температуры воздуха. Такой характеристикой является коэффициент теплопоглощения ограждения  $B$ .

Затухание амплитуды колебания температуры воздуха  $A_{t_B}$  при переходе тепловой волны от помещения к внутренней поверхности ограждения, на которой амплитуда равна  $A_{\tau_B}$  :

$$\frac{A_{t_B}}{A_{\tau_B}} = 1 + R_B Y_1, \quad (6.1)$$

где  $R_B$  – сопротивление теплообмену на внутренней поверхности, равное  $1/\alpha_B$ ;  $Y_1$  – коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения, определяемый по зависимости.  $Y_1 = A_q/A_{\tau_B}$ .

Индекс  $u$  коэффициента теплоусвоения указывает на порядок отсчета слоев в ограждении по направлению движения волны, в данном случае начиная от материального слоя на внутренней стороне ограждения. Подстановка  $Y_1$  в формулу (6.1) дает искомое значение коэффициента теплопоглощения  $B$ :

$$B = \frac{A_q}{A_{\tau_B}} = \frac{Y_1}{1 + R_B Y_1} = \frac{1}{\frac{1}{Y_1} + \frac{1}{\alpha_B}}. \quad (6.2)$$

Коэффициент теплопоглощения равен отношению амплитуды колебания теплового потока  $A_q$ , проходящего через поверхность ограждения, к вызвавшей этот поток амплитуде колебания температуры окружающей поверхность среды. Как видно из формулы,  $B$  имеет размерность Вт/(м<sup>2</sup>·°С), такую же, как  $Y$  и  $\alpha_B$ .

Уравнение (6.2) можно переписать в виде зависимости между сопротивлениями (обратными величинами) теплопоглощению, теплоусвоению и теплообмену:

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{Y_1} + \frac{1}{\alpha_B}. \quad (6.3)$$

Из этой зависимости следует, что сопротивление теплопоглощению  $1/B$  равно сумме сопротивлений теплоусвоению  $1/Y_1$  и теплообмену  $1/\alpha_B$ . Таким образом, при поглощении теплоты поверхностью от воздуха должно быть преодолено сначала сопротивление теплообмену, а затем сопротивление теплоусвоению.

Амплитуда  $A_q$  изменения теплового потока, поглощаемого поверхностью при колебаниях температуры среды  $A_{t_B}$ , составляет

$$A_q = BA_{t_B}. \quad (6.4)$$

Если ограждение имеет площадь  $F$ , то амплитуда  $A_Q$  изменения всего количества теплоты, поглощаемой этой поверхностью, равна

$$A_Q = BFA_{t_B}. \quad (6.5)$$

В помещении поверхности всех ограждений поглощают теплоту. В результате перемешивания воздуха амплитуду колебания его температуры для всех поверхностей в помещении обычно принимают одинаковой, равной  $A_{t_B}$ . В каждый момент времени между количествами теплоты, передаваемой в помещение и поглощаемой всеми его поверхностями, должно быть равенство. Поэтому амплитуда теплоступлений в помещение  $A_{Q_n}$  равна амплитуде теплопоглощения всеми поверхностями, т. е.

$$A_{Q_n} = \sum B_i F_i A_{t_B}. \quad (6.6)$$

Из этого равенства получаем основное уравнение теплоустойчивости помещения:

$$A_{t_b} = \frac{A_{Q_n}}{P}, \quad (6.7)$$

где  $P$  – показатель теплопоглощения помещения, равный суммарной теплопоглощательной способности всех поверхностей в помещении:

$$P = \sum B_i F_i. \quad (6.8)$$

В действующей нормативной литературе теплоустойчивость в холодный период года не нормируется, однако имеются следующие рекомендуемые требования к теплоустойчивости помещений в холодный период года.

Требуемая амплитуда колебания результирующей температуры помещения  $A_{t_b}$ , °С, в холодный период года не должна превышать:

- при наличии в здании системы центрального отопления и печей непрерывной топки – 1,5 °С;
- при электро-, теплоаккумуляционном отоплении – 2,5 °С;
- при печном отоплении с периодической топкой – 3 °С.

Метод расчета теплоустойчивости помещений в холодный период года состоит в следующем. Расчетную амплитуду колебания температуры воздуха в помещениях жилых и общественных зданий в холодный период года следует определять по формуле

$$A_{t_b}^p = \frac{0,7MQ_0}{\sum A_i B_i}, \quad (6.9)$$

где  $M$  – коэффициент неравномерности теплоотдачи нагревательным прибором, принимаемый по табл. 6.1;  $Q_0$  – средняя теплоотдача отопительного прибора, Вт, равная теплотерям данного помещения;  $A_i$  – площадь  $i$ -й ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>;  $B_i$  – коэффициент теплопоглощения поверхности  $i$ -го ограждения, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), определяемый по формуле (6.2).

Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции  $\alpha_b$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), составляет

$$\alpha_b = 4,5 + \alpha_k, \quad (6.10)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена внутренней поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), принимаемый равным для: внутреннего ограждения – 1,2; окна – 3,5; пола – 1,5; потолка – 3,5.

Таблица 6.1

Коэффициент неравномерности теплоотдачи  $M$  нагревательных приборов

Тип отопления	$M$
Водяное отопление зданий с непрерывным обслуживанием	0,1
Паровое отопление или нетеплоемкими печами:	
– время подачи пара или топки печи – 18 ч, перерыв – 6 ч	0,8
– время подачи пара или топки печи – 12 ч, перерыв – 12 ч	1,4
– время подачи пара или топки печи – 6 ч, перерыв – 18 ч	2,2
Поквартирное водяное отопление (время топки – 6 ч)	1,5
Печное отопление теплоемкими печами при топке их 1 раз в сутки:	
– толщина стенок печи в ½ кирпича	от 0,4 до 0,9
– толщина стенок печи в ¼ кирпича	от 0,7 до 1,4

Примечание. Меньшие значения  $M$  соответствуют массивным печам, большие – менее массивным, легким печам. При топке печей 2 раза в сутки величину  $M$  следует уменьшать в 2,5...3 раза для печей со стенками в ½ кирпича и в 2...2,3 раза – при ¼ кирпича.

## 6.2. Прерывистые поступления лучистой и конвективной теплоты

Изменения теплопоступлений любой сложности можно представить в виде ряда прерывистых поступлений, пользуясь методом наложения. Рассмотрение и решение задачи для прерывистых поступлений позволяет определить тепловой режим помещения при любых изменениях подачи теплоты во времени.

Прерывистой называют периодическую подачу теплоты (рис. 6.1, *a*), когда в течение части периода  $m/T$ , в продолжение  $m$ , ч, поступление теплоты поддерживается на постоянном уровне  $Q_n$  и полностью прерывается на остальную его часть  $1 - (m/T)$ . Прерывистая подача теплоты может быть математически представлена в форме ряда Фурье – суммы гармоник, имеющих разные амплитуды и периоды. Для ряда в целом, как и для слагаемых гармоник, справедливы общие закономерности процесса. Это обстоятельство позволило получить общее решение, которое можно использовать в инженерном методе.

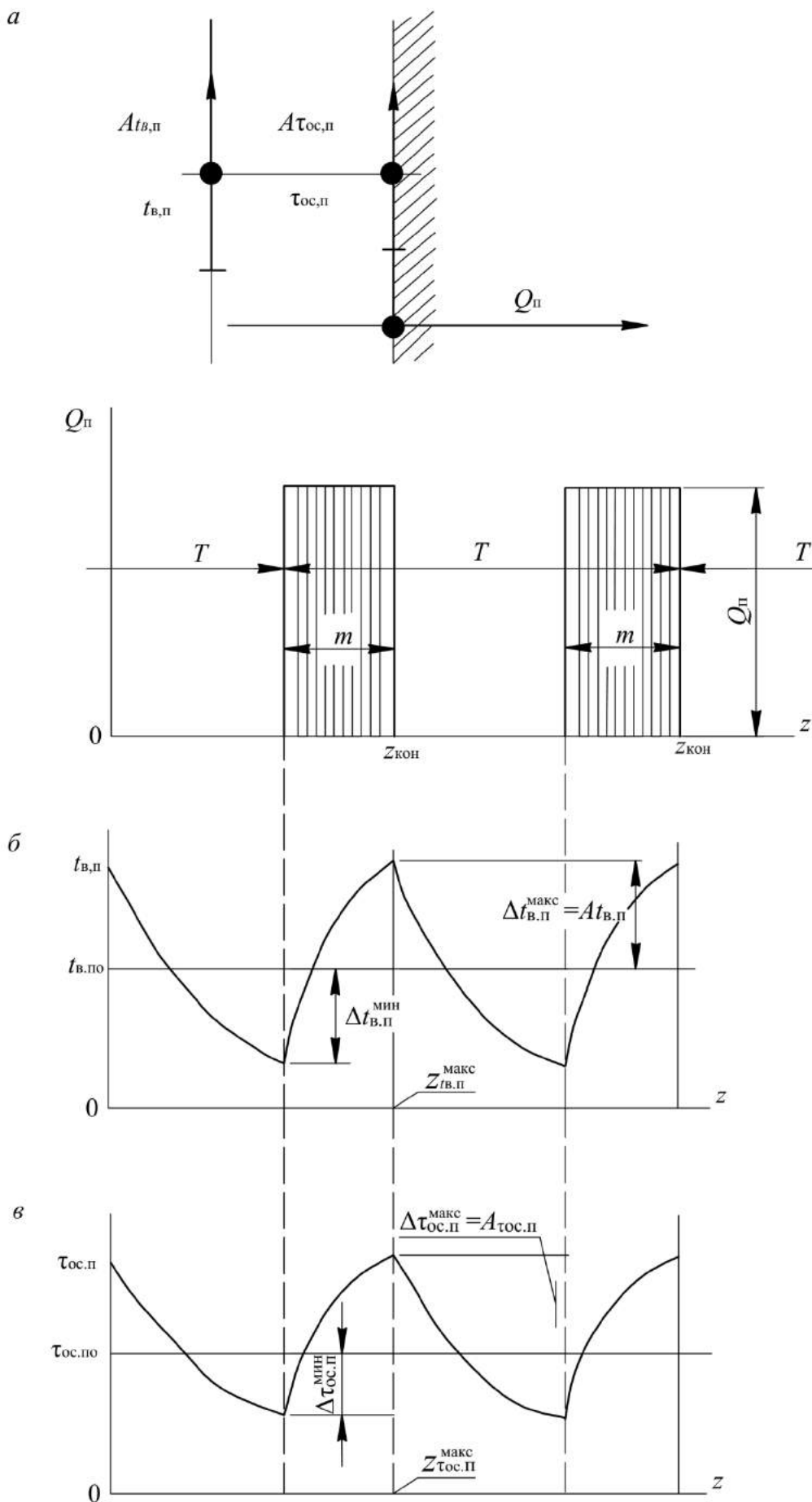


Рис. 6.1. Изменения температуры воздуха (б) и температуры внутренней поверхности (в) ограждения под влиянием прерывистых поступлений теплоты (а)



При расчете теплоустойчивости помещения необходимо определить (рис. 6.1, б) отклонения температуры воздуха  $\Delta t_{в.п}$  и поверхностей  $\Delta \tau_{ос.п}$  от их средних за период значений при прерывистых поступлениях (обозначено «п»). Отклонения температуры поверхностей в помещении при прерывистой подаче  $Q_{п}$  лучистой или конвективной теплоты

$$\Delta \tau_{ос.п} = \frac{\Omega Q_{п}}{Y_{п}}. \quad (6.11)$$

Коэффициент прерывистости  $\Omega$  в формуле (6.11) зависит от  $\frac{m}{T}$  и момента времени  $z/T$ , для которого определяется величина  $\Delta \tau_{ос}$  (рис. 6.2). Максимальное повышение температуры  $\tau_{ос.п}$  относительно среднего значения соответствует моменту времени окончания подачи теплоты (рис. 6.1, в). Принимаем величину  $\Delta \tau_{ос.п}$  за амплитуду  $A_{\tau_{ос.п}}$  колебания температуры поверхностей в режиме прерывистых поступлений:

$$A_{\tau_{ос.п}} = \frac{\Omega^{\max} Q_{п}}{Y_{п}}, \quad (6.12)$$

где  $\Omega^{\max}$  – максимальное значение коэффициента прерывистости, значения которого даны в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Значения  $\Omega^{\max} = f\left(\frac{m}{T}\right)$

$\Omega^{\max}$	0	0,73	0,84	0,84	0,76	0,63	0,45	0,24	0
$m/T$	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1

Полный перепад температуры поверхностей в перерыве между теплопоступлениями:

$$\tau_{ос.п}^{\max} - \tau_{ос.п}^{\min} = Q_{п} \frac{\Omega^{\max} - \Omega^{\min}}{Y_{п}}, \quad (6.13)$$

где  $\Omega^{\min}$  – минимальное значение коэффициента прерывистости.

При поступлении только лучистой теплоты изменения  $t_{в.п}$  равны по величине  $\tau_{ос.п}$  (6.11), (6.12) и (6.13) и совпадают во времени. Время максимального значения температур совпадает с моментом окончания прерывистой подачи.

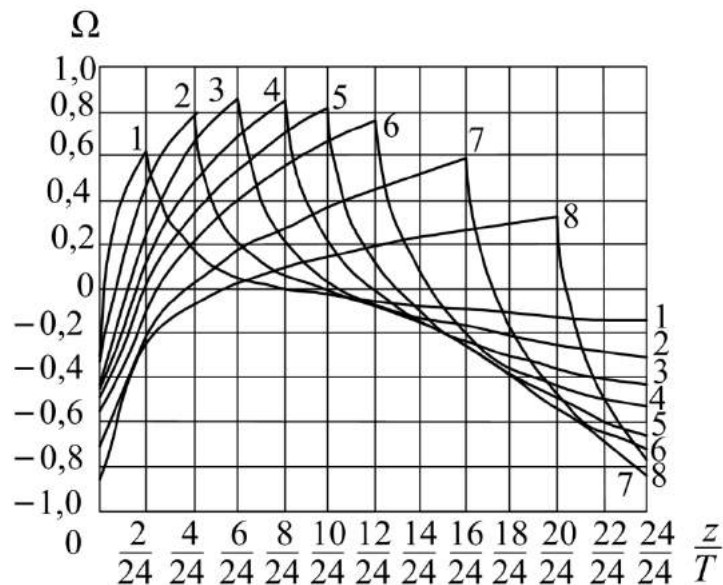


Рис. 6.2. Зависимость коэффициента прерывистости  $\Omega$  от относительной продолжительности периода  $m/T$

При прерывистом притоке конвективной теплоты  $Q_{п.к}$  величина  $\Delta t_v$  отличается от  $\Delta \tau_{ос}$  и равна

$$\Delta t_{в.п.к} = \Delta \tau_{ос.п.к} + \frac{Q_{п.к}}{\Lambda}. \quad (6.14)$$

Максимальное превышение температуры воздуха над средним значением обозначим  $A_{t_{в.п.к}}$ . Величина этой амплитуды составляет

$$A_{t_{в.п.к}} = A_{\tau_{ос.п.к}} + \frac{Q_{п.к}}{\Lambda}. \quad (6.15)$$

Полный перепад температуры воздуха за перерыв между поступлениями от максимального до минимального значений равен

$$t_{в.п.к}^{макс} - t_{в.п.к}^{мин} = Q_{п.к} \left( \frac{\Omega^{макс} - \Omega^{мин}}{Y_{п}} + \frac{1}{\Lambda} \right). \quad (6.16)$$

Поступления лучистой теплоты прямой солнечной радиации непосредственно в помещение близки к прерывистым поступлениям.

Для получения температурного режима помещения при совместном действии прерывистых поступлений теплоты необходимо для каждой составляющей отдельно рассчитать соответствующие температурные изменения с последующим их суммированием в отдельные моменты времени.

### 6.3. Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. Как определяется теплоустойчивость помещения?
2. Какая величина определяет соотношение между колебаниями теплового потока и температуры на поверхности ограждения?
3. В чем физический смысл коэффициента теплопоглощения?
4. Зависимость для определения коэффициента теплопоглощения.
5. Инженерная методика расчета амплитуды изменения теплового потока.
6. Напишите основное уравнение теплоустойчивости.
7. Приведите ограничения требуемой амплитуды колебания результирующей температуры помещения в холодный период года.
8. Напишите формулу для определения коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции.
9. Каким методом производят расчет изменения теплоступлений?
10. Дайте определение прерывистой подачи теплоты.
11. В чем заключается физический смысл коэффициента прерывистости?
12. Приведите зависимость для расчета полного перепада температуры поверхностей в перерыве между теплоступлениями.
13. В каком виде математически может быть представлена прерывистая подача теплоты?
14. Формула для определения полного перепада температуры воздуха за перерыв между поступлениями от максимального до минимального значений.
15. Приведите качественную графическую зависимость изменения температуры воздуха и температуры внутренней поверхности ограждения под влиянием прерывистых поступлений теплоты.

## Глава 7. ПРАКТИКУМ ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОФИЗИКЕ

Практикум содержит действующие методики расчета тепловой защиты зданий и одновременно является примером оформления расчетно-графической работы (исходные данные приведены в Приложении Б), поэтому отдельные фундаментальные зависимости, указанные в главах 1...6, приведены повторно.

### 7.1. Выбор исходных данных для проектирования теплового контура здания

#### 7.1.1. Определение режима эксплуатации наружных ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений зданий в холодный период года определяется в зависимости от относительной влажности  $\varphi_v$ , %, и температуры  $t_v$ , °С, внутреннего воздуха и устанавливается по данным табл. 1 [18].

Условия эксплуатации ограждающих конструкций А или Б, зависящие от влажностного режима помещений и зон влажности района строительства и необходимые для выбора теплотехнических показателей материалов наружных ограждений, следует устанавливать по табл. 2 [18]. Зона влажности территории строительства определяется по Приложению В [18].

**Пример 1.** Исходные данные: расположение здания – г. Н. Новгород; назначение здания – многоквартирный жилой дом. Расчетное значение температуры внутреннего воздуха  $t_v$ , согласно п. 5.2 [18], табл. 1 [21] и табл. 1 [4], принимается равным 21 °С. Расчетная относительная влажность внутреннего воздуха  $\varphi_v$  принимается равной 60 %, согласно п. 5.7 [18]. По данным табл. 1 [18] принимаем влажностный режим помещений здания – «Нормальный». По данным Приложения В [18], г. Н. Новгород находится в нормальной зоне влажности. По табл. 2 [21] принимаем расчетные условия эксплуатации строительных конструкций – «Б». Результаты расчета сводим в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Выбор условий эксплуатации строительных конструкций

Группа помещений	$\varphi_v$ , %	$t_v$ , °С	Влажностный режим	Условия эксплуатации строительных конструкций
Жилой дом	60	21	Нормальный	Б

### 7.1.2. Определение требуемого приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций

Требуемое приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций здания  $R_0^{TP}$ ,  $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ , определяется по формуле

$$R_0^{TP} = a \text{ГСОП} + b, \quad (7.1)$$

где ГСОП – градусо-сутки отопительного периода,  $^\circ C \cdot \text{сут}/\text{год}$ ;  $a, b$  – коэффициенты, значения которых принимаются согласно табл. 3 [18].

Градусо-сутки отопительного периода определяются по зависимости

$$\text{ГСОП} = (t_B - t_{от}) z_{от}, \quad (7.2)$$

где  $t_{от}$ ,  $z_{от}$  – средняя температура наружного воздуха,  $^\circ C$ , и продолжительность, сут/год, отопительного периода для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более  $+8 \text{ }^\circ C$ , согласно ТСН [21].

**Пример 2.** Исходные данные приведены в примере 1. Здесь и далее приводимые примеры расчетов логически связаны друг с другом.

ГСОП для рассматриваемого здания составляют

$$\text{ГСОП} = (21 + 4,5)212 = 5406 \text{ }^\circ C \cdot \text{сут}/\text{год}.$$

Значения требуемого приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций определяются по формуле (7.1), результаты расчета представлены в табл. 7.2.

Таблица 7.2  
Значения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Наименование здания	Градусо-сутки отопительного периода, $^\circ C \cdot \text{сут}/\text{год}$	Требуемое сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций $R_0^{TP}$ , ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт			
		стен	покрытий и перекрытий над проездами	перекрытий чердачных над неотапливаемыми подпольями и подвалами	окон и балконных дверей, витрин и витражей
Жилой дом	5406	3,292	4,903	4,333	0,555

### 7.1.3. Расчет нормируемой удельной теплозащитной характеристики теплового контура здания

Нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания,  $k_{об}^{тр}$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°C), определяется по зависимостям

$$k_{об}^{тр} = \begin{cases} \frac{4,74}{0,00013ГСОП + 0,61} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{V_{от}}}, V_{от} \leq 960; \\ \frac{0,16 + \frac{10}{\sqrt{V_{от}}}}{0,00013ГСОП + 0,61}, V_{от} > 960; \end{cases} \quad (7.3)$$

$$k_{об}^{тр} = \frac{8,5}{\sqrt{ГСОП}}, \quad (7.4)$$

где  $V_{от}$  – отапливаемый объем здания, равный объему, ограниченному внутренними поверхностями наружных ограждений здания, м<sup>3</sup>.

Если величина  $k_{об}^{тр}$ , вычисленная по формуле (7.3), меньше значения определенного по формуле (7.4), к расчету следует принимать значение  $k_{об}^{тр}$ , определенное по формуле (7.4).

**Пример 3.** Габаритные размеры рассматриваемого девятиэтажного многоквартирного жилого дома приведены в Приложении Б. Высота этажа равна  $h_{эт} = 3,1$  м. Отапливаемый объем здания  $V_{об} = 7240$  м<sup>3</sup>.

Нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания  $k_{об}^{тр}$  (комплексное требование) определяется следующим образом

$$k_{об}^{тр} = \frac{0,16 + \frac{10}{\sqrt{7240}}}{0,00013 \cdot 5406 + 0,61} = 0,211 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)};$$

$$k_{об}^{тр} = \frac{8,5}{\sqrt{5406}} = 0,115 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}.$$

Принимаем нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания  $k_{об}^{тр}$  равным 0,211 Вт/(м<sup>3</sup>·°C).

#### 7.1.4. Расчет нормативного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций

Нормативное значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций,  $R_o^{\text{норм}}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , (поэлементное требование) составляет

$$R_o^{\text{норм}} = R_o^{\text{тп}} m_p, \quad (7.5)$$

где  $m_p$  – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства.

Допускается принимать значения коэффициента  $m_p = 0,63$  – для наружных стен,  $m_p = 0,95$  – для светопрозрачных конструкций,  $m_p = 0,8$  – для остальных ограждающих конструкций в случае, если при расчете удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания  $q_{\text{от}}^p$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ , соблюдается условие

$$q_{\text{от}}^p \leq q_{\text{от}}^{\text{тп}}, \quad (7.6)$$

где  $q_{\text{от}}^{\text{тп}}$  – нормируемая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ , для многоквартирных жилых домов принимается по табл. 14 [18].

Расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания  $q_{\text{от}}^p$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ , определяется по формуле

$$q_{\text{от}}^p = [k_{\text{об}} + k_{\text{вент}} - (k_{\text{быт}} + k_{\text{рад}}) \nu \zeta] (1 - \xi) \beta_h, \quad (7.7)$$

где  $k_{\text{об}}$  – удельная теплозащитная характеристика здания,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ ;  $k_{\text{вент}}$  – удельная вентиляционная характеристика здания,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ ;  $k_{\text{быт}}$  – удельная характеристика бытовых тепловыделений здания,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ ;  $k_{\text{рад}}$  – удельная характеристика тепlopоступлений в здание от солнечной радиации,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ ;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий снижение тепlopотребления жилых зданий при наличии поквартирного учета тепловой энергии на отопление, до получения статистических данных принимается равным 0,1;  $\beta_h$  – коэффициент, учитывающий дополнительное тепlopотребление системы отопления, связанное с дискретностью номинального теплового потока номенклатурного ряда отопительных приборов, их дополнительными тепlopотерями через радиаторные

участки ограждений, повышенной температурой воздуха в угловых помещениях, теплотерями трубопроводов, проходящих через неотапливаемые помещения: для многосекционных и других протяженных зданий  $\beta_h = 1,13$ ; зданий башенного типа –  $\beta_h = 1,11$ ; зданий с отапливаемыми подвалами и чердаками  $\beta_h = 1,07$ ; зданий с отапливаемыми подвалами и чердаками, а также с квартирными генераторами теплоты  $\beta_h = 1,05$ ;  $\nu$  – коэффициент, учитывающий снижение теплоступлений за счет тепловой инерции ограждающих конструкций, рекомендуемое значение которого равно  $0,7 + 0,000025(\text{ГСОП} - 1000)$ ;  $\zeta$  – коэффициент эффективности регулирования подачи теплоты в системах отопления, рекомендуемые значения:  $\zeta = 1$  – в однотрубной системе с термостатами и с пофасадным авторегулированием на вводе или поквартирной горизонтальной разводкой;  $\zeta = 0,95$  – в двухтрубной системе отопления с термостатами и с центральным авторегулированием на вводе;  $\zeta = 0,9$  – в однотрубной системе с термостатами и с центральным авторегулированием на вводе или в однотрубной системе без термостатов и с пофасадным авторегулированием на вводе, а также в двухтрубной системе отопления с термостатами и без авторегулирования на вводе;  $\zeta = 0,85$  – в однотрубной системе отопления с термостатами и без авторегулирования на вводе;  $\zeta = 0,7$  – в системе без термостатов и с центральным авторегулированием на вводе с коррекцией по температуре внутреннего воздуха;  $\zeta = 0,5$  – в системе без термостатов и без авторегулирования на вводе – регулирование центральное в ЦТП или котельной.

Удельная вентиляционная характеристика здания  $k_{\text{вент}}$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°С), определяется по формуле

$$k_{\text{вент}} = 0,28c n_{\text{в}} \beta_{\text{в}} \rho_{\text{в}}^{\text{вент}} (1 - k_{\text{эф}}), \quad (7.8)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воздуха, 1,005 кДж/(кг·°С);  $n_{\text{в}}$  – средняя кратность воздухообмена, ч<sup>-1</sup>, определяется по методике Приложения Г [18], для жилых зданий в ходе работы может быть принята в интервале  $n_{\text{в}} = 0,5 \dots 0,6$  ч<sup>-1</sup>;  $\beta_{\text{в}}$  – коэффициент, учитывающий снижение объема воздуха в здании за счет наличия внутренних ограждающих конструкций, при использовании в расчете  $n_{\text{в}}$  методики СП [18] может быть принят в рамках работы равным 0,85, при



$n_v = 0,5 \dots 0,6 \text{ ч}^{-1}$  и  $\beta_v = 1$ ;  $\rho_v^{\text{вент}}$  – плотность наружного воздуха, соответствующая средней температуре отопительного периода,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k_{\text{вент}}$  – коэффициент эффективности рекуператора, при отсутствии теплоутилизационного оборудования в конструкции системы вентиляции  $k_{\text{вент}} = 0$ .

Величина удельной характеристики бытовых тепловыделений здания  $k_{\text{быт}}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ , определяется по зависимости

$$k_{\text{быт}} = \frac{q_{\text{быт}} A_{\text{ж}}}{V_{\text{от}} (t_{\text{в}} - t_{\text{от}})}, \quad (7.9)$$

где  $q_{\text{быт}}$  – величина бытовых тепловыделений на  $1 \text{ м}^2$  площади жилых помещений,  $\text{Вт/м}^2$ ,  $q_{\text{быт}} = 10 \dots 17 \text{ Вт/м}^2$  – в зависимости от заселенности квартир,  $\text{м}^2/\text{чел}$ ;  $A_{\text{ж}}$  – площадь жилых помещений здания,  $\text{м}^2$ , для представленных в Приложении Б зданий может быть принята равной  $0,6A_{\text{во}}$ ;  $A_{\text{во}}$  – площадь пола здания по внутреннему обмеру,  $\text{м}^2$ .

Удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации  $k_{\text{рад}}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$  определяется по формуле

$$k_{\text{рад}} = \frac{11,6 Q_{\text{рад}}^{\text{год}}}{V_{\text{от}} \text{ГСОП}}, \quad (7.10)$$

где  $Q_{\text{рад}}^{\text{год}}$  – теплопоступления через окна от солнечной радиации в течение отопительного периода,  $\text{МДж/год}$ :

$$Q_{\text{рад}}^{\text{год}} = \tau_{1\text{ок}} \tau_{2\text{ок}} (A_{\text{ок1}} I_{\text{ок1}} + A_{\text{ок2}} I_{\text{ок2}} + A_{\text{ок3}} I_{\text{ок3}} + A_{\text{ок4}} I_{\text{ок4}}), \quad (7.11)$$

где  $\tau_{1\text{ок}}$ ,  $\tau_{2\text{ок}}$  – коэффициенты относительного проникания солнечной радиации для светопрозрачных затенений окон и учета затенения светового проема окна, при отсутствии паспортных и проектных данных могут быть приняты согласно данным Приложения Л [16];  $I_{\text{ок1}}$ ,  $I_{\text{ок2}}$ ,  $I_{\text{ок3}}$ ,  $I_{\text{ок4}}$  – средняя за отопительный период величина солнечной радиации на вертикальную поверхность при действительных условиях облачности, соответственно ориентированных по четырем фасадам здания,  $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , принимается по Приложению 5 [5];  $A_{\text{ок1}}$ ,  $A_{\text{ок2}}$ ,  $A_{\text{ок3}}$ ,  $A_{\text{ок4}}$  – площадь, ориентированная по четырем сторонам света светопроемов фасадов здания,  $\text{м}^2$ , без учета несветопрозрачной части балконных дверей.

Из зависимости (7.7) следует, что максимальное значение удельной теплозащитной характеристики определяется выбором наименьшего из двух значений, определенного по формулам (7.3) или (7.4) и по формуле

$$k_{об}^{тр} = \frac{q_{от}^{тр}}{(1 - \xi)\beta_h} - k_{вент} + (k_{быт} + k_{рад})v\zeta. \quad (7.12)$$

Если  $k_{об}^{тр}$ , рассчитанное по формулам (7.3), (7.4), больше, чем полученное по формуле (7.12), то за требуемое значение удельной теплозащитной характеристики принимают  $k_{об}^{тр}$ , рассчитанное по формуле (7.12), в обратном случае – рассчитанное по формулам (7.3), (7.4).

Проверяется соответствие комплексного требования к тепловому контуру здания поэлементному требованию к нему по следующей зависимости

$$k_{об}^{тр} \leq \frac{1}{V_{от}} \sum \frac{A_i}{R_{oi}^{норм}} n_{ti} = \frac{1}{V_{от}} \sum \frac{A_i}{R_{oi}^{тр} m_p} n_{ti}, \quad (7.13)$$

где  $A_i$  – площадь  $i$ -го типа наружной ограждающей конструкции здания (стена, пол, потолок, окно, входная дверь),  $m^2$ ;  $n_{ti}$  – коэффициент, учитывающий несоответствие температуры наружного или внутреннего воздуха расчетному температурному перепаду для  $i$ -го типа наружной ограждающей конструкции, в работе  $n_{ti} = 1$  (чердак и подвал – неотапливаемые, с оконными проемами);  $R_{oi}^{тр}$  – требуемое приведенное сопротивление теплопередаче  $i$ -го типа наружной ограждающей конструкции, определяемое по формуле (7.1).

Расчет проводится с наименьшими коэффициентами  $m_{pi}$  для данных типов ограждений: при соблюдении условия (7.13) нормативное приведенное сопротивление теплопередаче  $i$ -го типа наружных ограждающих конструкций принимается с учетом наименьших понижающих коэффициентов  $m_{pi}$  по зависимости (7.5); при несоблюдении условия (7.13) – значения коэффициентов  $m_{pi}$  увеличивают до соблюдения условия (7.13) либо по достижении ими всеми значения  $m_p = 1$ .

**Пример 4.** По данным табл. 14 [18] принимаем значение  $q_{от}^{тр}$  для девятиэтажного многоквартирного жилого дома равным  $q_{от}^{тр} = 0,319 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ .

Удельная вентиляционная характеристика  $k_{вент}$  составляет

$$k_{вент} = 0,28 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 1,31(1 - 0) = 0,184 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}).$$

Удельная характеристика бытовых тепловыделений  $k_{быт}$  составляет

$$k_{быт} = \frac{10 \cdot 1176}{7240(21 + 4,4)} = 0,0639 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}).$$

Для определения теплоступлений через окна и светопрозрачные проемы балконных дверей требуется определить конструкцию окон здания. Минимальное значение коэффициента  $m_p$  для окон составляет 0,95, что позволяет в расчетах принять  $R_o^{норм} = R_o^{тр} m_p = 0,555 \cdot 0,95 = 0,527 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$ .

По данным Приложения Л [16] принимаем следующие конструкции заполнения оконных проемов: двухкамерный стеклопакет в одинарном переплете из обычного стекла с межстекольным расстоянием 12 мм в деревянных или ПВХ-переплетах ( $\tau_{1ок} = 0,74$ ;  $\tau_{2ок} = 0,8$ ;  $R_o^{пп} = 0,54 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$ ).

Теплоступления через окна и от солнечной радиации в течение отопительного периода  $Q_{рад}^{год}$  для рассматриваемого здания составляют

$$Q_{рад}^{год} = 0,74 \cdot 0,8(145,5 \cdot 381 + 0 \cdot 619 + 199,8 \cdot 1058 + 0 \cdot 619) = 158022 \text{ МДж}/\text{год}.$$

Удельная характеристика теплоступлений в здание от солнечной радиации  $k_{рад}$  определяется по формуле

$$k_{рад} = \frac{11,6 \cdot 158022}{7240 \cdot 5406} = 0,0468 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}).$$

Максимальное значение удельной теплозащитной характеристики здания по формуле (7.12) составляет

$$k_{об}^{тр} = \frac{0,319}{(1 - 0,1)1,11} - 0,184 + (0,0639 + 0,0468)0,81 \cdot 1 = 0,225 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}).$$

За требуемое значение удельной теплозащитной характеристики принимаем  $k_{об}^{тр}$ , рассчитанное по формулам (7.3), (7.4), так как оно меньше значения, полученного по формуле (7.12).

Входной дверью в подъезд в данном расчете пренебрегаем, так как доля потерь теплоты через неё по отношению к общим теплопотерям через ограждающие конструкции незначительна (менее 0,1 %). Проверяем, соблюдается ли условие (7.13) с минимальными коэффициентами  $m_p$ , следующим образом:

$$k_{об}^{тр} = \frac{1}{7240} \left( \frac{261,4}{4,333 \cdot 0,8} + \frac{261,4}{4,333 \cdot 0,8} + \frac{1696,9}{3,292 \cdot 0,63} + \frac{345,3}{0,555 \cdot 0,95} \right) = 0,224 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}).$$

Условие (7.13) не соблюдается:  $0,224 > 0,211 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ , следовательно, увеличиваем коэффициент  $m_p$  с 0,63 до 0,72, и проводим повторный расчет:

$$k_{об}^{тр} = \frac{1}{7240} \left( \frac{261,4}{4,333 \cdot 0,8} + \frac{261,4}{4,333 \cdot 0,8} + \frac{1696,9}{3,292 \cdot 0,72} + \frac{345,3}{0,555 \cdot 0,95} \right) = 0,210 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}).$$

Условие (7.13) соблюдается:  $0,210 < 0,211 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ .

Принимаем следующие значения нормативного приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций:

– *наружные стены*

$$R_o^{\text{норм}} = 3,292 \cdot 0,72 = 2,47 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт};$$

– *перекрытия чердачные и над неотапливаемыми подвалами*

$$R_o^{\text{норм}} = 4,333 \cdot 0,8 = 3,47 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}.$$

По полученным значениям нормативного приведенного сопротивления теплопередаче определяют конструкции наружных ограждающих конструкций и их фактическое приведенное сопротивление теплопередаче.

## 7.2. Определение фактических теплозащитных характеристик теплового контура здания

### 7.2.1. Расчет фактического приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций

Фактическое приведенное сопротивление теплопередаче  $R_o^{пр}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , фрагмента теплозащитной оболочки здания или любой выделенной ограждающей конструкции определяется по формуле [18]

$$R_o^{пр} = \frac{1}{\frac{1}{R_o^{усл}} + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k}, \quad (7.14)$$

где  $R_o^{усл}$  – среднее по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания либо выделенной ограждающей конструкции,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;  $l_j$  – протяженность линейной неоднородности  $j$ -го вида, приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции,  $\text{м}/\text{м}^2$ ;  $\Psi_j$  – удельные потери теплоты через линейную неоднородность  $j$ -го вида,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°C}$  [17];  $n_k$  – количество точечных неоднородностей  $k$ -го типа, приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции,  $\text{шт.}/\text{м}^2$ ;  $\chi_k$  – удельные потери теплоты через точечную неоднородность  $k$ -го вида,  $\text{Вт}/\text{шт.} \cdot \text{°C}$ .

Перечень теплотехнических неоднородностей, учитываемых при проектировании тепловой защиты наружных ограждающих конструкций зданий, приведен в Приложении А [17]. Коэффициент теплотехнической однородности  $r$  – вспомогательная величина, характеризующая эффективность конструкции [18]:

$$r = R_o^{пр} / R_o^{усл}. \quad (7.15)$$

Величина  $R_o^{усл}$  определяется как среднее по площади значение условных сопротивлений теплопередаче всех фрагментов теплозащитной оболочки [18]:

$$R_o^{усл} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (7.16)$$

где  $\alpha_H$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции,  $8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;  $R_s$  – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , определяемое для материальных слоев по формуле

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (7.17)$$

где  $\delta_s$  – толщина слоя, м;  $\lambda_s$  – теплопроводность материала слоя,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ , принимается по данным Приложения Т [18].

### 7.2.1.1. Наружная стена

Определение требуемой толщины утеплителя и приведенного сопротивления теплопередаче определяется в нижеприведенной последовательности.

Требуемая толщина утеплителя наружной стены равна минимальной толщине утеплителя из стандартного ряда (с шагом 10 мм), при котором фактическое сопротивление теплопередаче больше нормируемого значения (определенного в примере 4). Выбор толщины утеплителя в конструкции наружной стены сводится к обеспечению следующего условия:

$$R_o^{тр} \leq R_o^{нр} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\alpha_B} + \sum \frac{\delta_s}{\lambda_s} + R_{ут} + \frac{1}{\alpha_H}} + \sum l_j [AR_{ут} + B] + \sum n_k \chi_k}, \quad (7.18)$$

где  $A$ ,  $B$  – интерполяционные коэффициенты табличных зависимостей линейных теплотехнических неоднородностей от конструкции стены и толщины утеплителя, принимаемые для удобства расчета по Приложению В. В условиях реального проектирования значения  $\Psi_j$  определяются интерполяцией для каждого значения расчетной толщины утеплителя из таблиц Приложения Г [17];  $R_{ут}$  – условное сопротивление теплопередаче слоя тепловой изоляции,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

В приведенном равенстве для реальной ограждающей конструкции неизвестно только условное сопротивление теплопередаче утеплителя, которое определяют путем перебора значений толщины утеплителя в некотором интервале, например  $\delta_{ут} = 0,05 \dots 0,15$  м.

**Пример 5.** Примем конструкцию наружных стен для рассматриваемого здания (вариант 1, Приложение Б): трехслойные стены с эффективным утеплителем, облицовкой кирпичной кладкой (рис. 7.1).

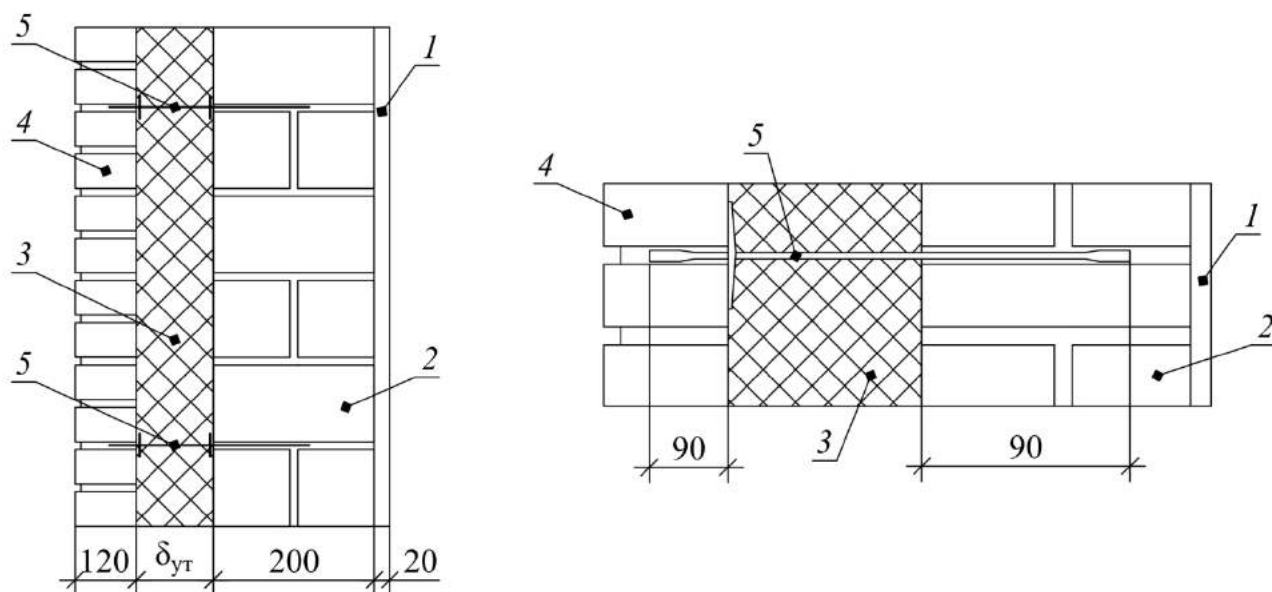


Рис. 7.1. Конструкция наружной стены: 1 – штукатурка цементно-песчаная; 2 – газобетонные блоки на цементном вяжущем ( $\rho_0 = 600$  кг/м<sup>3</sup>); 3 – утеплитель «КАВИТИ БАТТС» фирмы «Rockwool»; 4 – кладка из керамического пустотного кирпича ( $\rho_0 = 1400$  кг/м<sup>3</sup>); 5 – дюбель со стальным сердечником

При расчете приведенного сопротивления теплопередаче таких ограждений, согласно табл. А.1 [17], требуется учитывать следующие теплотехнические неоднородности: тарельчатые анкеры; сопряжения с перекрытиями; сопряжения с балконами; стыки с оконными блоками; примыкание к цокольному ограждению; наружные и внутренние углы.

Теплотехнические характеристики учитываемых в работе линейных теплотехнических неоднородностей представлены в Приложении В. В расчете стен учитываем только тарельчатые анкеры, сопряжения с перекрытиями; сопряжения с балконами; стыки с оконными блоками; наружные и внутренние углы. Добавочные потери в местах примыкания стен к цокольному ограждению и со-

пряжения с чердачным перекрытием учтены в коэффициенте теплотехнической однородности чердачного перекрытия и над неотапливаемым подвалом.

Технические характеристики слоев рассматриваемой наружной стены приведены в табл. 7.3. Исходные данные для расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены сводятся в табл. 7.4. Число тарельчатых анкеров  $n_k$  в среднем составляет 8...10 шт./м<sup>2</sup>. Толщина межэтажного перекрытия здания  $\delta_{пер}$  принимается равной 210 мм.

Таблица 7.3

Технические характеристики слоев наружной стены

Наименование конструктивного слоя	$\delta_s$ , мм	$\lambda_s$ , Вт/м·°С	$R_s$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт
$1/\alpha_B = 1/8,7$	-	-	0,115
Штукатурка цементно-песчаная	20	0,93	0,021
Газобетонные блоки на цементном вяжущем	250	0,26	0,962
Утеплитель «КАВИТИ БАТТС»	- <sup>1</sup>	0,04	- <sup>1</sup>
Кладка из керамического пустотного кирпича	120	0,64	0,187
$1/\alpha_H = 1/23$	-	-	0,043
$\frac{1}{\alpha_B} + \sum \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_H} =$			1,328

Примечание. 1 – требуется определить.

Таблица 7.4

Исходные данные для расчета приведенного сопротивления теплопередаче

Наименование теплотехнической неоднородности	$l_j$ , м/м <sup>2</sup>	$\Psi_j$ , Вт/(м·°С)			$n_k$ , шт./м <sup>2</sup>	$\chi_k$ , Вт/(шт.·°С)
		A	B	Условие		
1	2	3	4	5	6	7
Тарельчатый анкер	-	-	-	-	8	0,004 [6]
Сопряжения с перекрытиями и балконными плитами	0,345	-0,0006 0,0091	0,0723 0,0486	$1,22 \leq R_{ут} < 2,44$ $2,44 \leq R_{ут} \leq 6,1$	-	-
Стыки с оконными блоками и балконными дверьми	0,633	0 0,0033	0,104 0,094	$1,5 \leq R_{ут} < 3,0$ $3,0 \leq R_{ут} \leq 6,0$	-	-
Наружные углы	0,132	0,0317 0,0126	0,246 0,1888	$1,5 \leq R_{ут} < 3,0$ $3,0 \leq R_{ут} \leq 6,0$	-	-
Внутренние углы	0,066	-0,0137 -0,0073	0,1283 0,109	$1,5 \leq R_{ут} < 3,0$ $3,0 \leq R_{ут} \leq 6,0$	-	-

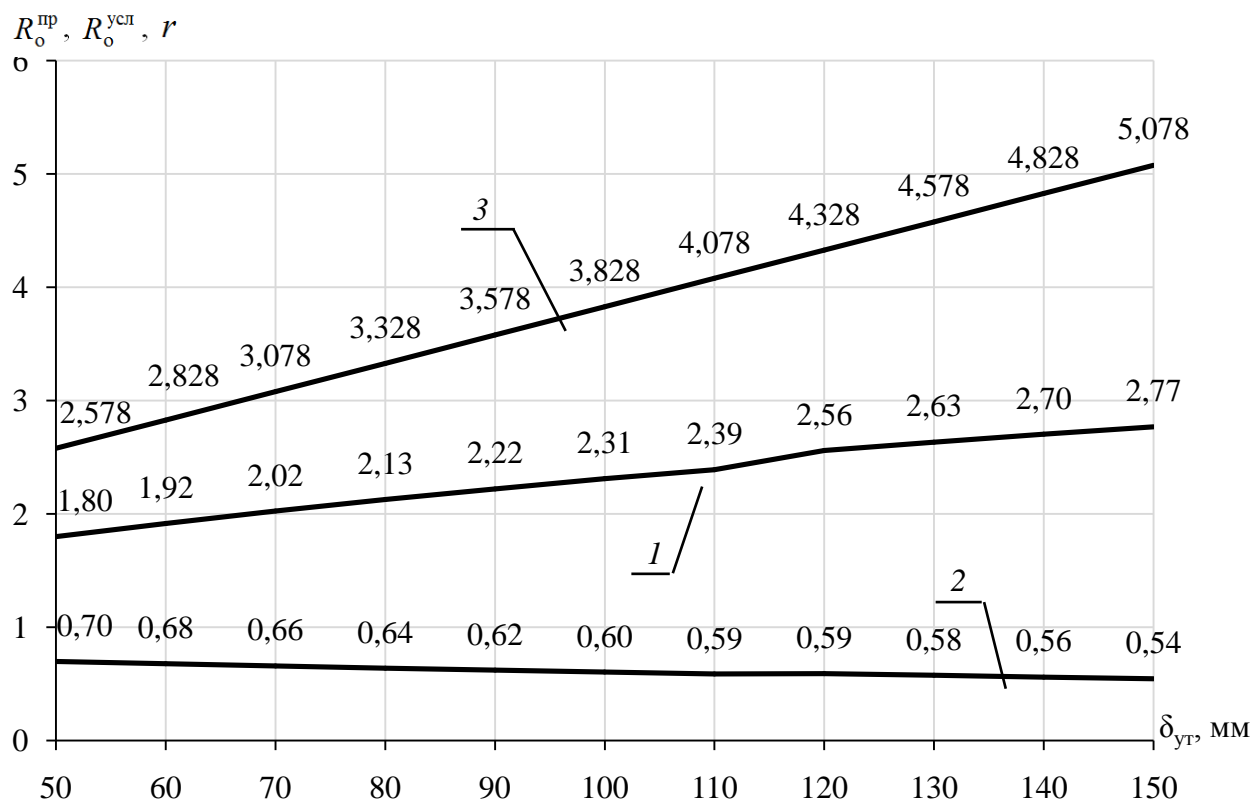
Подставляя данные табл. 7.3 и 7.4 в формулу (7.18) для толщин утеплителя  $\delta_{ут} = 0,05...0,20$  м, получаем зависимости:  $R_0^{np} = f(\delta_{ут})$ ,  $r = f(\delta_{ут})$ ,  $R_0^{ycl} = f(\delta_{ут})$ . Результаты расчета представлены в табл. 7.5 и на рис. 7.2.



Таблица 7.5

Результаты расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены

$\delta_{ут}$ , мм	$R_{ут}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$R_0^{усл}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$\Psi_1 l_1$	$\Psi_2 l_2$	$\Psi_3 l_3$	$\Psi_4 l_4$	$\sum \Psi_j l_j$	$\sum n_k \chi_k$	$R_0^{ип}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$r$
50	1,25	2,578	0,025	0,066	0,038	0,007	0,136	0,032	1,80	0,70
60	1,50	2,828	0,025	0,066	0,039	0,007	0,136	0,032	1,92	0,68
70	1,75	3,078	0,025	0,066	0,040	0,007	0,137	0,032	2,02	0,66
80	2,00	3,328	0,025	0,066	0,041	0,007	0,138	0,032	2,13	0,64
90	2,25	3,578	0,024	0,066	0,042	0,006	0,139	0,032	2,22	0,62
100	2,50	3,828	0,025	0,066	0,043	0,006	0,140	0,032	2,31	0,60
110	2,75	4,078	0,025	0,066	0,044	0,006	0,141	0,032	2,39	0,59
<b>120</b>	<b>3,00</b>	<b>4,328</b>	<b>0,026</b>	<b>0,066</b>	<b>0,030</b>	<b>0,006</b>	<b>0,128</b>	<b>0,032</b>	<b>2,56</b>	<b>0,59</b>
130	3,25	4,578	0,027	0,066	0,030	0,006	0,129	0,032	2,63	0,58
140	3,50	4,828	0,028	0,067	0,031	0,006	0,131	0,032	2,70	0,56
150	3,75	5,078	0,029	0,067	0,031	0,005	0,132	0,032	2,77	0,54

Рис. 7.2. Зависимости: 1 —  $R_0^{ип} = f(\delta_{ут})$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ; 2 —  $r = f(\delta_{ут})$ ; 3 —  $R_0^{усл} = f(\delta_{ут})$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ 

По данным табл. 7.5 и рис. 7.2 принимаем расчетное значение толщины утеплителя  $\delta_{ут} = 120$  мм. Приведенное сопротивление теплопередаче составляет  $R_0^{ип} = 2,56 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} > R_0^{\text{норм}} = 2,47 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  (по данным примера 4). Коэффициент теплотехнической однородности  $r$  составляет 0,59.

### 7.2.1.2. Перекрытие чердачное и над неотапливаемым подвалом

Расчет требуемой толщины утеплителя чердачного перекрытия и над неотапливаемым подвалом проводится по упрощенной формуле при известном коэффициенте теплотехнической однородности наружного ограждения:

$$\delta_{\text{ут}} \geq \lambda_{\text{ут}} \left( \frac{R_o^{\text{норм}}}{r} - \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} - \sum \frac{\delta_s}{\lambda_s} - \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \right), \quad (7.19)$$

где  $r$  – коэффициент теплотехнической однородности, для чердачного перекрытия равный 0,9, над неотапливаемым подвалом – 0,95 [5].

**Пример 6.** Конструкция чердачного перекрытия и перекрытия над неотапливаемым подвалом приведена на рис. 7.3 и 7.4. Результаты расчета толщины утеплителя представлены в табл. 7.6 и 7.7.

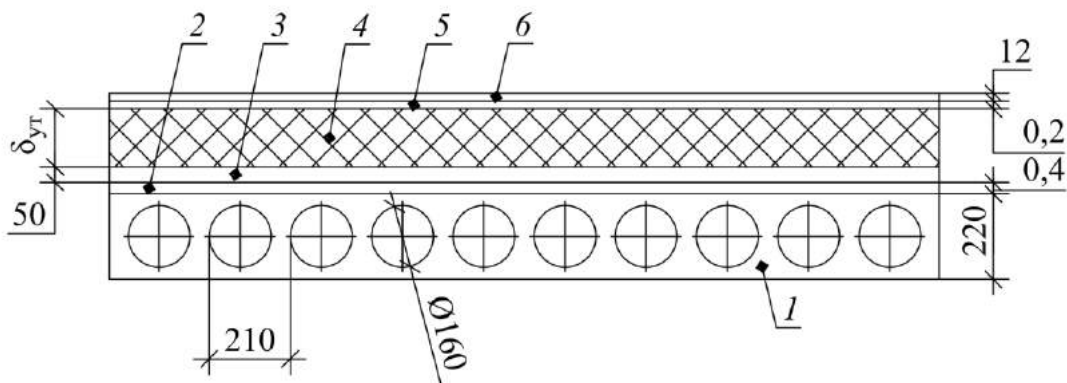


Рис. 7.3. Чердачное перекрытие: 1 – железобетонная плита; 2 – пароизоляция фирмы ISOVER; 3 – цементно-песчаная стяжка; 4 – теплоизоляционные плиты связующем «РУФ БАТТС» фирмы Rockwool; 5 – пленка ПВХ; 6 – асбестоцементный лист в 2 слоя

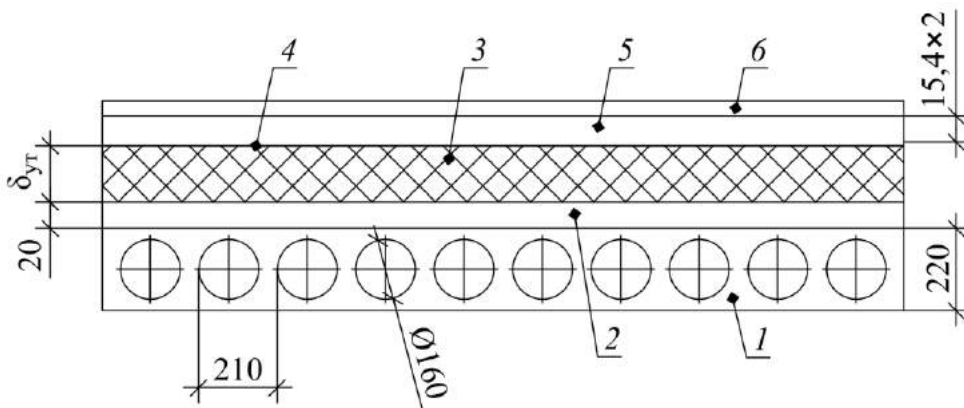


Рис. 7.4. Перекрытие над неотапливаемым подвалом: 1 – железобетонная плита; 2 – цементно-песчаная стяжка; 3 – Теплоизоляция из базальтовой минеральной ваты «Флор» фирмы ISOVER; 4 – полиэтиленовая пленка; 5 – сборная стяжка из гипсоволокнистого влагостойкого листа (ГВЛВ); 6 – напольное покрытие (линолеум)

Таблица 7.6

Расчет  $\delta_{yt}$  и  $R_0^{np}$  чердачного перекрытия

I. Расчет известных элементов конструкции чердачного перекрытия			
Наименование конструктивного слоя	$\delta_s$ , мм	$\lambda_s$ , Вт/м·°C	$R_s$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт
$1/\alpha_B = 1/8,7$	-	-	0,115
Железобетонная плита	По расчету п. 7.2.3		0,150
Пароизоляционный слой (пренебрегаем)	0,2	-	0
Цементно-песчаная стяжка	50	0,930	0,053
Каменная вата «РУФ БАТТС»	- <sup>1</sup>	0,041	- <sup>1</sup>
Пленка ПВХ (пренебрегаем)	0,4	-	0
Асбестоцементные листы, 2 слоя	12	0,520	0,023
$1/\alpha_H = 1/12$	-	-	0,083
Итого:			0,631
II. Расчет приведенного сопротивления конструкции чердачного перекрытия			
Нормируемое приведенное сопротивление теплопередаче $R_0^{норм}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт			3,47
Коэффициент теплотехнической однородности $r$ (по заданию)			0,9
Требуемая толщина утеплителя $\delta_{yt}$ , м, формула (7.19)			0,132
Принимаемая толщина утеплителя $\delta_{yt(ф)}$ , м			<b>0,140</b>
Условное сопротивление теплопередаче $R_0^{усл}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт, формула (7.16)			4,05
Приведенное сопротивление теплопередаче $R_0^{np}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт, формула (7.14)			<b>3,64</b>

Примечание. 1 – требуется определить

Таблица 7.7

Расчет  $\delta_{yt}$  и  $R_0^{np}$  пола 1-го этажа

I. Расчет известных элементов перекрытия над неотапливаемым подвалом			
Наименование конструктивного слоя	$\delta_s$ , мм	$\lambda_s$ , Вт/м·°C	$R_s$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт
$1/\alpha_H = 1/12$	-	-	0,083
Железобетонная плита	По расчету п. 2.3		0,150
Цементно-песчаная стяжка	20	0,93	0,022
Базальтовая минеральная вата «Флор»	- <sup>1</sup>	0,04	- <sup>1</sup>
Пленка ПВХ (пренебрегаем)	0,2	-	0
Гипсоволокнистый лист	30,8	0,36	0,086
Линолеум	2	0,38	0,005
$1/\alpha_H = 1/8,7$	-	-	0,115
Итого:			0,461
II. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче конструкции перекрытия над неотапливаемым подвалом			
Нормируемое приведенное сопротивление теплопередаче $R_0^{норм}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт			3,47
Коэффициент теплотехнической однородности $r$ (по заданию)			0,95
Требуемая толщина утеплителя $\delta_{yt}$ , формула (7.19)			0,127
Принимаемая толщина утеплителя $\delta_{yt(ф)}$ , м			<b>0,130</b>
Условное сопротивление теплопередаче $R_0^{усл}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт, формула (7.16)			3,71
Приведенное сопротивление теплопередаче $R_0^{np}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт, формула (7.14)			<b>3,53</b>

Примечание. 1 – требуется определить

### 7.2.1.3. Входная дверь в подъезд

Минимальное приведенное сопротивление теплопередаче входных дверей определяется как  $0,6 R_o^{\text{норм}}$  наружной стены:

$$R_o^{\text{норм}} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\Delta t^{\text{н}} \alpha_{\text{в}}}, \quad (7.20)$$

где  $t_{\text{н}}$  – температура наружного воздуха наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0,92, °С [21];  $\Delta t^{\text{н}}$  – нормируемый перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности наружного ограждения, °С, принимается по табл. 5 [18].

**Пример 7.** Требуемое приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены составляет

$$R_o^{\text{норм}} = \frac{21 + 31}{4 \cdot 8,7} = 1,49 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

Минимальное нормируемое приведенное сопротивление теплопередаче входной двери равно  $0,6 R_o^{\text{норм}} = 0,6 \cdot 1,49 = 0,894 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$ .

При отсутствии данных о конструкции двери в дальнейших расчетах расчетное приведенное сопротивление теплопередаче входной двери в подъезд приравнивается к нормируемому значению

$$R_o^{\text{пр}} = R_o^{\text{норм}} = 0,894 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

Полученные в примерах 4...7 значения приведенного сопротивления теплопередаче принимаются для расчета фактической величины удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию с последующим определением класса энергосбережения здания.

### 7.2.2. Определение класса энергосбережения здания

Для оценки достигнутой в проекте здания потребности энергии на отопление и вентиляцию установлены следующие классы энергосбережения, приведенные в табл. 7.8, в процентах отклонения расчетной удельной характери-

стики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания (определяемой по формуле (7.7) от нормируемой величины (табл. п. 10.1 [18])).

Проектирование зданий класса D и E не допускается.

Таблица 7.8

Классы энергосбережения жилых и общественных зданий

Обозначение класса	Наименование класса	Величина отклонения расчетного (фактического) значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого, %	Рекомендуемые мероприятия, разрабатываемые субъектами РФ
A++ A+ A	Очень высокий	Ниже –60 От –50 до –60 включительно От –40 до –50 включительно	Экономическое стимулирование
B+ B	Высокий	От –30 до –40 включительно От –15 до –30 включительно	Экономическое стимулирование
C+ C C-	Нормальный	От –5 до –15 включительно От +5 до –5 включительно От +15 до +5 включительно	Мероприятия не разрабатываются
D	Пониженный	От +15,1 до +50 включительно	Реконструкция при соответствующем экономическом обосновании
E	Низкий	Более +50	Реконструкция при соответствующем экономическом обосновании или снос

**Пример 8.** Рассчитываем фактическое значение удельной теплозащитной характеристики здания по формуле (7.13)

$$k_{об}^{тр} = \frac{1}{7240} \left( \frac{261,4}{3,64} + \frac{261,4}{3,53} + \frac{1696,9}{2,56} + \frac{345,3}{0,54} \right) = 0,20 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}).$$

Определяем по формуле (7.7) фактическое значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания

$$q_{от}^p = [0,2 + 0,184 - (0,0639 + 0,0468)0,81 \cdot 1](1 - 0,1) 1,11 = 0,294 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С}).$$

Величина отклонения расчетного (фактического) значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого составляет

$$\frac{0,294 - 0,319}{0,319} 100 = -7,84 \text{ \%}.$$

По данным табл. 7.8 принимаем класс энергосбережения рассматриваемого многоквартирного жилого дома равным «С+».

### 7.2.3. Пример определения приведенного сопротивления теплопередаче пустотной железобетонной плиты

Расчет приведенного термического сопротивления пустотной панели перекрытия представлен для двух случаев: чердачного перекрытия и перекрытия над неотапливаемым подвалом. Плита выполнена из железобетона с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_b = 2,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ . Поперечное сечение плиты с размерами и расчетная схема сечения приведены на рис. 7.5.

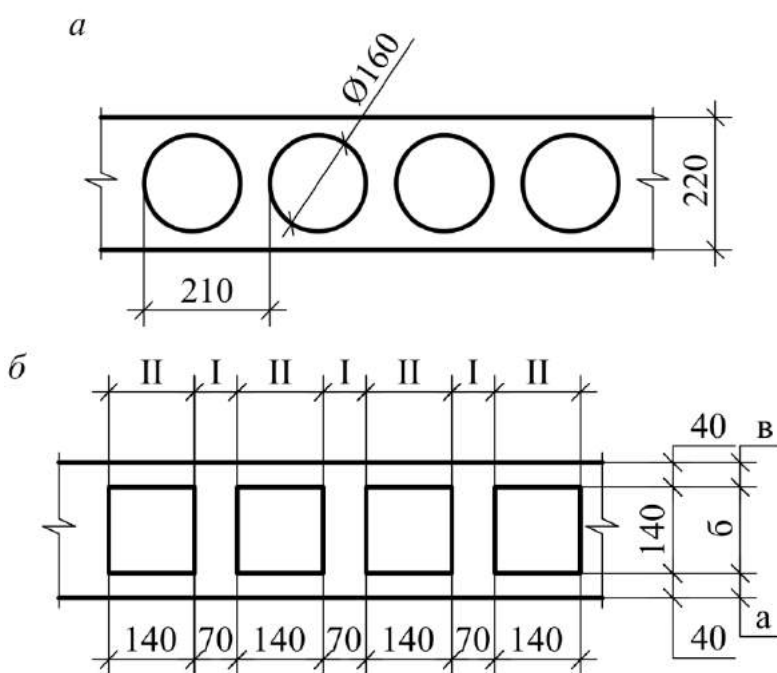


Рис. 7.5. Поперечное сечение плиты (а) и расчетная схема (б)

Для простоты расчета принимаем схему сечения плиты с квадратными отверстиями в плите вместо круглых. Так, сторона эквивалентного по площади квадрата ( $A_{\text{квадр}} = A_{\text{круга}}$ ):

$$a = \sqrt{\frac{\pi d^2}{4}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 0,16^2}{4}} = 0,14 \text{ м.}$$

Выделяем регулярный элемент и делим его плоскостями, параллельными тепловому потоку. Получаем два параллельных участка. Участок I – однородный, участок II – многослойный, состоящий из двух одинаковых по толщине слоев «а» и «в», а также горизонтальной воздушной прослойки. Определим сопротивление теплопередаче этих участков  $R_I$  и  $R_{II}$ :

$$R_I = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{0,22}{2,04} = 0,108 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (7.21)$$

$$R_{II} = R_a + R_{\text{в.п.}} + R_b = 2R_a + R_{\text{в.п.}} = \frac{2\delta_a}{\lambda_a} + R_{\text{в.п.}} = \frac{2 \cdot 0,04}{2,04} + R_{\text{в.п.}} = 0,04 + R_{\text{в.п.}}. \quad (7.22)$$

Для панели чердачного перекрытия горизонтальная воздушная прослойка с потоком теплоты снизу вверх отделена от холодного чердака слоем утеплителя, поэтому в ней воздух находится при положительной температуре. Для прослойки толщиной 0,14 м в этих условиях  $R_{\text{в.п.}} = 0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ . Следовательно,  $R_{II} = 0,15 + 0,04 = 0,19 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ . Для панели перекрытия над неотапливаемым подвалом с утеплителем, лежащим над железобетонной плитой, горизонтальная воздушная прослойка от холодного техподполья не отделена слоем утеплителя, поэтому в ней воздух находится при отрицательной температуре. Для прослойки толщиной 0,14 м в этих условиях при потоке теплоты сверху вниз  $R_{\text{в.п.}} = 0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ . Следовательно,  $R_{II} = 0,15 + 0,04 = 0,19 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

Сопротивление теплопередаче всего регулярного элемента при разбивке его плоскостями, параллельными тепловому потоку,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ , равно

$$R_{\text{а.т}} = \sum_{i=1}^m A_i / \sum_{i=1}^m (A_i / R_i), \quad (7.23)$$

где  $A_i$  – площадь  $i$ -го участка части ограждения,  $\text{м}^2$ ;  $R_i$  – приведенное сопротивление теплопередаче  $i$ -го участка,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;  $m$  – число участков ограждающей конструкции с различным приведенным сопротивлением теплопередаче.

Для чердачного перекрытия и пола 1-го этажа

$$R_{a.т} = \frac{0,07 + 0,14}{\frac{0,07}{0,108} + \frac{0,14}{0,19}} = 0,152 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Делим регулярный элемент плоскостями, перпендикулярными тепловому потоку, и получаем три параллельных участка. Участки «а» и «в» – однородные, участок «б» – неоднородный, состоящий из горизонтальной воздушной прослойки и слоя железобетона шириной  $I = 0,07$  м и толщиной  $b = 0,14$  м ( $R_{ж/б} = 0,14/2,04 = 0,069 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ).

Определяем сопротивление теплопередаче этих участков

$$R_a = R_b = \frac{\delta_a}{\lambda_a} = \frac{0,04}{2,04} = 0,02 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}. \quad (7.24)$$

Для чердачного перекрытия и пола 1-го этажа

$$R_b = \frac{0,07 + 0,14}{\frac{0,07}{0,069} + \frac{0,14}{0,15}} = 0,108 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}. \quad (7.25)$$

Сопротивление теплопередаче всего регулярного элемента  $R_{в.т}$ ,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , при разбивке его плоскостями, перпендикулярными тепловому потоку, определяем по формуле

$$R_{в.т} = 2R_a + R_b = 2 \cdot 0,02 + R_b. \quad (7.26)$$

Для чердачного перекрытия и пола 1-го этажа

$$R_{в.т} = 2 \cdot 0,02 + 0,108 = 0,148 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Приведенное сопротивление теплопередаче плиты, определяется по формуле,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$

$$R_{т} = \frac{R_{a.т} + 2R_{в.т}}{3}. \quad (7.27)$$



Для чердачного перекрытия и пола 1-го этажа

$$R_T = \frac{0,152 + 2 \cdot 0,148}{3} = 0,150 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

### 7.3. Расчет теплового, воздушного и влажностного режима наружных ограждающих конструкций здания

#### 7.3.1. Расчет распределения температуры по сечению наружного ограждения

Температура в характерных сечениях наружных ограждений определяется по формуле, °С

$$t_{i+1} = t_i - \frac{R_s}{R_o^{усл}} (t_B - t_H), \quad (7.28)$$

где  $t_i$  – температура на внутренней поверхности  $i$ -го слоя, °С;  $t_{i+1}$  – температура на наружной поверхности  $i$ -го слоя (на внутренней поверхности последующего слоя ограждения).

**Пример 9.** Температуры на внутренней поверхности слоев стены определяются следующим образом

$$\text{штукатурка цементно-песчаная} - t_1 = 21 - \frac{0,115}{4,328} \cdot 52 = 19,62 \text{ °С};$$

$$\text{газобетонные блоки} - t_2 = 19,62 - \frac{0,021}{4,328} \cdot 52 = 19,37 \text{ °С};$$

$$\text{тепловая изоляция} - t_3 = 19,37 - \frac{0,962}{4,328} \cdot 52 = 7,81 \text{ °С};$$

$$\text{кладка из керамического кирпича} - t_4 = 7,81 - \frac{3,0}{4,328} \cdot 52 = -28,24 \text{ °С.}$$

Температура на наружной поверхности стены

$$t_5 = -28,24 - \frac{0,187}{4,328} \cdot 52 = -30,48 \text{ °С.}$$

Проверка правильности расчета

$$t_6 = -30,48 - \frac{0,043}{4,328} \cdot 52 = -31 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Полученное значение соответствует расчетной температуре наружного воздуха. Расчет распределения температуры по сечению наружных ограждений, рассмотренных в п. 7.2, приведен на рис. 7.6.

### 7.3.2. Определение воздухопроницаемости наружной стены

Сопrotивление воздухопроницанию ограждающих конструкций  $R_u$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$ , должно быть не менее нормируемого сопротивления воздухопроницанию  $R_u^{\text{TP}}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$ , определяемого по формуле

$$R_u^{\text{TP}} = \Delta p / G_n, \quad (7.29)$$

где  $\Delta p$  – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, Па;  $G_n$  – нормируемая поперечная воздухопроницаемость ограждающих конструкций,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций  $\Delta p$ , Па, определяется по формуле

$$\Delta p = 0,55H(\gamma_n - \gamma_v) + 0,03\gamma_n v^2, \quad (7.30)$$

где  $H$  – высота здания (от уровня пола первого этажа до верха вытяжной шахты);  $\gamma_n$ ,  $\gamma_v$  – удельный вес соответственно наружного и внутреннего воздуха,  $\text{Н}/\text{м}^3$ ;  $v$  – максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, повторяемость которых составляет 16 % и более, м/с, согласно [15].

Расчетное сопротивление воздухопроницанию  $R_u$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$ , многослойной ограждающей конструкции следует рассчитывать по формуле

$$R_u = R_{u1} + R_{u2} + \dots + R_{uin}, \quad (7.31)$$

где  $R_{u1}$ ,  $R_{u2}$ , ...  $R_{uin}$  – сопротивления воздухопроницанию отдельных слоев ограждающей конструкции,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$ .

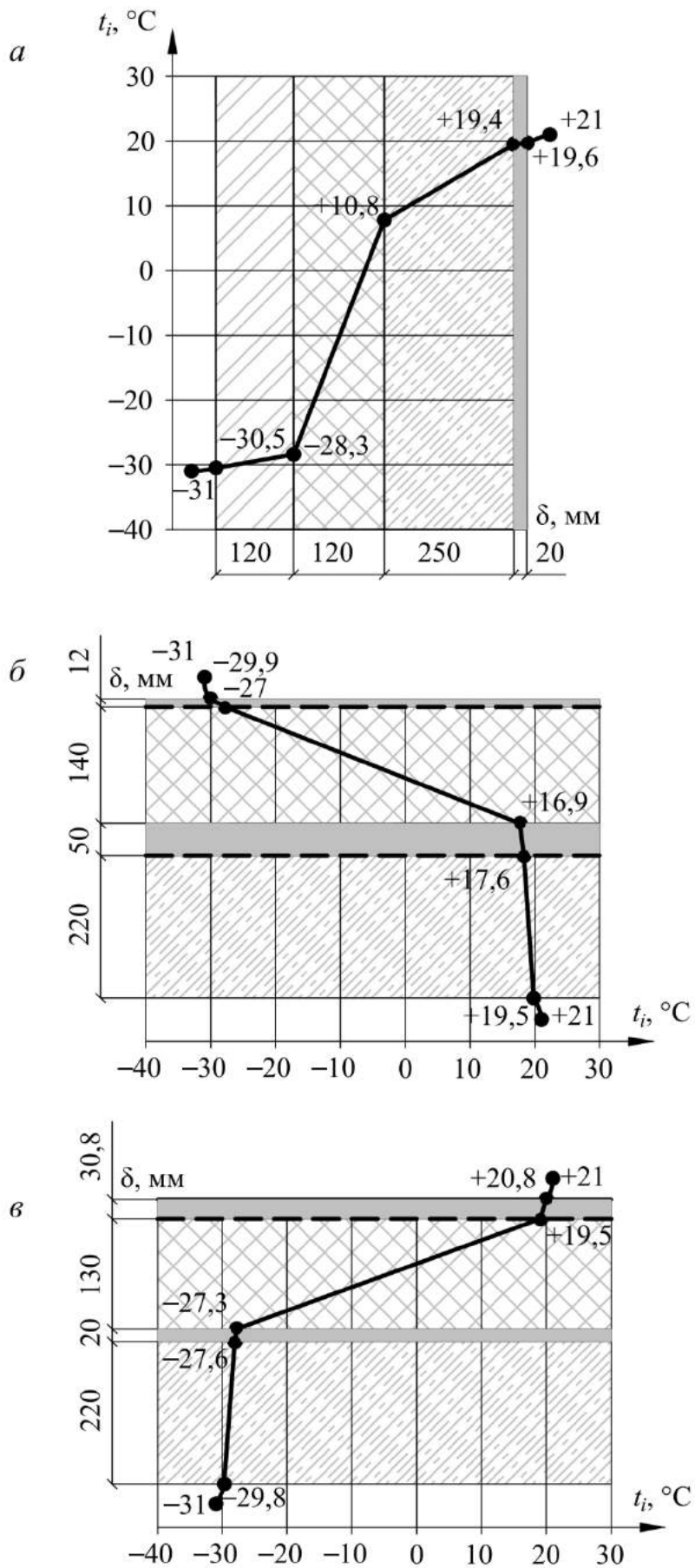


Рис. 7.6. Распределение температуры по сечению ограждения: а – наружная стена; б – чердачное перекрытие; в – перекрытие над неотапливаемым подвалом

**Пример 10.** Проведем расчет для стены, рассматриваемой в п. 7.2.

Разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций  $\Delta p$ , Па, составляет

$$\Delta p = 0,55 \cdot 31 \cdot (14,3 - 11,8) + 0,03 \cdot 14,3 \cdot 5,1^2 = 53,8 \text{ Па} .$$

Нормируемое сопротивление воздухопроницанию наружной стены  $R_u^{\text{тп}}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$ , составляет

$$R_u^{\text{тп}} = 53,8/0,5 \approx 107,6 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг} .$$

Фактическое сопротивление воздухопроницанию  $R_u$  наружной стены

$$R_u = (373 \cdot 20/15) + (21 \cdot 250/140) + (2 \cdot 120/50) + 1 = 540,6 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг};$$

$R_u = 540,6 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг} > R_u^{\text{тп}} = 107,6 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$  – нормативное требование к воздухопроницаемости наружного ограждения выполняется.

### 7.3.3. Расчет защиты наружной стены от переувлажнения

Защита от переувлажнения ограждающих конструкций должна обеспечиваться путем проектирования ограждающих конструкций с сопротивлением паропроницанию внутренних слоев не менее требуемого значения, определяемого расчетом одномерного влагопереноса (осуществляемому по механизму паропроницаемости). Сопротивление паропроницанию  $R_{\text{п}}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$ , ограждающей конструкции должно быть не менее наибольшего из значений:

а) требуемого сопротивления паропроницанию  $R_{\text{п1}}^{\text{тп}}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$  (из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации), определяемого по формуле:

$$R_{\text{п1}}^{\text{тп}} = \frac{(e_{\text{в}} - E)R_{\text{п.н.}}}{E - e_{\text{н}}}, \quad (7.32)$$

б) требуемого сопротивления паропроницанию  $R_{\text{п2}}^{\text{тп}}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$  (из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха):

$$R_{\text{п2}}^{\text{тп}} = \frac{0,0024z_0(e_{\text{в}} - E_0)}{\rho_w \delta_w \Delta w + \eta}, \quad (7.33)$$

где  $e_B$  – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетных температуре и относительной влажности воздуха в помещении

$$e_B = \left( \frac{\varphi_B}{100} \right) E_B, \quad (7.34)$$

где  $E_B$  – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре внутреннего воздуха помещения  $t_B$ ;  $\varphi_B$  – относительная влажность внутреннего воздуха, 60 %;  $R_{п.н}$  – сопротивление паропроницанию,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$ , части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и плоскостью максимального увлажнения;  $e_n$

– среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период, Па;  $z_0$  – продолжительность периода влагонакопления, сут, принимаемая равной периоду с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха;  $E_0$  – парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения, Па, определяемое при средней температуре наружного воздуха периода влагонакопления  $z_0$ ;  $\rho_w$  – плотность материала увлажняемого слоя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta_w$  – толщина увлажняемого слоя ограждающей конструкции, м, принимаемая равной  $2/3$  толщины однородной (однослойной) стены или толщине слоя многослойной ограждающей конструкции, в котором располагается плоскость максимального увлажнения;  $\Delta w$  – предельно допустимое приращение влажности в материале увлажняемого слоя, % по массе, за период влагонакопления  $z_0$ , принимается по табл. 10 [18].

В том случае, если плоскость максимального увлажнения приходится на стык между двумя слоями,  $\delta_w \Delta w$  в формуле (7.32) принимается равной сумме  $\delta_{w1} \Delta w_1 + \delta_{w2} \Delta w_2$ , где  $\delta_{w1}$  и  $\delta_{w2}$  – половины толщин стыкующихся слоев;

Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения за годовой период эксплуатации  $E$ , Па, составляет

$$E = (E_1 z_1 + E_2 z_2 + E_3 z_3) / 12, \quad (7.35)$$

где  $E_1, E_2, E_3$  – парциальные давления насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов, Па, определяемые по температуре в плоскости максимального увлажнения при средней температуре наружного воздуха соответствующего периода;  $z_1, z_2, z_3$  – продолжительность зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов года, мес., определяемая с учетом следующих условий: к зимнему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха ниже минус 5 °С; к весенне-осеннему периоду – со средними температурами наружного воздуха от минус 5 до 5 °С; к летнему периоду – со средними температурами воздуха выше 5 °С.

Коэффициент  $\eta$ , определяемый по формуле:

$$\eta = \frac{0,0024(E_0 - e_{н,отр})z_0}{R_{п,н}}, \quad (7.36)$$

где  $e_{н,отр}$  – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, Па.

При определении парциального давления  $E_3$  для летнего периода температуру в плоскости максимального увлажнения во всех случаях следует принимать не ниже средней температуры наружного воздуха летнего периода, парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха  $e_в$  – не ниже среднему парциального давления водяного пара наружного воздуха за этот период.

Плоскость максимального увлажнения определяется для периода с отрицательными среднемесячными температурами следующим образом.

1. Для каждого слоя многослойной ограждающей конструкции вычисляется значение комплекса  $f_i(t_{м.у})$ , характеризующего температуру в плоскости максимального увлажнения:

$$f_i(t_{м.у}) = 5330 \frac{R_{п.о} (t_в - t_{н.отр}) \mu_i}{R_0^{усл} (e_в - e_{н.отр}) \lambda_i}, \quad (7.37)$$

где  $R_{п.о}$  – общее сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции,  $(м^2 \cdot ч \cdot Па)/мг$ ;  $R_0^{усл}$  – условное сопротивление теплопередаче однородной много-

слоистой ограждающей конструкции,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$ ;  $t_{\text{н.отр}}$  – средняя температура наружного воздуха для периода с отрицательными среднемесячными температурами,  $^\circ\text{С}$ ;  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$  – расчетные коэффициенты теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ , и паропроницаемости,  $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ , материала соответствующего слоя.

2. По полученным значениям комплекса  $f_i(t_{\text{м.у}})$  по табл. 11 [18] определяются значения температур в плоскости максимального увлажнения  $t_{\text{м.у}}$  для каждого слоя многослойной конструкции.

3. Составляется таблица, содержащая: номер слоя,  $t_{\text{м.у}}$  для этого слоя, температуры на границах слоя, полученные расчетом по формуле (7.38) (при средней температуре наружного воздуха периода с отрицательными среднемесячными температурами).

4. Для определения слоя, в котором находится плоскость максимального увлажнения, производится сравнение полученных значений  $t_{\text{м.у}}$  с температурами на границах слоев конструкции. Если температура  $t_{\text{м.у}}$  в каком-то из слоев расположена в интервале температур на границах этого слоя, то делается вывод о наличии в данном слое плоскости максимального увлажнения и определяется координата плоскости  $x_{\text{м.у}}$  (в предположении линейного распределения температуры внутри слоя).

5. Если в каждом из двух соседних слоев конструкции отсутствует плоскость с температурой  $t_{\text{м.у}}$ , при этом у более холодного слоя  $t_{\text{м.у}}$  выше его температуры, а у более теплого слоя  $t_{\text{м.у}}$  ниже его температуры, то плоскость максимального увлажнения находится на границе этих слоев.

Если внутри конструкции плоскость максимального увлажнения отсутствует, то она расположена на наружной поверхности конструкции.

Если при расчете обнаружилось две плоскости с  $t_{\text{м.у}}$  в конструкции, то за плоскость максимального увлажнения принимается плоскость, расположенная в слое утеплителя. Для многослойных ограждающих конструкций с выраженным теплоизоляционным слоем (сопротивление теплоизоляционного слоя больше  $2/3 R_0^{\text{усл}}$ ) и наружным защитным слоем, коэффициент паропроницаемости материала которого меньше, чем у материала теплоизоляционного слоя,

допускается принимать плоскость максимального увлажнения на наружной границе утеплителя при условии выполнения неравенства

$$\frac{\mu_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} > 2, \quad (7.38)$$

где  $\lambda_{\text{ут}}$ ,  $\mu_{\text{ут}}$  – расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), и паропроницаемости, мг/м·ч·Па, материала теплоизоляционного слоя.

Парциальное давление насыщенного водяного пара  $E$ , Па, при температуре  $t$ , °С от минус 40 до плюс 45 °С. определяется по формуле

$$E = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + t}\right). \quad (7.39)$$

Сопротивление паропроницанию  $R_{\text{пи}}$ , м<sup>2</sup>·ч·Па/мг, однослойной или отдельного слоя многослойной ограждающей конструкции составляет

$$R_{\text{пи}} = \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (7.40)$$

где  $\delta_i$  – толщина слоя ограждающей конструкции, м;  $\mu_i$  – расчетный коэффициент паропроницаемости слоя ограждающей конструкции, мг/(м·ч·Па).

Сопротивление паропроницанию  $R_{\text{п.о}}$ , (м<sup>2</sup>·ч·Па)/мг, многослойной ограждающей конструкции (или ее части) равно сумме сопротивлений паропроницанию составляющих ее слоев:

$$R_{\text{п.о}} = \sum R_{\text{пи}}, \quad (7.41)$$

Для обеспечения требуемого сопротивления паропроницанию  $R_{\text{п}}^{\text{тр}}$  ограждающей конструкции следует определять сопротивление паропроницанию  $R_{\text{п}}$  конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения. Температуру  $t$ , °С, ограждающей конструкции в плоскости, отстоящей от внутренней поверхности, определяем по формуле (7.28).

**Пример 11.** Проведем расчет для стены, рассматриваемой в п. 7.2.

Общее сопротивление паропроницанию наружной стены  $R_{\text{п.о}}$  составляет

$$R_{\text{п.о}} = \frac{0,12}{0,14} + \frac{0,12}{0,3} + \frac{0,25}{0,17} + \frac{0,02}{0,09} = 2,95 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.$$



Определим среднюю температуру для периода с отрицательными среднемесячными температурами:

$$t_{н,отр} = (-11,8 - 11,1 - 5 - 2,8 - 8,9) / 5 = -7,92 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Парциальное давление насыщенного водяного пара составляет

$$E = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + 21}\right) = 2463 \text{ Па}.$$

Парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха составляет

$$e_{в} = \left(\frac{60}{100}\right) 2463 \approx 1478 \text{ Па}.$$

Определим среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха для периода с отрицательными среднемесячными температурами

$$e_{н,отр} = (250 + 250 + 360 + 450 + 320) / 5 = 326 \text{ Па}.$$

Для слоя ограждающей конструкции комплекс  $f_i(t_{м.у})$  равен:

$$\text{керамического кирпича: } f_i(t_{м.у}) = 5330 \cdot \frac{2,95 \cdot (21 + 7,92)}{4,328 \cdot (1478 - 326)} \cdot \frac{0,14}{0,64} = 20;$$

$$\text{тепловой изоляции: } f_i(t_{м.у}) = 5330 \cdot \frac{2,95 \cdot (21 + 7,92)}{4,328 \cdot (1478 - 326)} \cdot \frac{0,3}{0,04} = 684;$$

$$\text{газобетонных блоков: } f_i(t_{м.у}) = 5330 \cdot \frac{2,95 \cdot (21 + 7,92)}{4,328 \cdot (1478 - 326)} \cdot \frac{0,17}{0,26} = 59,6;$$

$$\text{штукатурки ц/п: } f_i(t_{м.у}) = 5330 \cdot \frac{2,95 \cdot (21 + 7,92)}{4,328 \cdot (1478 - 326)} \cdot \frac{0,09}{0,93} = 8,8.$$

Определяем температуры на границах слоев, при  $t_{н} = t_{н,отр}$ . Результат расчета заносится в табл. 7.9.

Таблица 7.9

Определение плоскости максимального увлажнения для периода с отрицательными среднемесячными температурами

Наименование слоя	$t_{нар}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{вн}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{м.у}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Нахождение плоскости максимального увлажнения	
Кладка из керамического кирпича	-7,6	-6,4	↑20	20 > -6,4	На границе слоев (см. п. 4, с. 118)
Утеплитель «КАВИТИ-БАТТС»	-6,4	13,7	-24,3	-24,3 < -6,5	
Газобетонные блоки	13,7	20,1	11,4	Нет	
Штукатурка цементно-песчаная	20,1	20,2	↑21	Нет	

Условия нахождения плоскости максимального увлажнения на границе слоев:

$R_{\text{ут}} / R_0^{\text{усл}} = 3/4,328 = 0,693 > 2/3$  – условие выполняется;

$$\frac{\mu_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} = \frac{0,3}{0,04} = 7,5 > 2 \text{ – условие выполняется.}$$

Сопротивление паропрооницанию ограждения от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения составляет

$$R_{\text{п.н}} = \frac{0,12}{0,3} + \frac{0,25}{0,17} + \frac{0,02}{0,09} = 2,092 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.$$

Продолжительность периода влагонакопления  $z_0 = 151$  сут. (5 мес.) Парциальное давление  $E_0$  насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения (табл. 7.9) составляет

$$E_0 = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 - 6,4}\right) = 382,1 \text{ Па}.$$

Коэффициент  $\eta$  равен:

$$\eta = \frac{0,0024(382,1 - 326)151}{2,092} = 9,72.$$

Зимний период эксплуатации:

– продолжительность периода:  $z_1 = 3$  мес;

– средняя температура периода:  $t_{\text{н.1}} = (-11,8 - 11,1 - 8,9)/3 = -10,6$  °С;

– температура в плоскости максимального увлажнения

$$t_{\text{гр.1}} = 21 - \frac{(0,115 + 0,021 + 0,962 + 3)}{4,328} (21 + 10,6) = -8,92 \text{ °С};$$

– парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения

$$E_1 = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 - 8,92}\right) = 315 \text{ Па}.$$

Весенне-осенний период эксплуатации:

– продолжительность периода:  $z_2 = 4$  мес;

– средняя температура периода:  $t_{\text{н.2}} = (-5 + 4,2 - 2,8 + 3,6)/4 = 0$  °С;

– температура в плоскости максимального увлажнения

$$t_{гр.2} = 21 - \frac{(0,115 + 0,021 + 0,962 + 3)}{4,328} (21 - 0) = 1,12 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения

$$E_2 = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + 1,12}\right) = 661 \text{ Па.}$$

Летний период эксплуатации:

– продолжительность периода:  $z_3 = 5$  мес;

– средняя температура периода:  $t_{н.3} = (12,0 + 16,4 + 18,4 + 16,9 + 11)/5 = 14,9 \text{ } ^\circ\text{C};$

– температура в плоскости максимального увлажнения

$$t_{гр.3} = 22 - \frac{(0,115 + 0,021 + 0,962 + 3)}{4,328} (22 - 14,9) = 15,22 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения

$$E_3 = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + 15,22}\right) = 1712 \text{ Па.}$$

Парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения за годовой период эксплуатации составляет

$$E = (315 \cdot 3 + 661 \cdot 4 + 1712 \cdot 5) / 12 = 1013 \text{ Па.}$$

Требуемое сопротивление паропрооницанию  $R_{п1}^{тр}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$  (из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации), составляет

$$R_{п1}^{тр} = \frac{(1478 - 1013)2,092}{1013 - 730} = 3,43 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг.}$$

Требуемое сопротивление паропрооницанию  $R_{п2}^{тр}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$  (из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха) составляет

$$R_{п2}^{тр} = \frac{0,0024 \cdot 151(1478 - 382,1)}{(0,06 \cdot 1,5 + 0,06 \cdot 3) \cdot 45 + 9,72} = 18,2 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг.}$$

Фактическое сопротивление паропроницанию  $R_{п.н} = 2,092 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг} < 3,43 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$  и  $R_{п.н} = 2,092 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг} < 18,2 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$ . Требуется устройство гидроизоляционного слоя. В качестве пароизоляции принимаем пароизоляционную мембрану с сопротивлением паропроницанию  $R_{п.и} = 7 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ .

Определяем температуру на границе слоев ограждения  $t_i, ^\circ\text{C}$ , по формуле (7.27), по полученной температуре определяем парциальное давление насыщенного водяного пара  $E_i, \text{Па}$ , и парциальное давление пара на границе каждого слоя по формуле:

$$e_{i+1} = e_i - \frac{R_{п.с.} (e_{в} - e_{н})}{R_{п.о.}}, \quad (7.42)$$

где  $e_{н}$  – среднее парциальное давление пара наружного воздуха наиболее холодного месяца, 250 Па;  $t_{н}$  – температура наиболее холодного месяца,  $-11,8 ^\circ\text{C}$ .

Результаты расчета приведены на рис. 7.7.

Как видно из рис. 7.7 устройство пароизоляционной мембраны все равно не исключает образования влаги в строительной конструкции на границе «облицовка – утеплитель», что свидетельствует:

- о потребности в дополнительной пароизоляции;
- замене облицовочного слоя из кирпича на другую конструкцию;
- устройстве воздушной прослойки между облицовкой и теплоизоляцией.

#### 7.3.4. Оценка теплоусвоения поверхности пола

Поверхность пола жилых и общественных зданий должна иметь расчетный показатель теплоусвоения  $Y_{пол}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , не более нормируемой величины  $Y_{пол}^{тр} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Расчетная величина показателя теплоусвоения поверхности пола  $Y_{пол}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , определяется следующим образом:

- если покрытие пола (первый слой конструкции пола) имеет тепловую инерцию  $D_1 = R_1 s_1 \geq 0,5$ , то показатель теплоусвоения поверхности пола равен

$$Y_{пол} = 2s_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}); \quad (7.43)$$

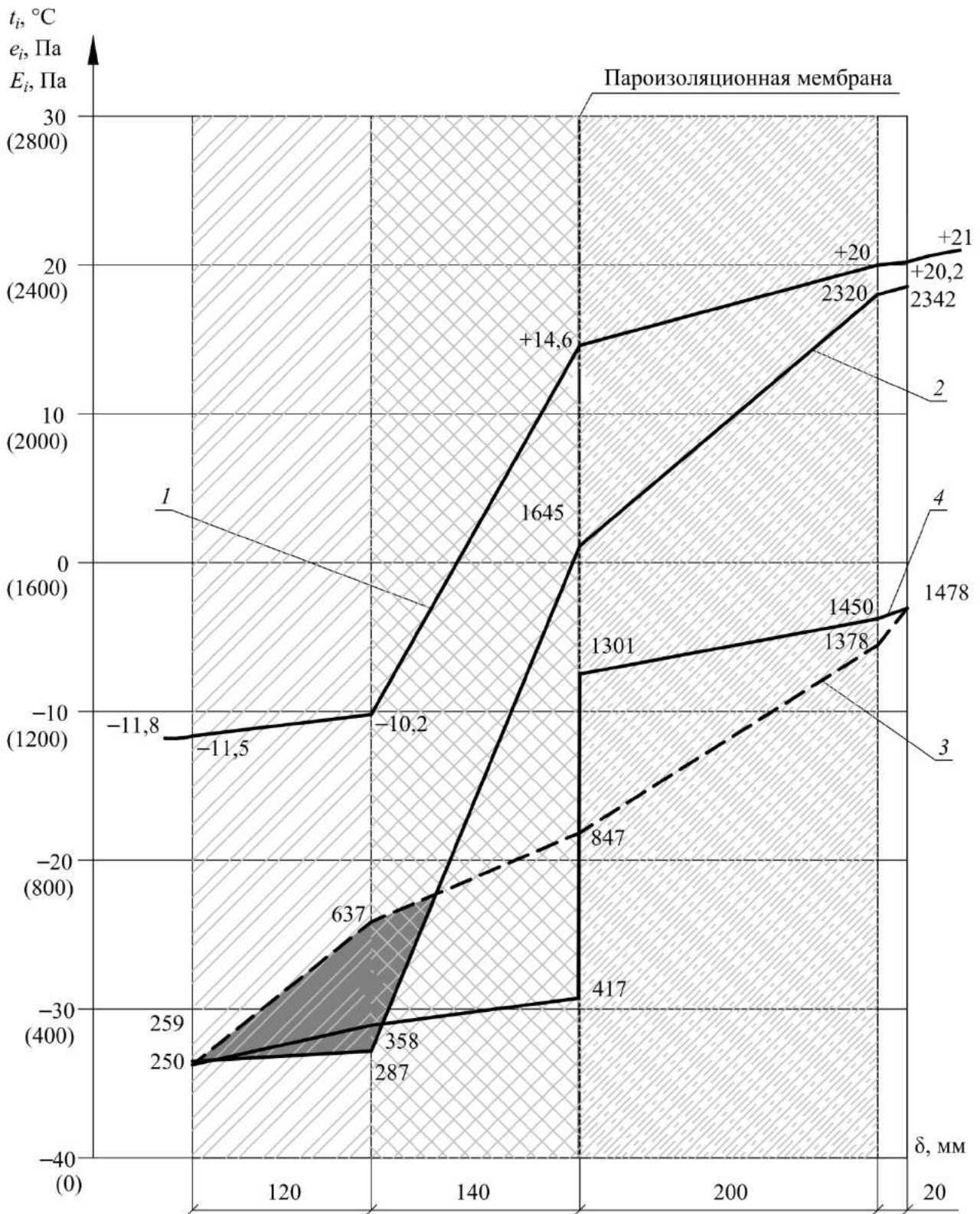


Рис. 7.7. Схема определения положения в ограждении плоскости максимального увлажнения: 1 – температуру на границе слоев ограждения  $t_i$ , °C; 2 – парциальное давление насыщенного водяного пара  $E_i$ , Па; 3 – парциальное давление пара на границе каждого слоя  $e_n$ , Па, без пароизоляционной мембраны; 4 – то же с пароизоляционной мембраной

– если первые  $n$  слоев конструкции пола ( $n \geq 1$ ) имеют суммарную тепловую инерцию  $D_1 + D_2 + \dots + D_n < 0,5$ , но тепловая инерция  $(n + 1)$  слоев  $D_1 + D_2 + \dots + D_{n+1} \geq 0,5$ , то показатель теплоусвоения поверхности пола  $Y_{\text{пол}}$  следует определить последовательно расчетом показателей теплоусвоения поверхностей слоев конструкции начиная с  $n$ -го до 1-го:

– для  $n$ -го слоя

$$Y_n = (2R_n s_n^2 + s_{n+1}) / (0,5 + R_n s_{n+1}); \quad (7.44)$$

– для  $i$ -го слоя ( $i = n - 1; n - 2; \dots; 1$ )

$$Y_i = (4R_i s_i^2 + Y_{i+1}) / (1 + R_i s_{i+1}). \quad (7.45)$$

Показатель теплоусвоения поверхности пола  $Y_{\text{пол}}$  принимается равным показателю теплоусвоения поверхности первого слоя  $Y_1$ .

В формулах (7.42)...(7.44):

$D_1 + D_2 + \dots + D_{n+1}$  – тепловая инерция соответственно 1, 2,  $(n + 1)$  слоев конструкции пола, определяемая по формулам

$$D_1 = R_1 s_1; D_2 = R_2 s_2; \dots; D_n = R_n s_n; \quad (7.46)$$

$R_1, R_2, \dots, R_n$  – термические сопротивления,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , соответственно 1, 2, ...,  $n$  слоев конструкции пола, определяемые по формулам

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}; R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \dots; R_n = \frac{\delta_n}{\lambda_n}; \quad (7.47)$$

$s_1, s_i, s_n, s_{n+1}$  – расчетные коэффициенты теплоусвоения материала соответственно 1, 2, ...,  $n, (n + 1)$  слоев конструкции пола,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  [9];

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  – толщины соответственно 1, 2, ...,  $n$  слоев конструкции пола, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – расчетные теплопроводности материала соответственно 1, 2, ...,  $n$  слоев конструкции пола,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ .

**Пример 12.** Проведем расчет для представленного в п. 7.2 перекрытия над неотапливаемым подвалом, основные теплотехнические характеристики которого приведены в табл. 7.10.

Показатель теплоусвоения верхнего слоя пола перекрытия составляет

$$Y_{\text{пол}} = (2 \cdot 0,005 \cdot 8,56^2 + 5,48) / (0,5 + 0,005 \cdot 5,48) = 11,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}).$$

Таблица 7.10

№ п/п	Наименование слоя	$\delta_i$ , мм	$\lambda_i$ , Вт/м·°С	$R_i$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	$s_i$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$D$	$\Sigma D$
1	Линолеум	2	0,38	0,005	8,56	0,043	0,043
2	Гипсоволокнистый лист	30,8	0,36	0,086	5,48	0,471	0,514
3	Пленка ПВХ	0,2	0,3	0,001	6,2 <sup>1</sup>	0,006	-
4	Минеральная вата «Флор»	130	0,04	3,25	0,59	1,918	-
5	Цементно-песчаная стяжка	20	0,93	0,022	11,09	0,244	-
6	Железобетонная плита	220	-	0,150	18,95	2,843	-

Примечание. 1 – по примечанию прил. Т. СП [18].

Из расчета видно, что  $Y_{\text{пол}} = 11,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}) < Y_{\text{пол}}^{\text{тп}} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . Конструкция перекрытия над неотапливаемым подвалом удовлетворяет требованиям к теплоусвоению поверхности пола.

### 7.3.5. Построение кривых изменения температуры по сечению наружной стены во времени после выключения системы отопления помещений в холодный период

Конденсация водяных паров из воздуха помещения на внутренних поверхностях наружных ограждений может наблюдаться в случае отключения системы отопления. Для определения минимального интервала времени до начала процесса конденсации после отключения системы отопления рассматривается тепловой режим наружного ограждения в этот период при расчетных зимних условиях.

Для построения кривых изменения температуры по сечению наружной стены во времени методом конечных разностей ограждение разбивают на элементарные слои. Толщину элементарных слоев  $\Delta x$ , мм, и продолжительность расчетных интервалов  $\Delta z$ , ч, выбирают так, чтобы удовлетворялось условие

$$CR = 2\Delta z, \quad (7.48)$$

где  $R$  – термическое сопротивление элементарного слоя, м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $C$  – тепло-

емкость 1 м<sup>2</sup> элементарного слоя ограждения, кДж/(м<sup>2</sup>·°С), определяемая по следующей зависимости [2]:

$$C = c\gamma\Delta x, \quad (7.49)$$

где  $c\gamma$  – объемная теплоемкость конструктивного материала слоя (газобетонные блоки на цементном вяжущем), кДж/м<sup>3</sup>·°С.

Толщина элементарного слоя может быть выражена из формул (7.48), (7.49) и составляет  $\Delta x = R_0^{\text{вкл}} \lambda_{\text{к}}/n$ , где  $n$  – число слоев, принимаемое не менее 5.

Построение кривых распределения температуры по сечению стены проводится относительно оси условного (нулевого) слоя.

Для построения линий распределения температуры от внутренней поверхности первого элементарного слоя откладывается половина его толщины и находится ось нулевого слоя. Затем проводят нумерацию осей (центров) элементарных слоев (от 0 до 6). Из точки нулевого интервала на первой оси наносится горизонтальная прямая и получается точка нулевого интервала времени на нулевой оси (точка  $O_1$ ).

С целью получения точки первого интервала времени на первой оси соединяют точки нулевого интервала времени на нулевой и второй осях. В последующем соединяя прямыми линиями точки температур на осях попарно через слой по пересечению этих линий с осями средних слоев определяется температура в слоях в начале следующего интервала времени.

Определив теплоемкость 1 м<sup>2</sup> элементарного слоя ограждения вычисляют продолжительность расчетных интервалов  $\Delta z$ , которая может быть выражена из формулы (7.48). Промежуток времени, через который начнется конденсация водяного пара на внутренней поверхности  $\Delta z_0$ , ч, определяется графически по пропорции  $\Delta z/\Delta z_0$  и отношения длин отрезков ограниченных начальной комфортной температурой внутреннего воздуха  $t_{\text{в}} = 21$  °С и температурами соответствующими точке  $O_1$  и точке росы.

**Пример 13.** За эквивалентную теплопроводность принимаем теплопроводность конструктивного слоя  $\lambda = \lambda_{\text{к}} = 0,26$  Вт/м·°С.



Толщина элементарного слоя (принимая 6 слоев) составила

$$\Delta x = R_0^{ysl} \lambda_k / 6 = 4,328 \cdot 0,26 / 6 = 0,188 \text{ м.}$$

Сопротивление теплопередаче элементарного слоя составило

$$R = \Delta x / \lambda_k = 0,188 / 0,26 = 0,723 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт.}$$

Теплоемкость 1 м<sup>2</sup> элементарного слоя ограждения составила

$$C = 0,84 \cdot 600 \cdot 0,188 = 94,8 \text{ кДж} / \text{м}^2 \cdot \text{°C.}$$

Определяем продолжительность расчетных интервалов

$$\Delta z = 94,8 \cdot 0,723 / 2 = 34,3 \text{ ч.}$$

Температура точки росы  $t_p$  при  $t_b = 21 \text{ °C}$  и  $\phi_b = 60 \%$  равна  $12,9 \text{ °C}$ .

Результаты построения графика изменения температуры по сечению наружной стены после выключения системы отопления приведены на рис. 7.8. По данным графика определяем промежуток времени, через который начнется конденсация водяного пара на внутренней поверхности,  $\Delta z_0 = 58,8 \text{ ч}$ .

## 7.4. Расчет теплового режима помещения

### 7.4.1. Определение основных потерь теплоты помещением

Основные потери теплоты помещением  $\Sigma Q_0$ , Вт, определяют суммированием теплотерь через все ограждения по формуле [8]

$$\Sigma Q_0 = \Sigma \frac{A}{R_0^{np}} (t_b - t_n) n (1 + \Sigma \beta), \quad (7.50)$$

где  $A$  – расчетная площадь ограждения, м<sup>2</sup>;  $R_0^{np}$  – приведенное сопротивление теплопередаче ограждения, определяемое по формуле (7.18);  $n$  – коэффициент, учитывающий положение ограждения по отношению к наружному воздуху, 1;  $\Sigma \beta$  – коэффициент учета добавочных потерь на ориентацию по сторонам света и угловые помещения согласно Приложению 9 [19].

Потери теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха  $Q_{инф}$ , Вт, составляют

$$\Sigma Q_{инф} = 0,278 L_b c_b \rho_b (t_b - t_n), \text{ Вт,} \quad (7.51)$$

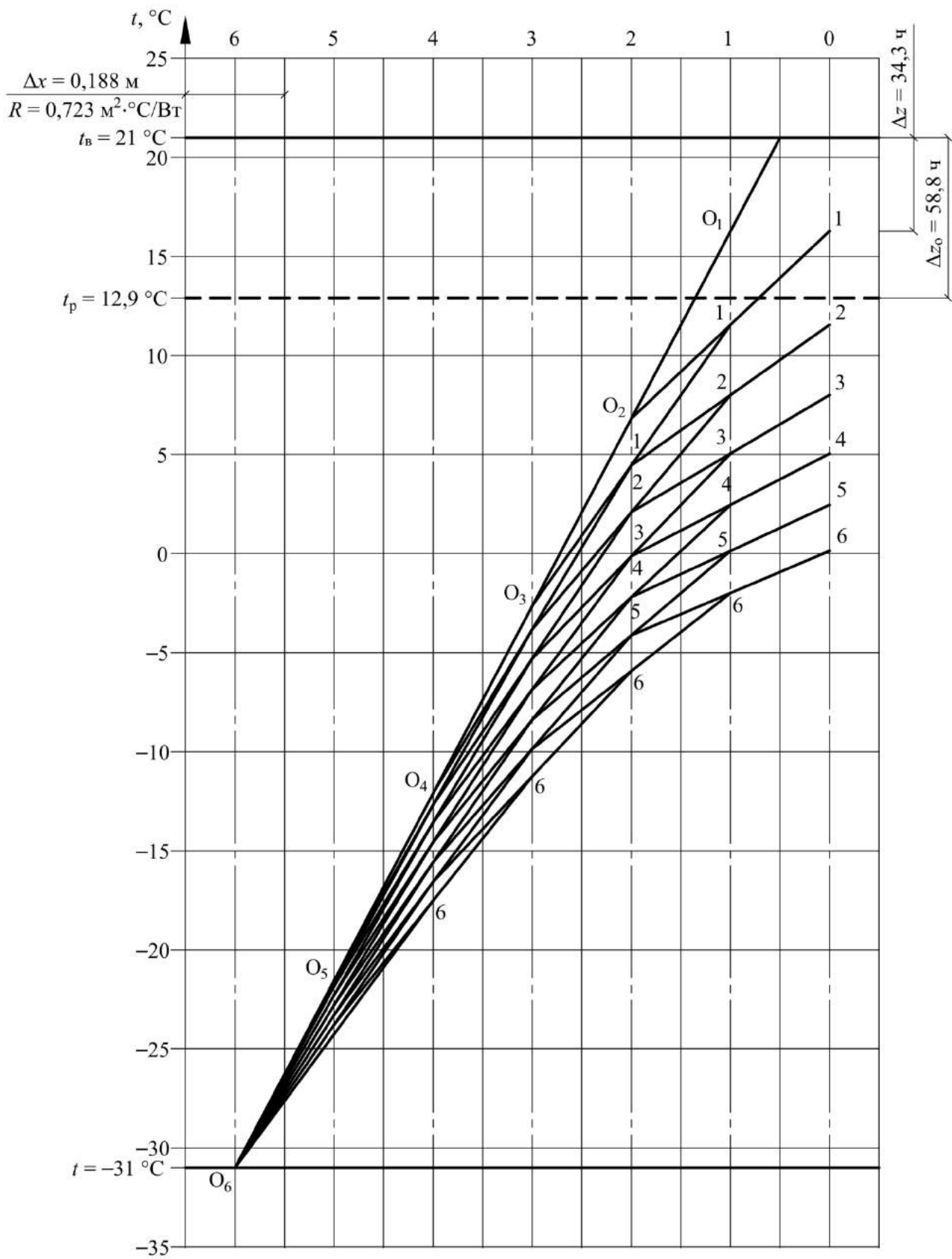


Рис. 7.8. График изменения температуры по сечению наружной стены после выключения системы отопления

где  $L_B$  – производительность системы вентиляции (норма воздухообмена для жилых помещений составляет  $3 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot \text{м}^2$  согласно СП [19]),  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $c_B$  – удельная теплоемкость воздуха,  $c_B = 1,005 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot \text{°C}$ ;  $\rho_B$  – средняя плотность наружного и внутреннего воздуха,  $\rho_B = 1,31 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Суммарные потери теплоты помещения  $Q_{\text{пом}}$ , Вт, компенсируемые системой отопления, определяются по формуле

$$Q_{\text{пом}} = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{инф}} - A_{\text{пол}} q_{\text{быт}}, \quad (7.52)$$

где  $A_{\text{пол}}$  – площадь пола помещения,  $\text{м}^2$ ;  $q_{\text{быт}}$  – удельные бытовые тепловыделения на  $1 \text{ м}^2$  помещения,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , принимаются равными  $10 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

**Пример 14.** Расчет ведется для выделенного помещения верхнего этажа, расположенного в многоквартирном жилом доме (вариант 1, Приложение А), с учетом данных, полученных в примерах 1...13.

Потери теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха составляют

$$\sum Q_{\text{инф}} = 0,278 \cdot 43,2 \cdot 1,005 \cdot 1,31(21 - (-31)) = 822 \text{ Вт}.$$

Результаты расчета потерь теплоты через наружные ограждающие конструкции помещения приведены в табл. 7.11.

Таблица 7.11

Результаты расчета потерь теплоты через ограждения помещения

Наименование ограждения	$A, \text{м}^2$	$R_o^{\text{ип}}, \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	$t_B - t_H, \text{°C}$	$n$	$\Sigma\beta$	$Q_o, \text{Вт}$
Стена наружная: – плоский элемент (наружная стена) $R_o^{\text{усл}} = 4,328 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ; – линейный элемент № 1 (стык окна со стеной) $l_j \Psi_j = 8,4 \cdot (0,0033 \cdot 3 + 0,094) / 5,65 = 0,1545 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ ; – линейный элемент № 2 (стык стены и этажного перекрытия) $l_j \Psi_j = 3 \cdot (0,0091 \cdot 3 + 0,0486) / 5,65 = 0,0403 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ ; – точечный элемент $n_k \chi_k = 8 \cdot 0,004 = 0,032 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ .	5,65	2,18	52	1	0	135
– окно	3,65	0,54	52	1	0	352
– чердачное перекрытие	14,4	3,64	52	1	0	206
$\Sigma Q_o, \text{Вт}$						693

Суммарные потери теплоты, которые необходимо компенсировать теплоотдачей отопительных панелей системы отопления, составляют

$$Q_{\text{пом}} = 693 + 822 - 14,4 \cdot 10 = 1371 \text{ Вт.}$$

#### 7.4.2. Определение температуры нагретой поверхности

При обогреве помещения с помощью нагретой поверхности теплоотдача последней должна быть равна теплопотерям помещения. Количество теплоты, отдаваемое нагретой поверхностью заданной площади, зависит от её температуры. Задачей расчета является определение температуры нагретой поверхности. Отдачу теплоты поверхностью в помещение определяют по формуле

$$Q_{\text{п}} = A_{\text{п}} [\alpha_{\text{к}} (\tau_{\text{п}} - t_{\text{в}}) + \alpha_{\text{л}} (\tau_{\text{п}} - \tau_{\text{в}})], \text{ Вт.} \quad (7.53)$$

Необходимую для компенсации теплопотерь температуру поверхности ограждения (панели)  $\tau_{\text{п}}$ , °С, определяют (при условии  $Q_{\text{п}} = Q_{\text{пом}}$ ) по формуле

$$\tau_{\text{п}} = \frac{\frac{Q_{\text{пом}}}{A_{\text{п}}} + \alpha_{\text{к}} t_{\text{в}} + \alpha_{\text{л}} \tau_{\text{в}}}{\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}}, \text{ °С} \quad (7.54)$$

где  $A_{\text{п}}$  – площадь нагретой поверхности, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{\text{к}}$ ,  $\alpha_{\text{л}}$  – коэффициенты соответственно конвективного и лучистого теплообмена на нагретой поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\tau_{\text{в}}$  – осредненная температура внутренней поверхности наружного ограждения, °С.

Коэффициенты теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), равны

$$\alpha_{\text{к}} = A \sqrt[3]{\tau_{\text{п}} - t_{\text{в}}}; \quad (7.55)$$

$$\alpha_{\text{л}} = 4,2\Phi b, \quad (7.56)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от положения нагретой или охлажденной поверхности [1];  $\Phi$  – коэффициент полной облученности панели наружными ограждениями, определяемый по формуле

$$\Phi = \frac{\frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{п}}} - \varphi_{\text{п-в}}^2}{\frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{п}}} - 2\varphi_{\text{п-в}} + 1}, \quad (7.57)$$

где  $A_B$  и  $A_{\Pi}$  – площади соответственно наружных ограждений и нагретой поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $\varphi_{\Pi-B}$  – коэффициент облученности нагретой поверхности наружных ограждений;  $b$  – температурный коэффициент, равный

$$b = 0,81 + 0,01 \frac{\tau_{\Pi} + \tau_B}{2}. \quad (7.58)$$

Определяют среднюю температуру внутренней поверхности наружных ограждений,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\tau_B = \frac{A_{\text{н.с}} \tau_{\text{н.с}} + A_{\text{ок}} \tau_{\text{ок}}}{A_{\text{н.с}} + A_{\text{ок}}}, \quad (7.59)$$

где  $A_{\text{н.с}}$  и  $A_{\text{ок}}$  – площади поверхностей соответственно наружной стены и окна,  $\text{м}^2$ ;  $\tau_{\text{н.с}}$  и  $\tau_{\text{ок}}$  – температуры соответственно внутренней поверхности наружной стены и окна,  $^{\circ}\text{C}$

Расчет температуры нагретой поверхности ведут в такой последовательности. Ориентировочно задают температуру поверхности и определяют значение коэффициентов теплообмена  $\alpha_K$  и  $\alpha_{\text{л}}$ . Затем определяют температуру поверхности  $\tau_{\Pi}$ . При большом расхождении (более  $1^{\circ}\text{C}$ ) принятого и вычисленного значений  $\tau_{\Pi}$  расчет повторяют. Полученное значение температуры поверхности должно удовлетворять условиям комфортности. Для проверки первого условия комфортности необходимо определить радиационную температуру помещения относительно человека, стоящего в центре помещения, по формуле

$$t_R = \varphi_{r-B} \tau_B + \varphi_{r-\Pi} \tau_{\Pi} + \varphi_{r-BO} t_B, \quad (7.60)$$

где  $\varphi_{r-B}$ ,  $\varphi_{r-\Pi}$ ,  $\varphi_{r-BO}$  – коэффициенты облученности с поверхности человека соответственно на поверхность наружных ограждений (стены и окна), на поверхность панели, поверхности внутренних ограждений [1].

Определяют коэффициент облученности с поверхности человека на поверхность внутренних ограждений:

$$\varphi_{r-BO} = 1 - (\varphi_{r-B} + \varphi_{r-\Pi}). \quad (7.61)$$

В соответствии с первым условием комфортности температурную обстановку в помещении определяют по формуле

$$t_R = 36 - 0,5t_B \pm 1,5^{\circ}\text{C}. \quad (7.62)$$

Если полученные значения  $t_R$  лежат в пределах, определенных формулами (7.60) и (7.62), то первое условие комфортности в помещении удовлетворяется. Второе условие комфортности ограничивает интенсивность теплообмена при положении человека около нагретых и охлажденных поверхностей. Определяющей величиной является интенсивность лучистого теплообмена на наиболее невыгодно расположенной и наиболее чувствительной к излучению поверхности тела человека (голова). Максимально допустимую температуру нагретой поверхности в помещении  $\tau_{\text{п}}^{\text{доп}}$ , °С, определяют по формуле

$$\tau_{\text{п}}^{\text{доп}} \leq 19,2 + 8,7/\varphi_{r-\text{п}}^{\Gamma}, \quad (7.63)$$

где  $\varphi_{r-\text{п}}^{\Gamma}$  – коэффициент облученности с головы человека в сторону панели [1].

Полученное значение температуры поверхности панели должно удовлетворять условиям комфортности.

**Пример 15.** В рамках работы требуется рассчитать температуру поверхности и площадь теплообмена панели потолочного отопления помещения для следующих условий. Теплотери помещения составляют  $Q_{\text{пом}} = 1371$  Вт. Температуры: внутреннего воздуха  $t_{\text{в}} = 21$  °С, внутренних поверхностей наружных ограждений  $\tau_{\text{в}} = 17,9$  °С. Сопротивление теплопередаче окна  $R_{\text{ок}} = 0,54$  м<sup>2</sup>·°С/Вт. Приведенный коэффициент излучения  $c_{\text{пр}} = 4,9$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Ориентировочно задаемся температурой поверхности панели  $\tau_{\text{п}} = 37$  °С. Определяем коэффициенты облученности с поверхности на поверхность панели  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (рис. 7.9) по рис. I.11 [1].

По пропорциям

$$\frac{b}{c} = \frac{2,9}{4,8} = 0,6 \text{ и } \frac{a}{c} = \frac{3}{4,8} = 0,63$$

находим  $\varphi_2 = 0,14$ .

Суммарный коэффициент облученности панели составит

$$\varphi_{\text{п-в}} = \varphi_2 = 0,14.$$

Определим коэффициент полной облученности панели:

$$\Phi = \frac{\frac{2,9 \cdot 3}{3 \cdot 4,8} - 0,14^2}{\frac{2,9 \cdot 3}{3 \cdot 4,8} - 2 \cdot 0,14 + 1} = 0,44.$$

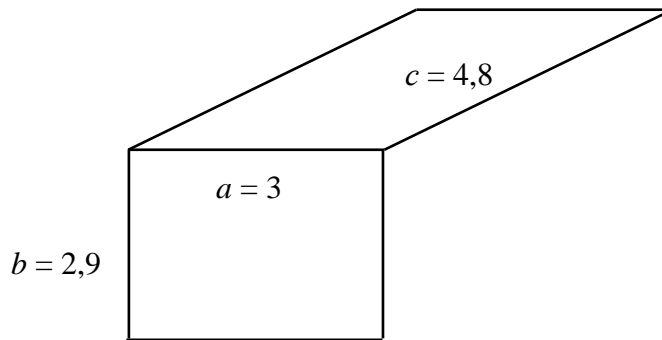


Рис. 7.9. Расчетная схема наружных стен помещения

Коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена по (7.55) и (7.56):

$$\alpha_k = 1,16 \sqrt[3]{37 - 21} = 2,81 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

$$\alpha_{\text{л}} = 4,9 \cdot 0,44 \cdot [0,005 \cdot (37 + 17,9) + 0,81] = 2,33 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Температура поверхности панели составит

$$\tau_{\text{п}} = \frac{\frac{1371}{14,4} + 2,81 \cdot 21 + 2,33 \cdot 17,2}{2,81 + 2,33} = 37,4 \text{ °C}.$$

Расхождение составляет менее 1 °C. Поэтому пересчет не требуется.

Полученное значение температуры поверхности должно удовлетворять условиям комфортности. Для проверки первого условия комфортности определим радиационную температуру помещения относительно человека, стоящего в центре помещения (рис. 7.10, 7.11).

Для полученных значений:  $\varphi_{r-\text{но}} = 0,05 \cdot 2 = 0,10$ ;  $\varphi_{r-\text{п}} = 0,044 \cdot 4 = 0,176$ .

Для проверки первого условия комфортности необходимо определить радиационную температуру помещения относительно человека, стоящего в центре рассматриваемого помещения:

$$t_R = 0,1 \cdot 17,9 + (0,176) \cdot 37,4 + (1 - 0,1 - 0,176) \cdot 21 = 23,6 \text{ °C}.$$

Согласно первому условию комфортности

$$t_R = 36 - 0,5 \cdot 21 \pm 1,5 = 25,5 \pm 1,5 = 24,0 \text{ °C}.$$

Первое условие комфортности выполняется.

Согласно второму условию комфортности (с. 89-90 [1]).

$$\tau_{\text{п}}^{\text{доп}} \leq 19,2 + 8,7/\varphi_{r-\text{п}}^{\Gamma} = 19,2 + 8,7/0,77 = 30,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$\varphi_{r-\text{п}}^{\Gamma} = 1 - 0,8 \left( \frac{x}{\sqrt{A_{\text{п}}}} \right) = 1 - 0,8 \left( \frac{2,9 - 1,8}{\sqrt{4,8 \cdot 3}} \right) = 0,77.$$

Второе условие комфортности не выполняется, требуется изменить расчетную температуру поверхности отопляющей панели или принять иной конструктивный вид системы отопления.

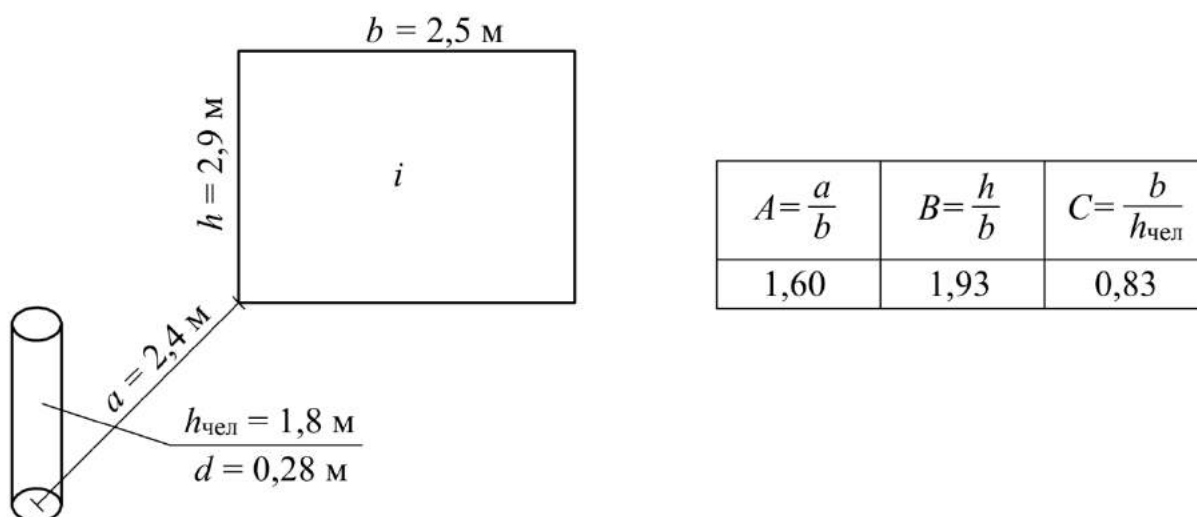


Рис. 7.10. Расчет облученности тела человека горизонтальной поверхностью

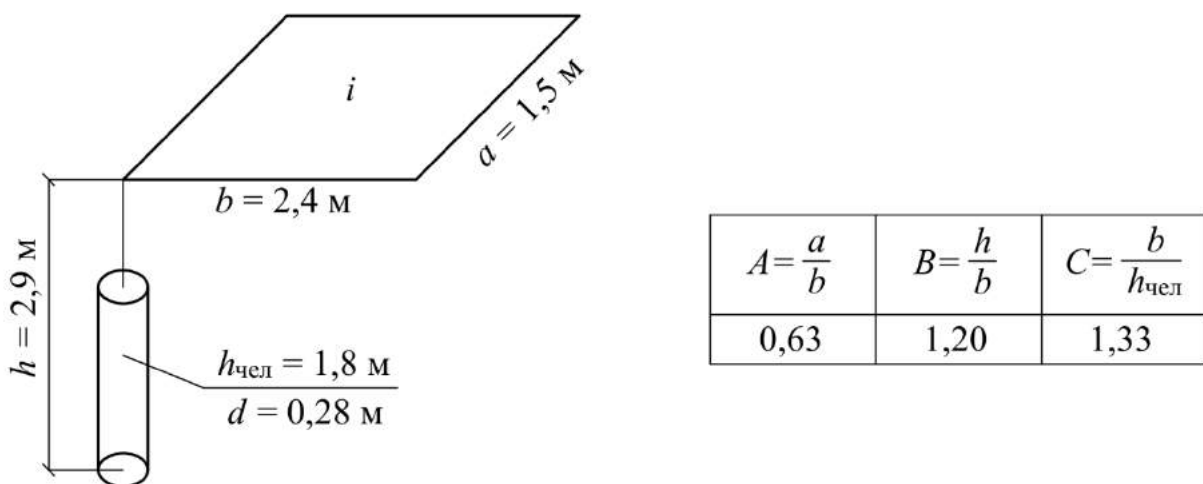


Рис. 7.11. Расчет облученности тела человека вертикальной поверхностью



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
2. Бодров, В.И. Микроклимат зданий и сооружений / В.И. Бодров, М.В. Бодров, Н.А. Трифионов, Т.Н. Чурмеева. – Нижний Новгород: Арабеск, 2001. – 395 с.
3. ГОСТ 12.1.005. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к рабочей зоне. – М.: Стандартинформ, 2005. – 48 с.
4. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
5. Малявина, Е.Г. Теплотери здания: справочное пособие / Е.Г. Малявина. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.
6. Малявина, Е.Г. Теплофизика зданий / Е.Г. Малявина. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 144 с.
7. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 27 с.
8. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2001. – 20 с.
9. СНиП II-3-79. Строительная теплотехника. – М.: Стройиздат, 1979. – 32 с.
10. СНиП 2.04.05-91\*. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: ГУП ЦПП, 2003. – 121 с.
11. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология. – М.: ФГУП ЦПП, 2006. – 70 с.
12. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М.: Госстрой России, 2003. – 30 с.
13. СП 106.13330.2012. Животноводческие, птицеводческие и звероводческие здания и помещения. Актуализированная редакция СНиП 2.10.03-84. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 21 с.
14. СП 109.13330.2012. Холодильники. Актуализированная редакция СНиП 2.11.02-87. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 27 с.

15. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-02-99\*. – М.: ФАУ «ФЦС», 2015. – 119 с.
16. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2004. – 139 с.
17. СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. – М.: ФАУ «ФЦС», 2015. – 72 с.
18. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 95 с.
19. СП 54.13330.2011. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003. – М.: Минрегион России, 2011. – 40 с.
20. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 76 с.
21. ТСН 23-301-973. Строительная климатология для пунктов Нижегородской области. – Полиграф. центр Нижегородской государственной архитектурно-строительной академии, 1997. – 5 с.
22. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 287 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Расчетные теплотехнические показатели строительных материалов и изделий

Таблица А.1

Расчетные теплотехнические показатели строительных материалов и изделий

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
				А	Б	А	Б	А	Б	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Теплоизоляционные материалы</i>										
Плиты из пенополистирола	До 10	1,34	0,049	2	10	0,052	0,059	0,23	0,28	0,05
То же	10-12	1,34	0,041	2	10	0,044	0,050	0,23	0,28	0,05
То же	12-14	1,34	0,040	2	10	0,043	0,049	0,25	0,30	0,05
То же	14-15	1,34	0,039	2	10	0,042	0,048	0,26	0,30	0,05
То же	15-17	1,34	0,038	2	10	0,041	0,047	0,27	0,32	0,05
То же	17-20	1,34	0,037	2	10	0,040	0,046	0,29	0,34	0,05
То же	20-25	1,34	0,036	2	10	0,038	0,044	0,31	0,38	0,05
То же	25-30	1,34	0,036	2	10	0,038	0,044	0,34	0,41	0,05
То же	30-35	1,34	0,037	2	10	0,040	0,046	0,38	0,45	0,05
То же	35-38	1,34	0,037	2	10	0,040	0,046	0,38	0,45	0,05
Плиты из пенополистирола фасадные	16,5-20	1,34	0,037	2	10	0,040	0,045	0,29	0,34	0,05
Плиты из пенополистирола с графитовыми добавками	15-20	1,34	0,033	2	10	0,035	0,040	0,27	0,32	0,05
Плиты из пенополистирола с графитовыми добавками	20-25	1,34	0,032	2	10	0,034	0,039	0,30	0,35	0,05
Экструдированный пенополистирол	25-33	1,34	0,029	1	2	0,030	0,031	0,30	0,31	0,005
То же	35-45	1,34	0,030	1	2	0,031	0,032	0,35	0,36	0,005
Пенополиуретан	80	1,47	0,041	2	5	0,042	0,05	0,62	0,70	0,05
То же	60	1,47	0,035	2	5	0,036	0,041	0,49	0,55	0,05
То же	40	1,47	0,029	2	5	0,031	0,04	0,37	0,44	0,05
Плиты из резольно фенолформальдегидного пенопласта	90	1,68	0,045	5	20	0,053	0,073	0,81	1,10	0,15
То же	80	1,68	0,044	5	20	0,051	0,071	0,75	1,02	0,23
То же	50	1,68	0,041	5	20	0,045	0,064	0,56	0,77	0,23
Перлитопластбетон	200	1,05	0,041	2	3	0,052	0,06	0,93	1,01	0,008
То же	100	1,05	0,035	2	3	0,041	0,05	0,58	0,66	0,008
Перлитофосфогелевые изделия	300	1,05	0,076	3	12	0,08	0,12	1,43	2,02	0,2

Продолжение табл. А.1

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
				А	Б	А	Б	А	Б	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перлитофосфогелевые изделия	200	1,05	0,064	3	12	0,07	0,09	1,1	1,43	0,23
Теплоизоляционные изделия из синтетического каучука	60-95	1,806	0,034	5	15	0,04	0,054	0,65	0,71	0,003
Плиты минераловатные из каменного волокна	180	0,84	0,038	2	5	0,045	0,048	0,74	0,81	0,3
То же	140-175	0,84	0,037	2	5	0,043	0,046	0,68	0,75	0,31
То же	80-125	0,84	0,036	2	5	0,042	0,045	0,53	0,59	0,32
То же	40-60	0,84	0,035	2	5	0,041	0,044	0,37	0,41	0,35
То же	25-50	0,84	0,036	2	5	0,042	0,045	0,31	0,35	0,37
Плиты из стеклянного штапельного волокна	85	0,84	0,044	2	5	0,046	0,05	0,51	0,57	0,5
То же	75	0,84	0,04	2	5	0,042	0,047	0,46	0,52	0,5
То же	60	0,84	0,038	2	5	0,04	0,045	0,4	0,45	0,51
То же	45	0,84	0,039	2	5	0,041	0,045	0,35	0,39	0,51
То же	35	0,84	0,039	2	5	0,041	0,046	0,31	0,35	0,52
То же	30	0,84	0,04	2	5	0,042	0,046	0,29	0,32	0,52
То же	20	0,84	0,04	2	5	0,043	0,048	0,24	0,27	0,53
То же	17	0,84	0,044	2	5	0,047	0,053	0,23	0,26	0,54
То же	15	0,84	0,046	2	5	0,049	0,055	0,22	0,25	0,55
Плиты древесноволокнистые и древесностружечные	1000	2,3	0,15	10	12	0,23	0,29	6,75	7,7	0,12
То же	800	2,3	0,13	10	12	0,19	0,23	5,49	6,13	0,12
То же	600	2,3	0,11	10	12	0,13	0,16	3,93	4,43	0,13
То же	400	2,3	0,08	10	12	0,11	0,13	2,95	3,26	0,19
То же	200	2,3	0,06	10	12	0,07	0,08	1,67	1,81	0,24
Плиты фибролитовые и арболит на портландцементе	500	2,3	0,095	10	15	0,15	0,19	3,86	4,50	0,11
То же	450	2,3	0,09	10	15	0,135	0,17	3,47	4,04	0,11
То же	400	2,3	0,08	10	15	0,13	0,16	3,21	3,70	0,26
Плиты камышитовые	300	2,3	0,07	10	15	0,09	0,14	2,31	2,99	0,45
То же	200	2,3	0,06	10	15	0,07	0,09	1,67	1,96	0,49
Плиты торфяные теплоизоляционные	300	2,3	0,064	15	20	0,07	0,08	2,12	2,34	0,19
То же	200	2,3	0,052	15	20	0,06	0,064	1,6	1,71	0,49
Пакля	150	2,3	0,05	7	12	0,06	0,07	1,3	1,47	0,49
Плиты из гипса	1350	0,84	0,35	4	6	0,50	0,56	7,04	7,76	0,098
То же	1100	0,84	0,23	4	6	0,35	0,41	5,32	5,99	0,11

Продолжение табл. А.1

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Листы гипсовые обшивочные (сухая штукатурка)	1050	0,84	0,15	4	6	0,34	0,36	5,12	5,48	0,075
То же	800	0,84	0,15	4	6	0,19	0,21	3,34	3,66	0,075
Изделия из вспученного перлита на битумном связующем	300	1,68	0,087	1	2	0,09	0,099	1,84	1,95	0,04
То же	250	1,68	0,082	1	2	0,085	0,099	1,53	1,64	0,04
То же	225	1,68	0,079	1	2	0,082	0,094	1,39	1,47	0,04
То же	200	1,68	0,076	1	2	0,078	0,09	1,23	1,32	0,04
<i>Засыпки</i>										
Гравий керамзитовый	600	0,84	0,14	2	3	0,17	0,19	2,62	2,83	0,23
То же	500	0,84	0,14	2	3	0,15	0,165	2,25	2,41	0,23
То же	450	0,84	0,13	2	3	0,14	0,155	2,06	2,22	0,235
То же	400	0,84	0,12	2	3	0,13	0,145	1,87	2,02	0,24
То же	350	0,84	0,115	2	3	0,125	0,14	1,72	1,86	0,245
То же	300	0,84	0,108	2	3	0,12	0,13	1,56	1,66	0,25
То же	250	0,84	0,099	2	3	0,11	0,12	1,22	1,3	0,26
То же	200	0,84	0,090	2	3	0,10	0,11	1,16	1,24	0,27
Гравий шунгизитовый	700	0,84	0,16	2	4	0,18	0,21	2,91	3,29	0,21
То же	600	0,84	0,13	2	4	0,16	0,19	2,54	2,89	0,22
То же	500	0,84	0,12	2	4	0,15	0,175	2,25	2,54	0,22
То же	450	0,84	0,11	2	4	0,14	0,16	2,06	2,30	0,22
То же	400	0,84	0,11	2	4	0,13	0,15	1,87	2,10	0,23
Щебень шлакопемзовый и аглопоритовый	800	0,84	0,18	2	3	0,21	0,26	3,36	3,83	0,22
То же	700	0,84	0,16	2	3	0,19	0,23	2,99	3,37	0,23
То же	600	0,84	0,15	2	3	0,18	0,21	2,7	2,98	0,24
То же	500	0,84	0,14	2	3	0,16	0,19	2,32	2,59	0,25
То же	450	0,84	0,13	2	3	0,15	0,17	2,13	2,32	0,255
То же	400	0,84	0,122	2	3	0,14	0,16	1,94	2,12	0,26
Пористый гравий с остеклованной оболочкой из доменного и ферросплавного шлаков	700	0,84	0,14	2	3	0,17	0,19	2,84	3,06	0,22
То же	600	0,84	0,13	2	3	0,16	0,18	2,54	2,76	0,235
То же	500	0,84	0,12	2	3	0,14	0,15	2,17	2,30	0,24
То же	400	0,84	0,10	2	3	0,13	0,14	1,87	1,98	0,245
Щебень и песок из перлита вспученного	500	0,84	0,09	1	2	0,1	0,11	1,79	1,92	0,26
То же	400	0,84	0,076	1	2	0,087	0,095	1,5	1,6	0,3
То же	350	0,84	0,07	1	2	0,081	0,085	1,35	1,42	0,3
То же	300	0,84	0,064	1	2	0,076	0,08	0,99	1,04	0,34
Вермикулит вспученный	200	0,84	0,065	1	3	0,08	0,095	1,01	1,16	0,23

Продолжение табл. А.1

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вермикулит вспученный	150	0,84	0,060	1	3	0,074	0,098	0,84	1,02	0,26
То же	100	0,84	0,055	1	3	0,067	0,08	0,66	0,75	0,3
Песок для строительных работ	1600	0,84	0,35	1	2	0,47	0,58	6,95	7,91	0,17
<i>Конструкционные и конструкционно-теплоизоляционные материалы</i>										
<i>Бетоны на заполнителях из пористых горных пород</i>										
Туфобетон	1800	0,84	0,64	7	10	0,87	0,99	11,38	12,7	0,09
То же	1600	0,84	0,52	7	10	0,7	0,81	9,62	10,9	0,11
То же	1400	0,84	0,41	7	10	0,52	0,58	7,76	8,63	0,11
То же	1200	0,84	0,32	7	10	0,41	0,47	6,38	7,2	0,12
Бетон на литоидной пемзе	1600	0,84	0,52	4	6	0,62	0,68	8,54	9,3	0,075
То же	1400	0,84	0,42	4	6	0,49	0,54	7,1	7,76	0,083
То же	1200	0,84	0,30	4	6	0,4	0,43	5,94	6,41	0,098
То же	1000	0,84	0,22	4	6	0,3	0,34	4,69	5,2	0,11
То же	800	0,84	0,19	4	6	0,22	0,26	3,6	4,07	0,12
Бетон на вулканическом шлаке	1600	0,84	0,52	7	10	0,64	0,7	9,2	10,1	0,075
То же	1400	0,84	0,41	7	10	0,52	0,58	7,76	8,63	0,083
То же	1200	0,84	0,33	7	10	0,41	0,47	6,38	7,2	0,09
То же	1000	0,84	0,24	7	10	0,29	0,35	4,9	5,67	0,098
То же	800	0,84	0,20	7	10	0,23	0,29	3,9	4,61	0,11
<i>Бетоны на искусственных пористых заполнителях</i>										
Керамзитобетон на керамзитовом песке	1800	0,84	0,66	5	10	0,80	0,92	10,5	12,3	0,09
То же	1600	0,84	0,58	5	10	0,67	0,79	9,06	10,7	0,09
То же	1400	0,84	0,47	5	10	0,56	0,65	7,75	9,14	0,098
То же	1200	0,84	0,36	5	10	0,44	0,52	6,36	7,57	0,11
То же	1000	0,84	0,27	5	10	0,33	0,41	5,03	6,13	0,14
То же	800	0,84	0,21	5	10	0,24	0,31	3,83	4,77	0,19
То же	600	0,84	0,16	5	10	0,2	0,26	3,03	3,78	0,26
То же	500	0,84	0,14	5	10	0,17	0,23	2,55	3,25	0,3
Керамзитобетон на кварцевом песке	1200	0,84	0,41	4	8	0,52	0,58	6,77	7,72	0,075
То же	1000	0,84	0,33	4	8	0,41	0,47	5,49	6,35	0,075
То же	800	0,84	0,23	4	8	0,29	0,35	4,13	4,9	0,075
Керамзитобетон на перлитовом песке	1000	0,84	0,28	9	13	0,35	0,41	5,57	6,43	0,15
То же	800	0,84	0,22	9	13	0,29	0,35	4,54	5,32	0,17
Керамзитобетон беспесчаный	700	0,84	0,135	3,5	6	0,145	0,155	2,70	2,94	0,145
То же	600	0,84	0,130	3,5	6	0,140	0,150	2,46	2,68	0,155
То же	500	0,84	0,120	3,5	6	0,130	0,140	2,16	2,36	0,165
То же	400	0,84	0,105	3,5	6	0,115	0,125	1,82	1,99	0,175
То же	300	0,84	0,095	3,5	6	0,105	0,110	1,51	1,62	0,195
Шунгизитобетон	1400	0,84	0,49	4	7	0,56	0,64	7,59	8,6	0,098

Продолжение табл. А.1

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Шунгзитобетон	1200	0,84	0,36	4	7	0,44	0,5	6,23	7,04	0,11
То же	1000	0,84	0,27	4	7	0,33	0,38	4,92	5,6	0,14
Перлитобетон	1200	0,84	0,29	10	15	0,44	0,5	6,96	8,01	0,15
То же	1000	0,84	0,22	10	15	0,33	0,38	5,5	6,38	0,19
То же	800	0,84	0,16	10	15	0,27	0,33	4,45	5,32	0,26
То же	600	0,84	0,12	10	15	0,19	0,23	3,24	3,84	0,3
Бетон на шлакопемзовом щебне	1800	0,84	0,52	5	8	0,63	0,76	9,32	10,8	0,075
То же	1600	0,84	0,41	5	8	0,52	0,63	7,98	9,29	0,09
То же	1400	0,84	0,35	5	8	0,44	0,52	6,87	7,9	0,098
То же	1200	0,84	0,29	5	8	0,37	0,44	5,83	6,73	0,11
То же	1000	0,84	0,23	5	8	0,31	0,37	4,87	5,63	0,11
Бетон на остеклованном шлаковом гравии	1800	0,84	0,46	4	6	0,56	0,67	8,60	9,80	0,08
То же	1600	0,84	0,37	4	6	0,46	0,55	7,35	8,37	0,085
То же	1400	0,84	0,31	4	6	0,38	0,46	6,25	7,16	0,09
То же	1200	0,84	0,26	4	6	0,32	0,39	5,31	6,10	0,10
То же	1000	0,84	0,21	4	6	0,27	0,33	4,45	5,12	0,11
Мелкозернистые бетоны на гранулированных доменных шлаках	1800	0,84	0,58	5	8	0,7	0,81	9,82	11,1	0,083
То же	1600	0,84	0,47	5	8	0,58	0,64	8,43	9,37	0,09
То же	1400	0,84	0,41	5	8	0,52	0,58	7,46	8,34	0,098
То же	1200	0,84	0,36	5	8	0,49	0,52	6,57	7,31	0,11
Аглопоритобетон и бетоны на заполнителях из топливных шлаков	1800	0,84	0,7	5	8	0,85	0,93	10,82	11,9	0,075
То же	1600	0,84	0,58	5	8	0,72	0,78	9,39	10,3	0,083
То же	1400	0,84	0,47	5	8	0,59	0,65	7,92	8,83	0,09
То же	1200	0,84	0,35	5	8	0,48	0,54	6,64	7,45	0,11
То же	1000	0,84	0,29	5	8	0,38	0,44	5,39	6,14	0,14
Бетон на зольном обжиговом и безобжиговом гравии	1400	0,84	0,47	5	8	0,52	0,58	7,46	8,34	0,09
То же	1200	0,84	0,35	5	8	0,41	0,47	6,14	6,95	0,11
То же	1000	0,84	0,24	5	8	0,3	0,35	4,79	5,48	0,12
Вермикулитобетон	800	0,84	0,21	8	13	0,23	0,26	3,97	4,58	-
То же	600	0,84	0,14	8	13	0,16	0,17	2,87	3,21	0,15
То же	400	0,84	0,09	8	13	0,11	0,13	1,94	2,29	0,19
То же	300	0,84	0,08	8	13	0,09	0,11	1,52	1,83	0,23
<i>Бетоны особо легкие на пористых заполнителях и ячеистые</i>										
Полистиролбетон на портландцементе	600	1,06	0,145	4	8	0,175	0,20	3,07	3,49	0,068
То же	500	1,06	0,125	4	8	0,14	0,16	2,5	2,85	0,075
То же	400	1,06	0,105	4	8	0,12	0,135	2,07	2,34	0,085
То же	350	1,06	0,095	4	8	0,11	0,12	1,85	2,06	0,09

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Полистиролбетон на портландцементе	300	1,06	0,085	4	8	0,09	0,11	1,55	1,83	0,10
То же	250	1,06	0,075	4	8	0,085	0,09	1,38	1,51	0,11
То же	200	1,06	0,065	4	8	0,07	0,08	1,12	1,28	0,12
То же	150	1,06	0,055	4	8	0,057	0,06	0,87	0,96	0,135
Полистиролбетон модифицированный на шлакопортландцементе	500	1,06	0,12	3,5	7	0,13	0,14	2,39	2,63	0,075
То же	400	1,06	0,09	3,5	7	0,10	0,11	1,87	1,98	0,08
То же	300	1,06	0,08	3,5	7	0,08	0,09	1,45	1,63	0,10
То же	250	1,06	0,07	3,5	7	0,07	0,08	1,24	1,40	0,11
То же	200	1,06	0,06	3,5	7	0,06	0,07	1,02	1,09	0,12
Газо- и пенобетон на цем. вяжущем	1000	0,84	0,29	8	12	0,38	0,43	5,71	6,49	0,11
То же	800	0,84	0,21	8	12	0,33	0,37	4,92	5,63	0,14
То же	600	0,84	0,14	8	12	0,22	0,26	3,36	3,91	0,17
То же	400	0,84	0,11	8	12	0,14	0,15	2,19	2,42	0,23
Газо- и пенобетон на известняковом вяжущем	1000	0,84	0,31	12	18	0,48	0,55	6,83	7,98	0,13
То же	800	0,84	0,23	11	16	0,39	0,45	6,07	7,03	0,16
То же	600	0,84	0,15	11	16	0,28	0,34	5,15	6,11	0,18
То же	500	0,84	0,13	11	16	0,22	0,28	4,56	5,55	0,235
Газо- и пенозолобетон на цементном вяжущем	1200	0,84	0,37	15	22	0,60	0,66	7,99	9,18	0,085
То же	1000	0,84	0,32	15	22	0,52	0,58	7,43	8,62	0,098
То же	800	0,84	0,23	15	22	0,41	0,47	6,61	7,60	0,12
<i>Кирпичная кладка из сплошного кирпича</i>										
Глиняного обыкновенного на цементно-песчаном растворе	1800	0,88	0,56	1	2	0,7	0,81	9,2	10,1	0,11
Глиняного обыкновенного на цементно-шлаковом растворе	1700	0,88	0,52	1,5	3	0,64	0,76	8,64	9,7	0,12
Глиняного обыкновенного на цементно-перлитовом растворе	1600	0,88	0,47	2	4	0,58	0,7	8,08	9,23	0,15
Силикатного на ц/п растворе	1800	0,88	0,7	2	4	0,76	0,87	9,77	10,9	0,11
Трепельного на цементно-песчаном растворе	1200	0,88	0,35	2	4	0,47	0,52	6,26	6,49	0,19
То же	1000	0,88	0,29	2	4	0,41	0,47	5,35	5,96	0,23
Шлакового на ц/п растворе	1500	0,88	0,52	1,5	3	0,64	0,7	8,12	8,76	0,11



Продолжение табл. А.1

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Кирпичная кладка из пустотного кирпича</i>										
Керамического пустотного плотностью 1400 кг/м <sup>3</sup> на цементно-песчаном растворе	1600	0,88	0,47	1	2	0,58	0,64	7,91	8,48	0,14
Керамического пустотного плотностью 1300 кг/м <sup>3</sup> на цементно-песчаном растворе	1400	0,88	0,41	1	2	0,52	0,58	7,01	7,56	0,16
Керамического пустотного плотностью 1000 кг/м <sup>3</sup> на цементно-песчаном растворе	1200	0,88	0,35	1	2	0,47	0,52	6,16	6,62	0,17
Силикатного одиннадцатипустотного на цементно-песчаном растворе	1500	0,88	0,64	2	4	0,7	0,81	8,59	9,63	0,13
Силикатного четырнадцатипустотного на цементно-песчаном растворе	1400	0,88	0,52	2	4	0,64	0,76	7,93	9,01	0,14
<i>Дерево и изделия из него</i>										
Сосна и ель поперек волокон	500	2,3	0,09	15	20	0,14	0,18	3,87	4,54	0,06
Сосна и ель вдоль волокон	500	2,3	0,18	15	20	0,29	0,35	5,56	6,33	0,32
Дуб поперек волокон	700	2,3	0,1	10	15	0,18	0,23	5,0	5,86	0,05
Дуб вдоль волокон	700	2,3	0,23	10	15	0,35	0,41	6,9	7,83	0,3
Фанера клееная	600	2,3	0,12	10	13	0,15	0,18	4,22	4,73	0,02
Картон облицовочный	1000	2,3	0,18	5	10	0,21	0,23	6,2	6,75	0,06
Картон строительный многослойный	650	2,3	0,13	6	12	0,15	0,18	4,26	4,89	0,083
<i>Конструкционные материалы</i>										
<i>Бетоны</i>										
Железобетон	2500	0,84	1,69	2	3	1,92	2,04	17,98	18,9	0,03
Бетон на гравии или щебне из природного камня	2400	0,84	1,51	2	3	1,74	1,86	16,77	17,8	0,03
Раствор цементно-песчаный	1800	0,84	0,58	2	4	0,76	0,93	9,6	11,0	0,09
Раствор сложный (песок, известь, цемент)	1700	0,84	0,52	2	4	0,7	0,87	8,95	10,4	0,098

Материал	Характеристики материалов в сухом состоянии			Расчетные характеристики материалов при условиях эксплуатации конструкций А и Б						
	плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)	теплопроводность $\lambda_0$ , Вт/(м·°С)	влажность $w$ , %		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Теплоусвоение (при периоде 24 ч) $s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)		паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Раствор известково-песчаный	1600	0,84	0,47	2	4	0,7	0,81	8,69	9,76	0,12
<i>Облицовка природным камнем</i>										
Гранит, гнейс и базальт	2800	0,88	3,49	0	0	3,49	3,49	25,04	25,0	0,008
Мрамор	2800	0,88	2,91	0	0	2,91	2,91	22,86	22,8	0,008
Известняк	2000	0,88	0,93	2	3	1,16	1,28	12,77	13,7	0,06
То же	1800	0,88	0,7	2	3	0,93	1,05	10,85	11,7	0,075
То же	1600	0,88	0,58	2	3	0,73	0,81	9,06	9,75	0,09
То же	1400	0,88	0,49	2	3	0,56	0,58	7,42	7,72	0,11
Туф	2000	0,88	0,76	3	5	0,93	1,05	11,68	12,9	0,075
То же	1800	0,88	0,56	3	5	0,7	0,81	9,61	10,7	0,083
То же	1600	0,88	0,41	3	5	0,52	0,64	7,81	9,02	0,09
То же	1400	0,88	0,33	3	5	0,43	0,52	6,64	7,6	0,098
То же	1200	0,88	0,27	3	5	0,35	0,41	5,55	6,25	0,11
То же	1000	0,88	0,21	3	5	0,24	0,29	4,2	4,8	0,11
<i>Материалы кровельные, гидроизоляционные, облицовочные и рулонные покрытия для полов</i>										
Листы асбестоцементные плоские	1800	0,84	0,35	2	3	0,47	0,52	7,55	8,12	0,03
То же	1600	0,84	0,23	2	3	0,35	0,41	6,14	6,8	0,03
Битумы нефтяные строительные и кровельные	1400	1,68	0,27	0	0	0,27	0,27	6,8	6,8	0,008
То же	1200	1,68	0,22	0	0	0,22	0,22	5,69	5,69	0,008
То же	1000	1,68	0,17	0	0	0,17	0,17	4,56	4,56	0,008
Асфальтобетон	2100	1,68	1,05	0	0	1,05	1,05	16,43	16,4	0,008
Рубероид, пергамин, толь	600	1,68	0,17	0	0	0,17	0,17	3,53	3,53	-
Техноэласт	1200	1,68	0,22	0	0	0,22	0,22	5,69	5,69	0,00036
Унифлекс	1150	1,68	0,22	0	0	0,22	0,22	5,69	5,69	0,00036
Линолеум на теплоизолирующей подоснове	1800	1,47	0,38	0	0	0,38	0,38	8,56	8,56	0,002
То же	1600	1,47	0,33	0	0	0,33	0,33	7,52	7,52	0,002
Линолеум на тканевой основе	1800	1,47	0,35	0	0	0,35	0,35	8,22	8,22	0,002
То же	1600	1,47	0,29	0	0	0,29	0,29	7,05	7,05	0,002
То же	1400	1,47	0,2	0	0	0,23	0,23	5,87	5,87	0,002
<i>Металлы и стекло</i>										
Сталь стержневая арматурная	7850	0,482	58	0	0	58	58	126,5	126	0
Чугун	7200	0,482	50	0	0	50	50	112,5	112	0
Алюминий	2600	0,840	221	0	0	221	221	187,6	187	0
Медь	8500	0,420	407	0	0	407	407	326	326	0
Стекло оконное	2500	0,840	0,76	0	0	0,76	0,76	10,79	10,7	0

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Исходные данные для выполнения расчетно-графической работы

Вариант плана многоквартирного жилого дома (рис. Б.1...Б.5) для выполнения работы определяется в зависимости от последней цифры номера студенческого билета по данным табл. Б.1. Число этажей жилого дома принимается в зависимости от предпоследней цифры номера студенческого билета по данным, приведенным в табл. Б.1. Размер окон: ОК-1 – 1,5×1,5 м (при наличии балконов – дополнительно дверь – 0,7×2,0 м, со светопрозрачным элементом 1,5×0,7 м); ОК-2 – 1,5×1,0 м. Балконы обозначены как – Бал.

Таблица Б.1

Вариант плана и число этажей жилого дома в зависимости от последних цифр номера студенческого билета

Последняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Этажность	5	6	7	8	9	5	6	7	8	9

Место расположения строительства определяется по заглавной букве фамилии студента, по возможности из списка: Абакан; Анадырь; Архангельск; Астрахань; Барнаул; Белгород; Биробиджан; Благовещенск; Брянск; Великий Новгород; Владивосток; Владикавказ; Владимир; Волгоград; Вологда; Воронеж; Горно-Алтайск; Грозный; Дзержинск; Екатеринбург; Иваново; Иркутск; Ижевск; Йошкар-Ола; Казань; Калининград; Калуга; Кемерово; Киров; Кострома; Краснодар; Красноярск; Курган; Курск; Кызыл; Липецк; Магас; Майкоп; Махачкала; Москва; Мурманск; Нальчик; Нарьян-Мар; Нижний Новгород; Новосибирск; Омск; Оренбург; Орёл; Пенза; Пермь; Петрозаводск; Петропавловск-Камчатский; Псков; Ростов-на-Дону; Рязань; Салехард; Самара; Санкт-Петербург; Саранск; Саратов; Севастополь; Симферополь; Смоленск; Ставрополь; Сыктывкар; Тамбов; Тверь; Томск; Тула; Тюмень; Улан-Удэ; Ульяновск; Уфа; Хабаровск; Ханты-Мансийск; Чебоксары; Челябинск; Черкесск; Чита; Элиста; Южно-Сахалинск; Якутск; Ярославль.

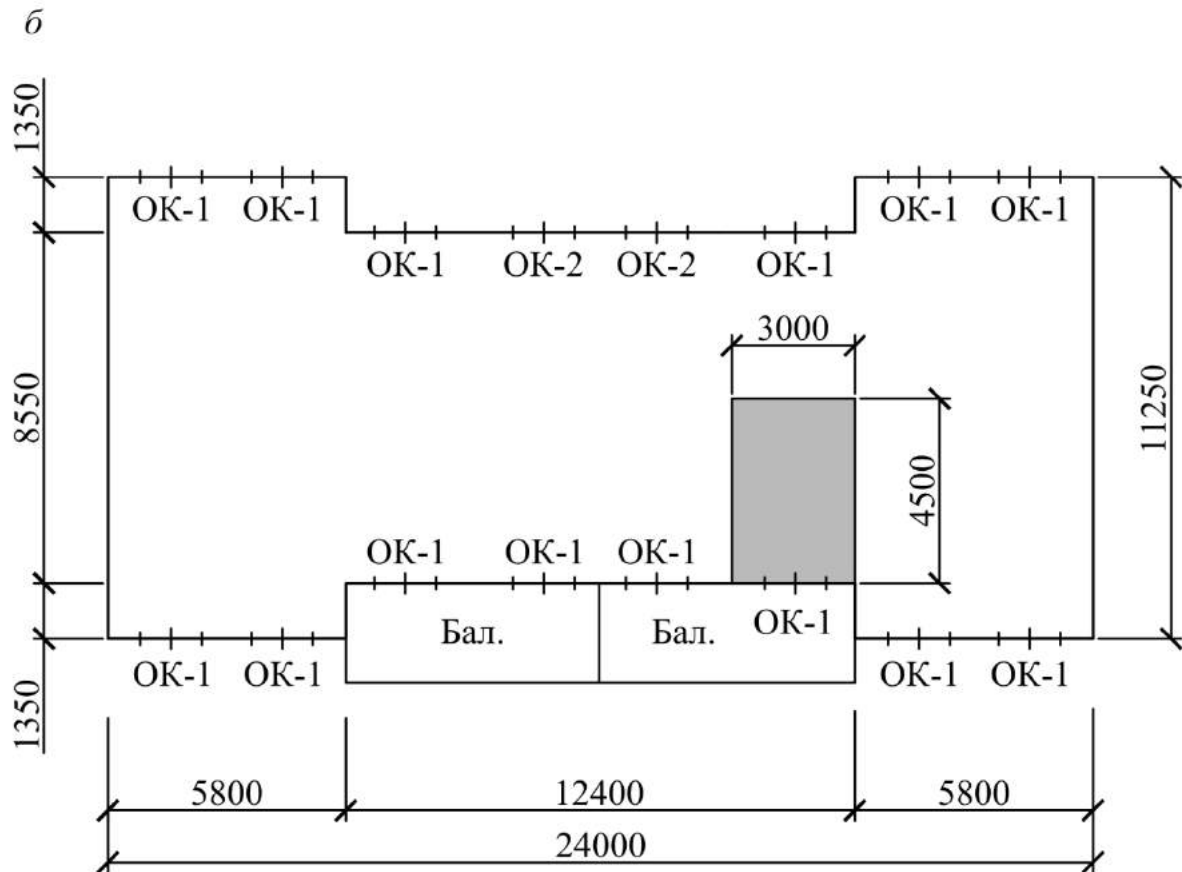
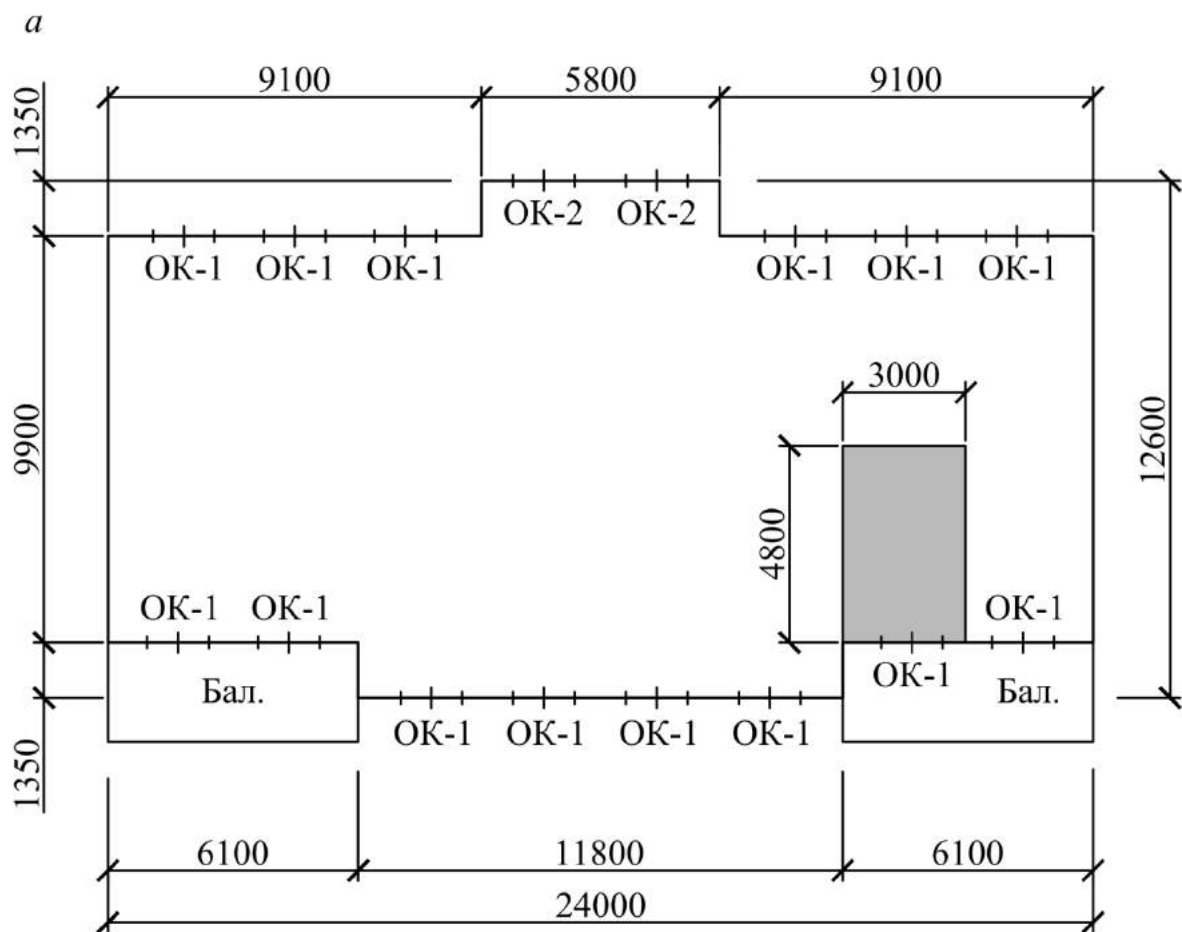


Рис. Б.1. Варианты: *a* – № 1; *б* – № 2

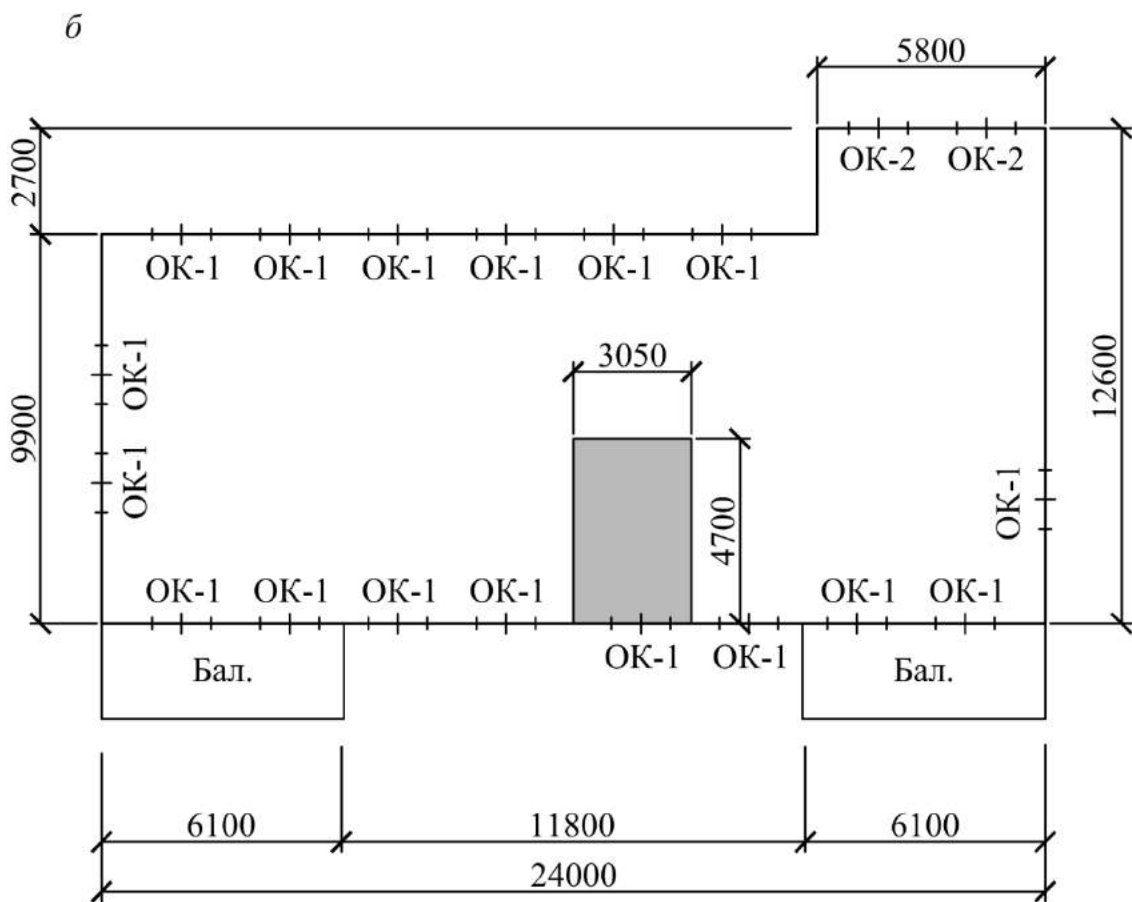
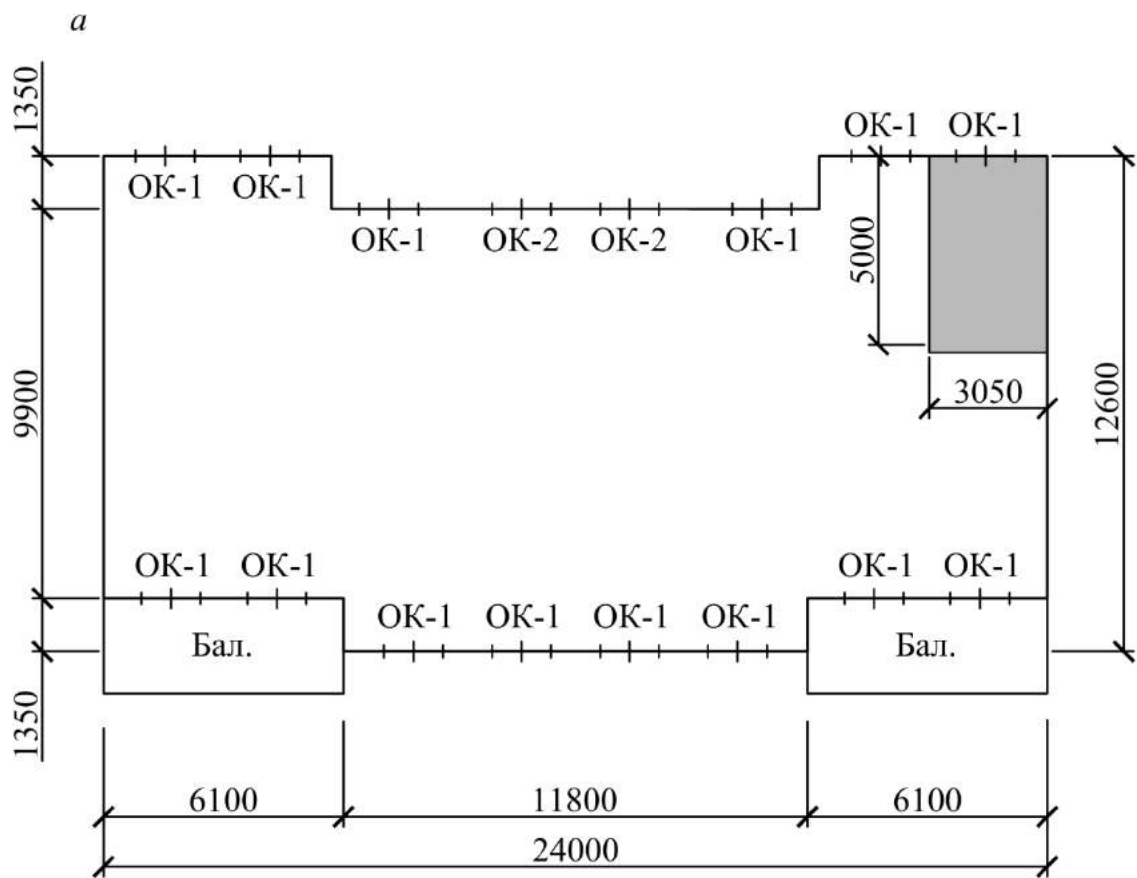


Рис. Б.2. Варианты: *a* – № 3; *б* – № 4

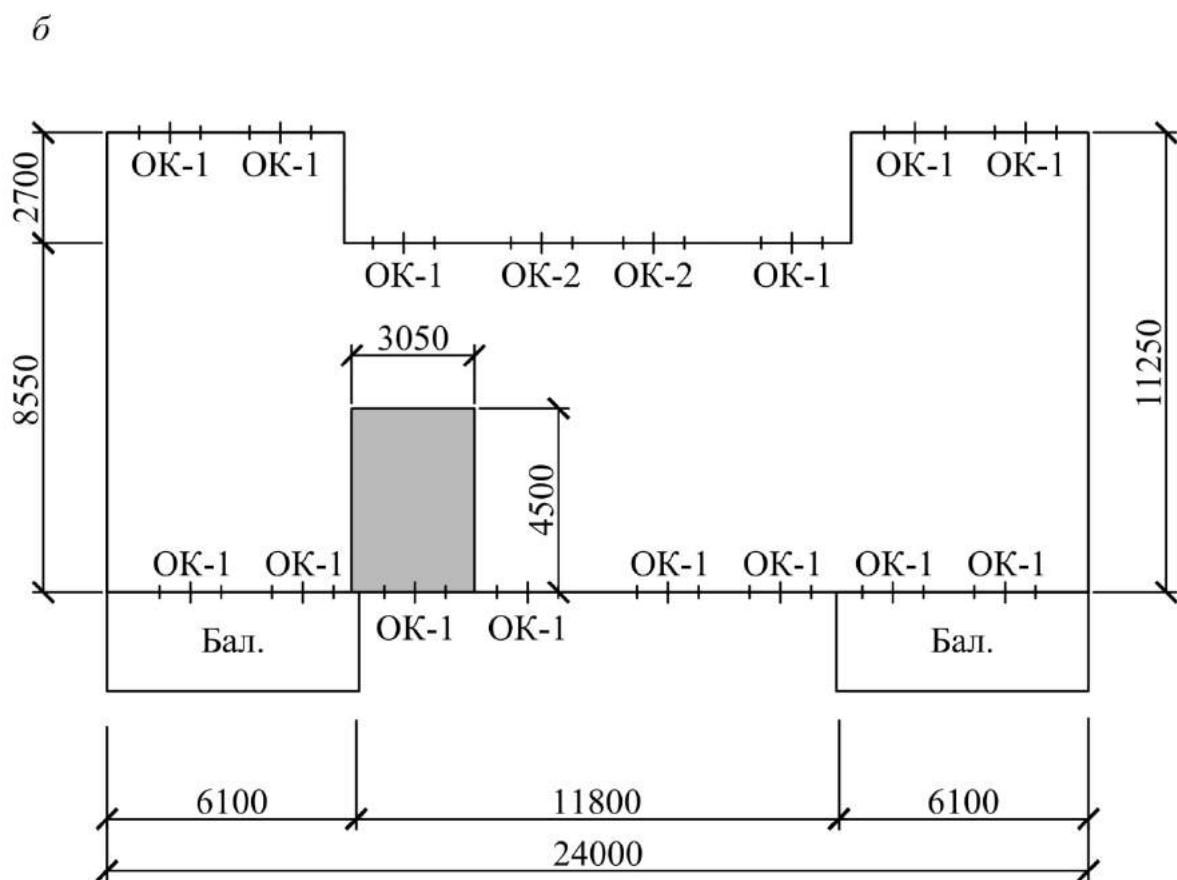
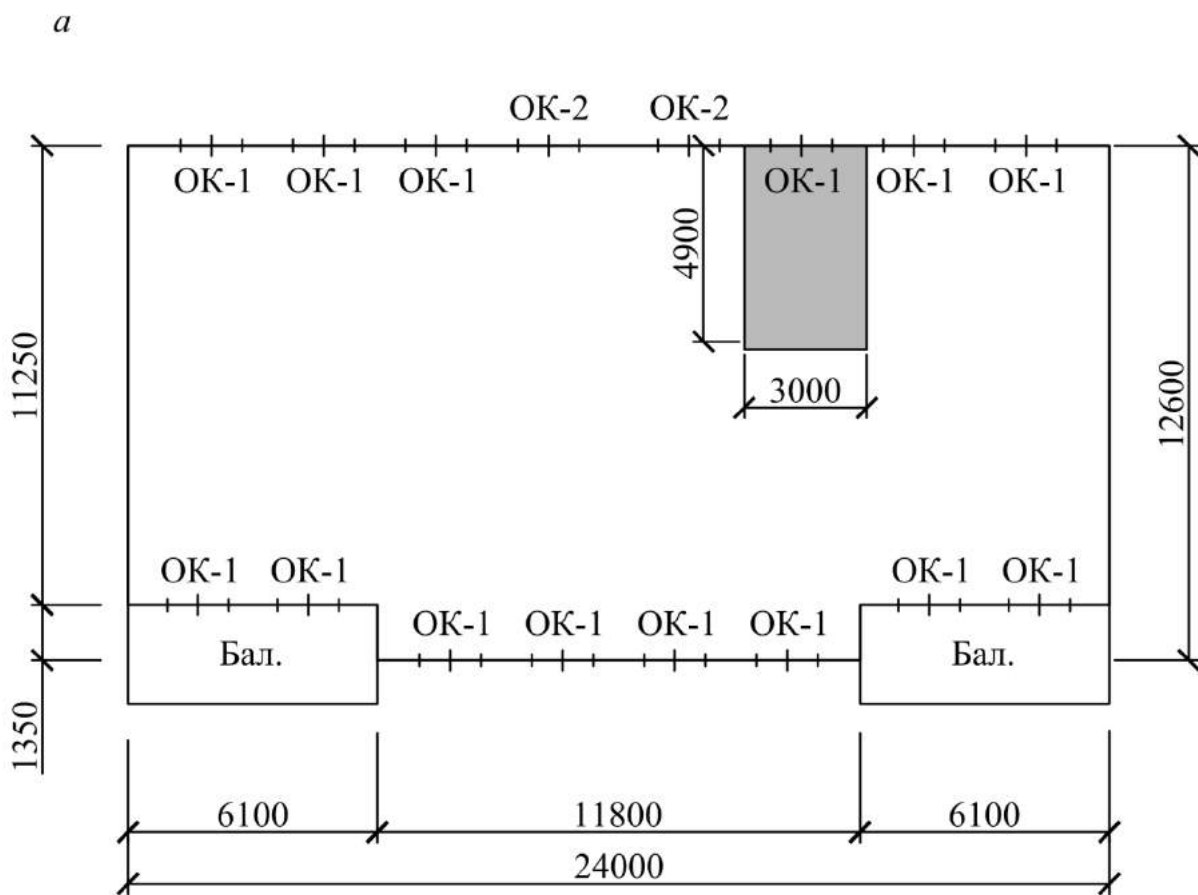


Рис. Б.3. Варианты: *a* – № 5; *б* – № 6

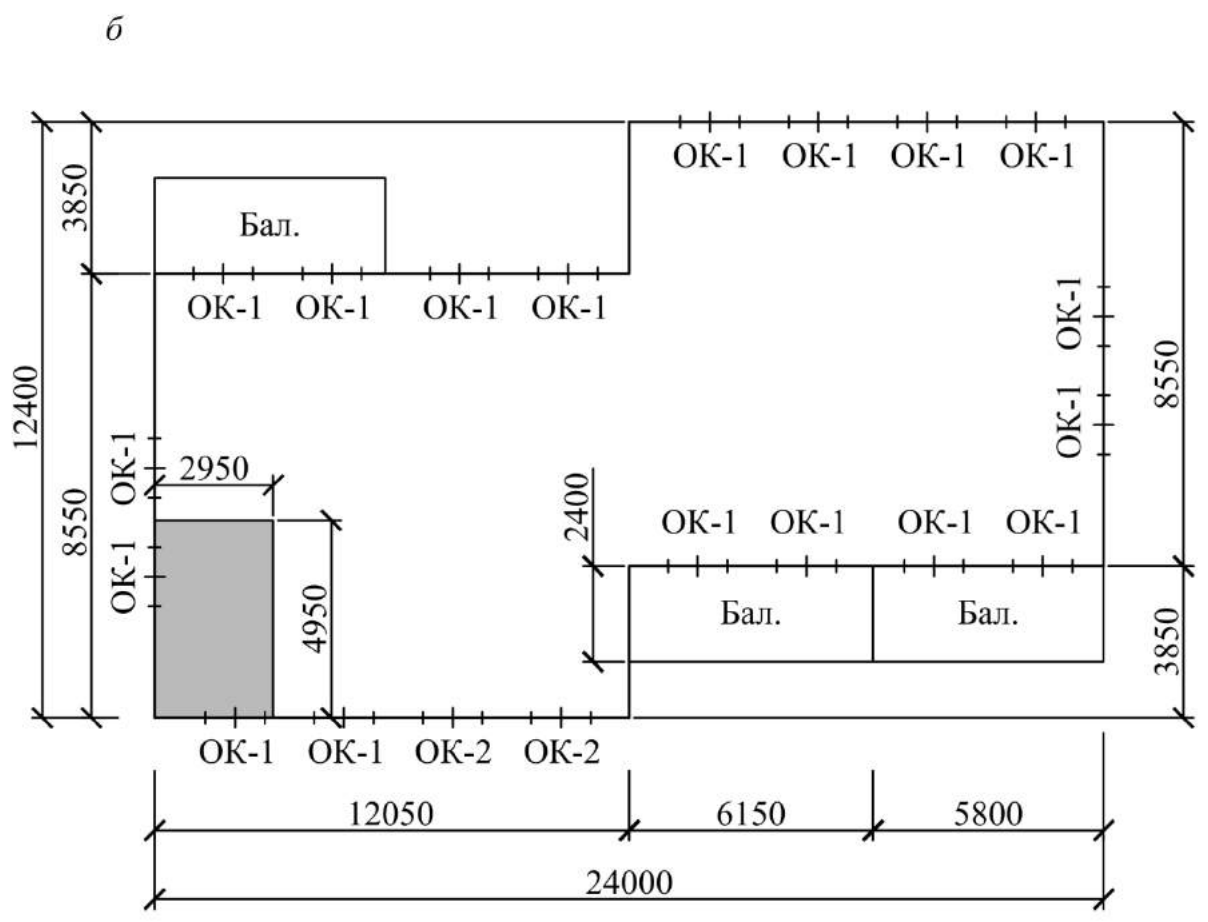
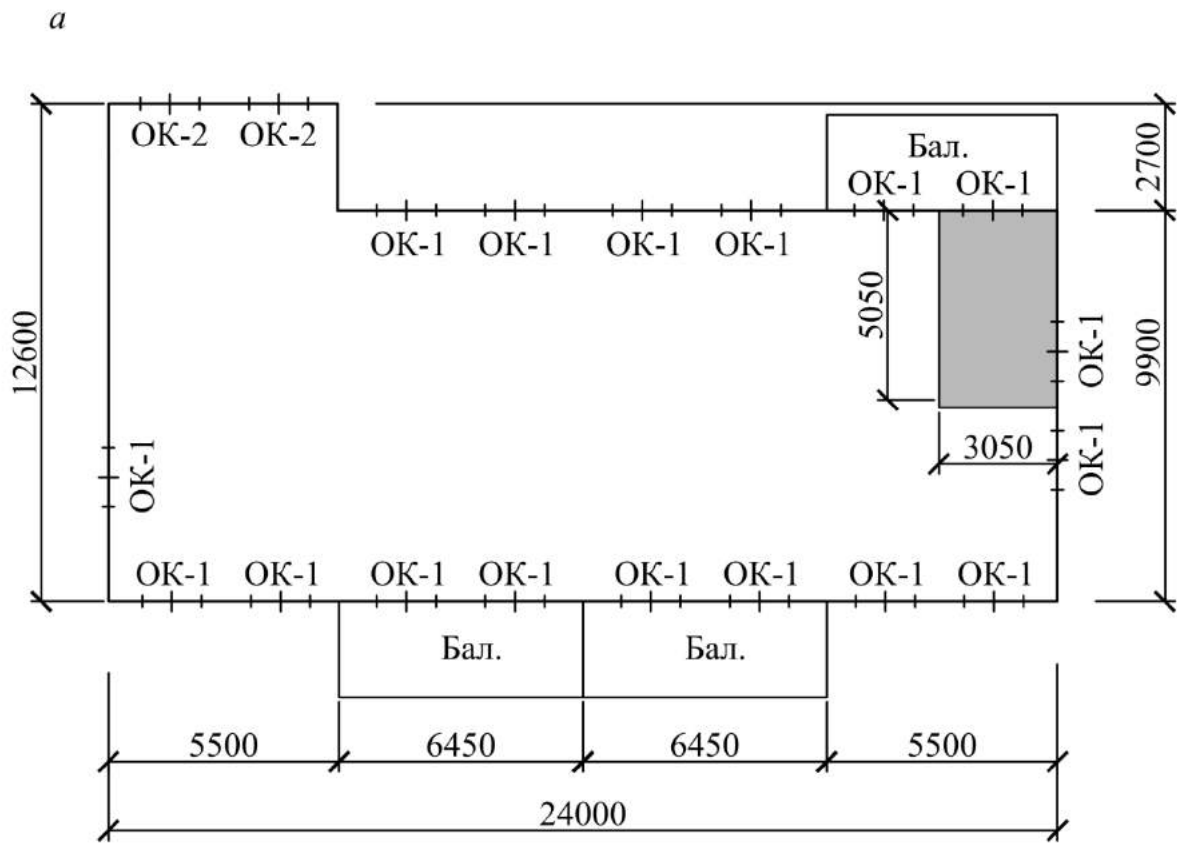
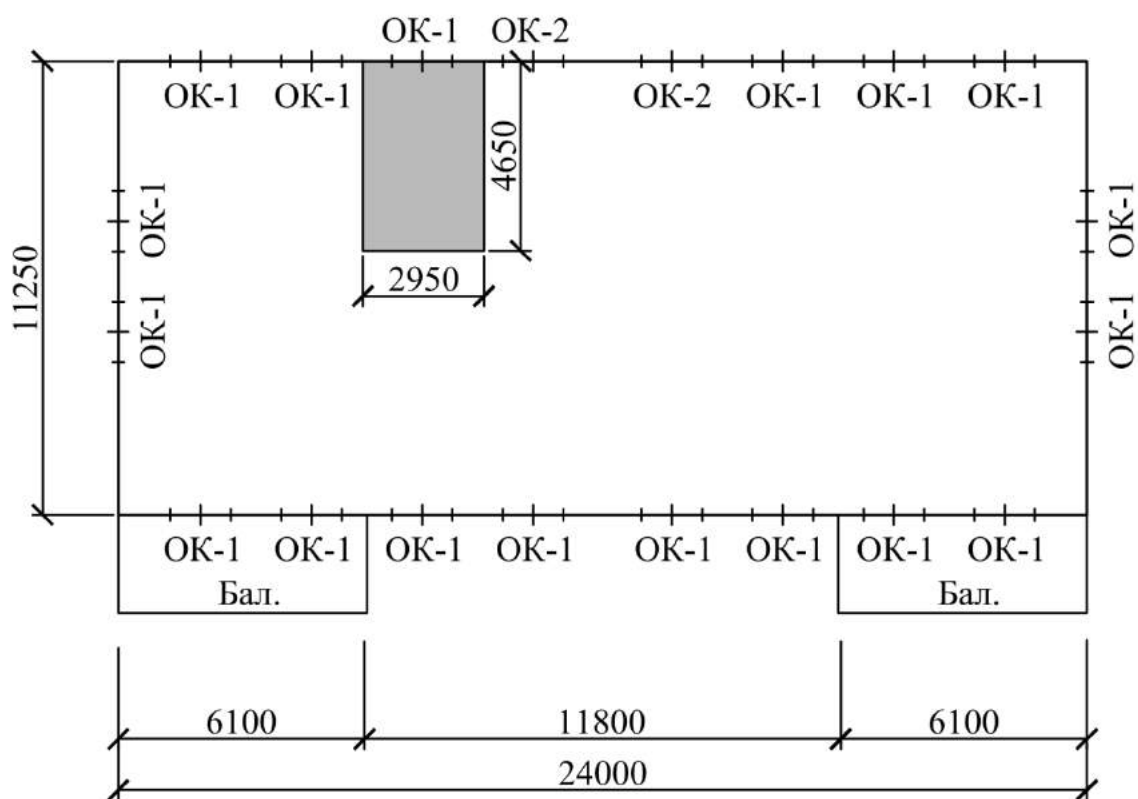


Рис. Б.4. Варианты: *a* – № 7; *б* – № 8

*a*



*б*

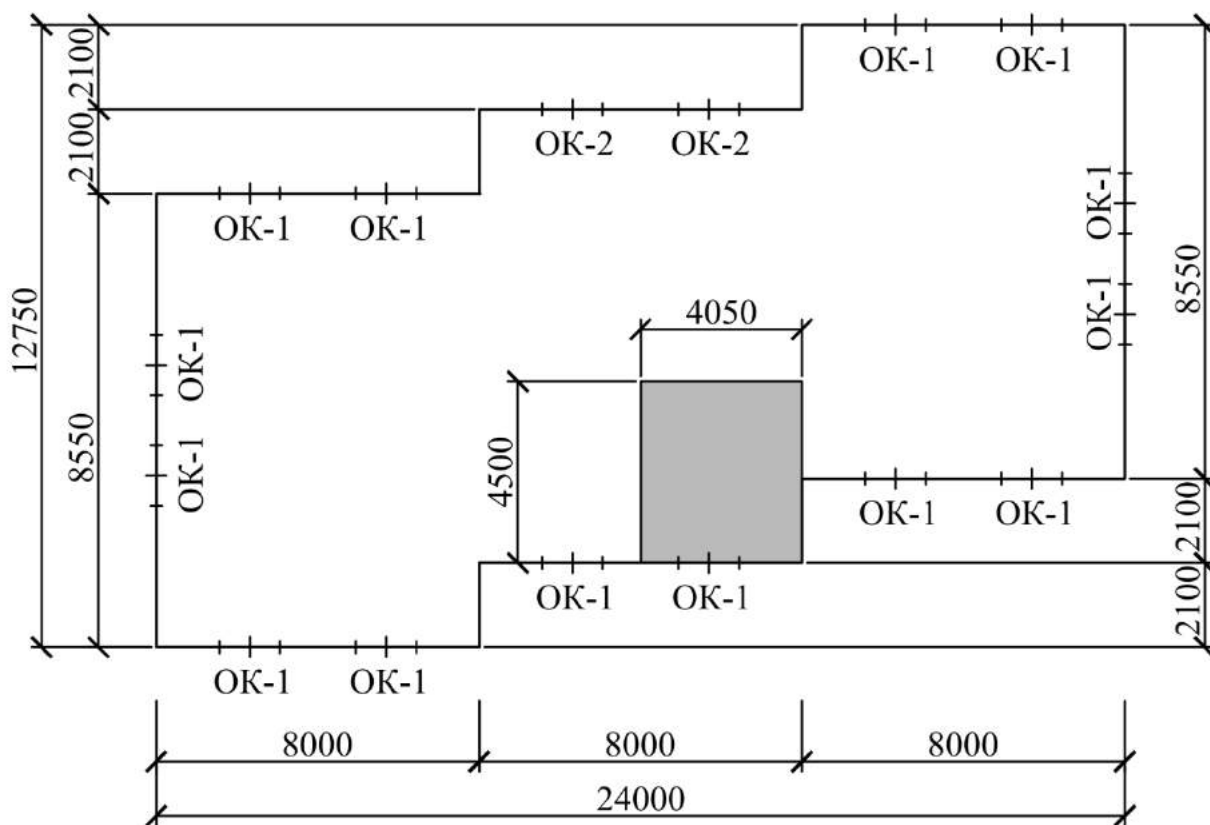


Рис. Б.5. Варианты: *a* – № 9; *б* – № 10



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Значения показателей $A, B$ для теплотехнических неоднородностей в конструкции трехслойных стен с эффективным утеплителем

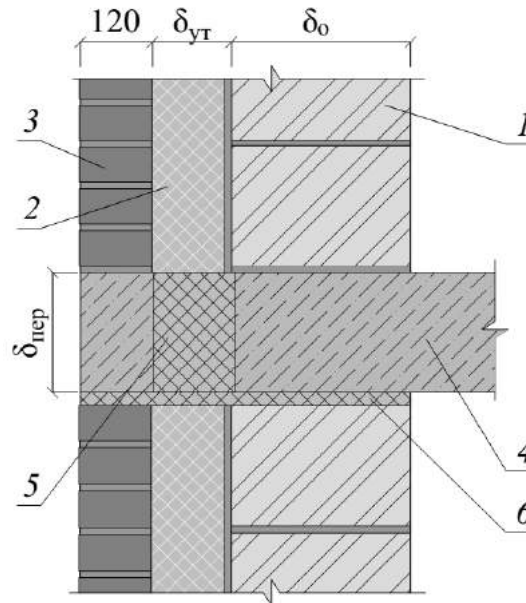


Рис. В.1. Схема узла сопряжения трехслойной стены с плитой перекрытия: 1 – основание (кирпичная кладка); 2 – тепловая изоляция; 3 – облицовочный кирпич; 4 – плита перекрытия; 5 – перфорация (5/1); 6 – прокладка

Таблица В.1

Значения показателей  $A, B$  для узла сопряжения плиты перекрытия со стеной.  
Трехслойная стена с облицовкой кирпичом. Перфорация 5/1

$\lambda_o,$ Вт/(м·°С)	При $\delta_{пер} = 160$ мм:				При $\delta_{пер} = 210$ мм:			
	$1,22 \leq R_{ут} < 2,44$		$2,44 \leq R_{ут} \leq 6,1$		$1,22 \leq R_{ут} < 2,44$		$2,44 \leq R_{ут} \leq 6,1$	
	$A$	$B$	$A$	$B$	$A$	$B$	$A$	$B$
1,8	0,0270	-0,017	0,0131	0,0170	0,0402	0,0480	0,0145	0,0147
1,7	0,0260	-0,0138	0,0129	0,0181	0,0387	0,0439	0,0143	0,0156
1,6	0,0249	-0,0107	0,0126	0,0192	0,0372	0,0398	0,014	0,0166
1,5	0,0238	-0,0075	0,0124	0,0203	0,0357	0,0358	0,0138	0,0176
1,4	0,0227	-0,0043	0,0121	0,0214	0,0342	0,0317	0,0136	0,0186
1,3	0,0216	-0,0012	0,0119	0,0226	0,0327	0,0276	0,0133	0,0195
1,2	0,0205	0,0020	0,0116	0,0237	0,0311	0,0235	0,0131	0,0205
1,1	0,0194	0,0052	0,0114	0,0248	0,0296	0,0194	0,0129	0,0215
1	0,0183	0,0083	0,0111	0,0259	0,0281	0,0153	0,0127	0,0224
0,9	0,0172	0,0115	0,0109	0,0270	0,0266	0,0113	0,0124	0,0234
0,8	0,0161	0,0147	0,0106	0,0281	0,0251	0,0072	0,0122	0,0244
0,7	0,0150	0,0178	0,0104	0,0292	0,0236	0,0031	0,012	0,0254
0,6	0,0139	0,0210	0,0101	0,0303	0,0221	0,001	0,0117	0,0263
0,5	0,0084	0,0398	0,0089	0,0386	0,0145	0,0248	0,0109	0,0338
0,4	0,0029	0,0525	0,0077	0,0468	0,0070	0,0485	0,01	0,0412
0,3	-0,0027	0,0773	0,0064	0,0551	-0,0006	0,0723	0,0091	0,0486
0,2	-0,0082	0,0960	0,0052	0,0633	0,0052	0,0633	0,0082	0,0560

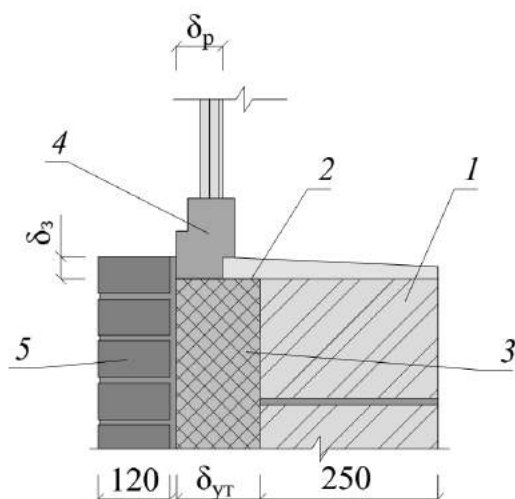


Рис. В.2. Схема узла примыкания оконного блока к трехслойной стене с эффективным утеплителем: 1 – основание (кирпичная кладка); 2 – крепеж; 3 – тепловая изоляция; 4 – рама оконного блока; 5 – облицовочный кирпич

Таблица В.2

Значения показателей  $A$ ,  $B$  для узла примыкания оконного блока к трехслойной стене

$\delta_p$ , мм	$1,5 \leq R_{yt} < 3,0$		$3,0 \leq R_{yt} < 6,0$	
	$A$	$B$	$A$	$B$
60	-	0,121	0,0037	0,110
70	-	0,1125	0,0035	0,102
80	-	0,1040	0,0033	0,094
90	-0,0007	0,0998	0,0036	0,087
100	-0,0013	0,0955	0,0038	0,080
110	-0,0020	0,0913	0,0041	0,073
120	-0,0027	0,0870	0,0043	0,066

Таблица В.3

Значения показателей  $A$ ,  $B$  для выпуклого и вогнутого углов трехслойной стены

$\lambda_o$ , Вт/(м·°С)	Выпуклый угол				Вогнутый угол			
	$1,5 \leq R_{yt} < 3$		$3 \leq R_{yt} \leq 6$		$1,5 \leq R_{yt} < 3$		$3 \leq R_{yt} \leq 6$	
	$A$	$B$	$A$	$B$	$A$	$B$	$A$	$B$
1,5	-0,0497	0,2918	-0,0175	0,1953	0,0697	-0,4035	0,0211	-0,2578
1,4	-0,0476	0,2830	-0,0170	0,1913	0,0680	-0,3970	0,0208	-0,2553
1,3	-0,0454	0,2743	-0,0165	0,1874	0,0663	-0,3905	0,0205	-0,2529
1,2	-0,0433	0,2655	-0,016	0,1835	0,0647	-0,3840	0,0202	-0,2505
1,1	-0,0412	0,2568	-0,0155	0,1796	0,0630	-0,3775	0,0199	-0,2481
1	-0,0391	0,248	-0,0150	0,1757	0,0613	-0,3710	0,0196	0,2457
0,9	-0,0370	0,2393	-0,0145	0,1718	0,0597	-0,3645	0,0193	-0,2433
0,8	-0,0349	0,2305	-0,0140	0,1678	0,0580	-0,3580	0,0189	-0,2408
0,7	-0,0328	0,2218	-0,0135	0,1639	0,0563	-0,3515	0,0186	-0,2384
0,6	-0,0307	0,2130	-0,0130	0,1600	0,0547	-0,3450	0,0183	-0,236
0,5	-0,0250	0,1848	-0,0111	0,1430	0,0470	-0,3120	0,0164	-0,2203
0,4	-0,0193	0,1565	-0,0092	0,1260	0,0393	-0,2790	0,0145	-0,2045
0,3	-0,0137	0,1283	-0,0073	0,1090	0,0317	-0,2460	0,0126	-0,1888
0,2	-0,0080	0,1000	-0,0053	0,0920	0,0240	-0,2130	0,0107	-0,173

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ.....	6
1.1. Тепловой режим помещения .....	6
1.2. Теплопроводность.....	8
1.3. Лучистый теплообмен в помещении.....	12
1.4. Конвективный теплообмен в помещении.....	17
1.5. Общий теплообмен на поверхности в помещении.....	21
1.6. Тепловой баланс воздуха в помещении.....	21
1.7. Полная система уравнений общего теплообмена в помещении.....	23
1.8. Одно уравнение общего теплообмена в помещении (уравнение профессора В.Н. Богословского).....	24
1.9. Расчетные внутренние тепловые условия.....	26
1.10. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	33
Глава 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДЕНИЯ.....	35
2.1. Уравнение теплопроводности.....	35
2.2. Теплофизические характеристики строительных материалов.....	38
2.3. Основы термодинамики влажного материала.....	39
2.4. Учет влажностного режима при расчете теплопередачи через ограждения.....	43
2.5. Сопротивление паропрооницанию ограждающих конструкций.....	45
2.6. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	48
Глава 3. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ.....	50
3.1. Одномерное температурное поле.....	50
3.2. Особенности теплопередачи через отдельные конструкции ограждений при стационарном режиме.....	53
3.3. Приведенное сопротивление теплопередаче сложного ограждения.....	54
3.4. Теплопередача герметичной и вентилируемой воздушных прослоек.....	56
3.5. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	62
Глава 4. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЕ.....	63
4.1. Инженерный метод расчета теплоустойчивости ограждения.....	63
4.2. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	67
Глава 5. ЗИМНИЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЯ.....	69
5.1. Характеристики наружного климата.....	69
5.2. Нормирование и расчет теплозащитных свойств ограждения.....	70
5.3. Определение потерь теплоты помещением.....	79
5.4. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	81

Глава 6. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ПОМЕЩЕНИЯ.....	83
6.1. Колебания температуры воздуха и теплопоглощение ограждением.....	83
6.2. Прерывистые поступления лучистой и конвективной теплоты.....	86
6.3. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	90
Глава 7. ПРАКТИКУМ ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОФИЗИКЕ.....	91
7.1. Выбор исходных данных для проектирования теплового контура здания.....	91
7.1.1. Определение режима эксплуатации наружных ограждающих конструкций.....	91
7.1.2. Определение требуемого приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций.....	92
7.1.3. Расчет нормируемой удельной теплозащитной характеристики теплового контура здания.....	93
7.1.4. Расчет нормативного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций.....	94
7.2. Определение фактических теплозащитных характеристик теплового контура здания.....	100
7.2.1. Расчет фактического приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций.....	100
7.2.1.1. Наружная стена.....	101
7.2.1.2. Перекрытие чердачное и над неотапливаемыми подвалами.....	105
7.2.1.3. Входная дверь в подъезд.....	107
7.2.2. Определение класса энергосбережения здания.....	107
7.2.3. Пример определения приведенного сопротивления теплопередаче пустотной железобетонной плиты.....	109
7.3. Расчет теплового, воздушного и влажностного режима наружных ограждающих конструкций здания.....	112
7.3.1. Расчет распределения температуры по сечению наружного ограждения.....	112
7.3.2. Определение воздухопроницаемости наружной стены.....	113
7.3.3. Расчет защиты наружной стены от переувлажнения.....	115
7.3.4. Оценка теплоусвоения поверхности пола.....	123
7.3.5. Построение кривых изменения температуры по сечению наружной стены во времени после выключения системы отопления помещений в холодный период.....	126
7.4. Расчет теплового режима помещения.....	128
7.4.1. Определение основных потерь теплоты помещением.....	128
7.4.2. Определение температуры нагретой поверхности.....	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	152

Бодров Валерий Иосифович  
Бодров Михаил Валерьевич  
Бодрова Валентина Фёдоровна  
Кузин Виктор Юрьевич

# Строительная теплофизика

Учебное пособие

Редактор  
Т.Л. Батаева

Подписано в печать 04.10.15. Формат 60×90, 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Уч. изд. л. 9,4. Усл. печ. л. 9,8. Тираж 300 экз. Заказ № 13.

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.  
<http://www.nngasu.ru>

Типография «Юнион Принт», 603002, г. Нижний Новгород, ул. Окский съезд, д. 2