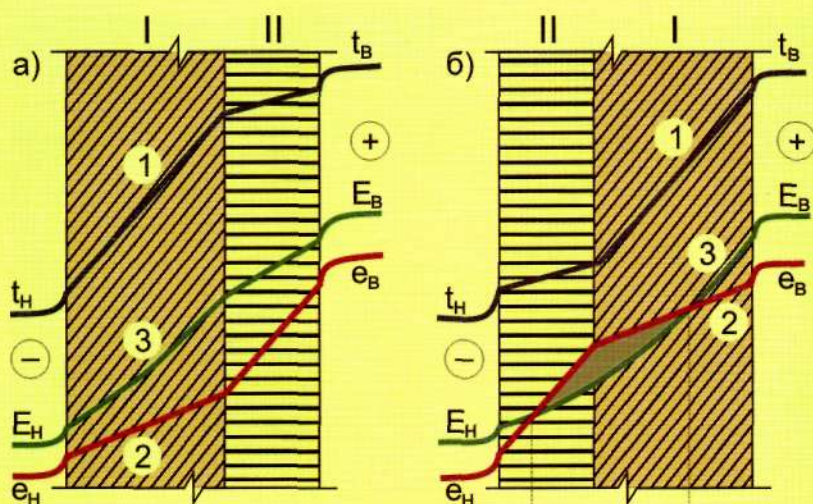


Е.Г. Малявина

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Учебное пособие



Москва 2011

Е.Г. Малявина

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ
по образованию в области строительства в качестве учебного
пособия для студентов, обучающихся по специальности 270109
«Теплогазоснабжение и вентиляция» направления 270100
«Строительство»

МОСКВА 2011

Рецензенты:

член-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией строительной теплофизики НИИСФ РААСН *В.Г. Гагарин*;
начальник отдела инженерных систем ЗАО «Промстройпроект»
канд. техн. наук, доцент *И.К. Васильев*, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции МГАКХиС *А.В. Кутайцев*

Малявина Е.Г.

Строительная теплофизика: Учебное пособие /Моск. гос. строит. ун-т. - М.: МГСУ, 2011. – 152 с.

Учебное пособие к курсу «Строительной теплофизики» рассчитано на студентов, строительных вузов, обучающихся по специальности 290100 (653500) – Строительство; 270109 (290700) – Теплогазоснабжение и вентиляция и может быть полезно инженерам, занимающимся теплотехническим проектированием или теплотехнической оценкой запроектированных ограждающих конструкций здания.

Сведения, приведенные в учебном пособии, базируются как на фундаментальной базе процессов, лежащих в основе теплотехнического проектирования элементов здания, так и действующих нормах.

© Малявина Е.Г., 2011
© МГСУ, 2011.

ВВЕДЕНИЕ

Цель и задачи курса. Учебное пособие по курсу «Строительная теплофизика» предназначено для студентов, изучающих в рамках специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» одноименную дисциплину. Содержание пособия соответствует программе дисциплины и в значительной мере ориентировано на курс лекций, читаемый в МГСУ.

Цель курса – с помощью системного изложения сформировать подход к физической сущности тепло-воздушного и влажностного режимов здания как к основе технологии обеспечения микроклимата.

В задачи дисциплины входит: формирование общего представления о теплотехнической роли внешней оболочки здания и работе инженерных систем, обеспечивающих его микроклимат, как о единой энергетической системе; обучение студента умению использовать теоретические положения и методы расчета в дальнейшей профессиональной работе, т.е. при проектировании и эксплуатации систем обеспечения микроклимата здания.

В результате освоения дисциплины студент должен знать понятия, определяющие тепловой, воздушный и влажностный режимы здания, включая климатологическую и микроклиматическую терминологию; законы передачи теплоты, влаги, воздуха в материалах, конструкциях и элементах систем здания и величины, определяющие тепловые и влажностные процессы; нормы теплозащиты наружных ограждающих конструкций, нормирование параметров наружной и внутренней среды здания. Студент должен уметь формулировать и решать задачи передачи теплоты и массы во всех элементах здания и демонстрировать способность и готовность вести поверочный расчет защитных свойств наружных ограждений, и расчет коэффициентов лучистого и конвективного теплообмена на поверхностях, обращенных в помещение.

Предмет курса. Строительная теплофизика изучает процессы передачи теплоты, переноса влаги, фильтрации воздуха применительно к строительству.

В основном строительная теплофизика изучает процессы, происходящие на поверхностях и в толще ограждающих конст-

рукций здания. Причем, по установившейся традиции и для краткости, часто *ограждающие конструкции здания* называются просто *ограждениями*. Причем, значительное место в строительной теплофизике отведено *наружным ограждениям*, которые отделяют отапливаемые помещения от наружной среды или от неотапливаемых помещений (неотапливаемых техподполий, подвалов, чердаков, тамбуров и т.п.)

Несмотря на то, что наука относится в основном к ограждающим конструкциям здания, *для специалистов по отоплению и вентиляции строительная теплофизика очень важна*. Дело в том, что строительная теплофизика имеет дело с *теплозащитой здания*, т.е. в соответствии с [30] с теплозащитными свойствами совокупности наружных и внутренних ограждающих конструкций здания, обеспечивающими заданный уровень расхода тепловой энергии зданием, с воздухопроницаемостью ограждений и защитой их от переувлажнения. Таким образом, строительная теплофизика важна потому что, во-первых, от теплотехнических качеств наружных ограждений зависят теплопотери здания, влияющие на мощность отопительных систем и расход теплоты ими за отопительный период. Во-вторых, влажностный режим наружных ограждений влияет на их теплозащиту, а, следовательно, на мощность систем, обеспечивающих заданный микроклимат здания. В-третьих, коэффициенты теплообмена на внутренней поверхности наружных ограждений играют роль не только в оценке общего приведенного сопротивления теплопередаче конструкции, но и в оценке температуры на внутренней поверхности этого ограждения. В-четвертых, «плотные» окна имеют вполне определенное сопротивление воздухопроницанию. И при «плотных» окнах в малоэтажных зданиях до 5 этажей инфильтрацией в расчете теплопотерь можно пренебречь, а в более высоких на нижних этажах она уже будет ощутимой. В-пятых, от воздушного режима здания зависит не только наличие или отсутствие инфильтрации, но и работа систем вентиляции, особенно естественных. В-шестых, радиационная температура внутренних поверхностей наружных и внутренних ограждений, важнейшая составляющая оценки микроклимата помещений, в основном является производной от теплозащиты здания. В-седьмых, теплоустойчивость ограждений и помещений влияет на постоянство темпера-

туры в помещениях при переменных тепловых воздействиях на них, особенно в современных зданиях, в которых воздухообмен близок к минимальной норме наружного воздуха.

В проектировании и теплотехнической оценке наружных ограждений имеется ряд особенностей. Утепление здания - дорогостоящая и ответственная составляющая современного строительства, поэтому важно обоснованно принимать толщину утеплителя. *Специфика сегодняшнего теплотехнического расчета* наружных ограждений [31] связана:

- во-первых, с повысившимися требованиями к теплозащите зданий;

- во-вторых, с необходимостью учитывать роль эффективных утеплителей в ограждающих конструкциях, коэффициенты теплопроводности которых настолько малы, что требуют очень аккуратного отношения к подтверждению их величин в эксплуатационных условиях;

- в-третьих, с тем, что в ограждениях появились различные связи, сложные примыкания одного ограждения к другому, снижающие сопротивление теплопередаче ограждения. Оценка влияния различного рода теплопроводных включений на теплозащиту зданий требует опоры на специальные подробные исследования.

Здание как единая энергетическая система. Совокупность всех факторов и процессов (внешних и внутренних воздействий), влияющих на формирование теплового микроклимата помещений, называется *тепловым режимом здания*.

Ограждения не только защищают помещение от наружной среды, но и обмениваются с ним теплотой и влагой, пропускают воздух сквозь себя как внутрь, так и наружу. Задача поддержания заданного теплового режима помещений здания (поддержания на необходимом уровне температуры и влажности воздуха, его подвижности, радиационной температуры помещения) возлагается на инженерные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Однако определение тепловой мощности и режима работы этих систем невозможно без учета влияния тепловлагозащитных и теплоинерционных свойств ограждений. Поэтому *система кондиционирования микроклимата помещений* включает в себя все инженерные средства, обеспечивающие заданный

микроклимат обслуживаемых помещений: ограждающие конструкции здания и инженерные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Таким образом, современное здание – сложная взаимосвязанная система тепломассообмена – единая энергетическая система.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что изучается в строительной теплофизике?
2. Что такое ограждение?
3. Что такое наружное ограждение?
4. Чем важна строительная теплофизика для специалиста по отоплению и вентиляции?
5. Что такое тепловая защита здания?
6. В чем специфика теплотехнического расчета современных зданий?
7. Что такое тепловой режим здания?
8. Какую роль играют ограждающие конструкции в тепловом режиме здания?
9. Какие параметры внутренней среды поддерживаются системами отопления и вентиляции?
10. Что такое система кондиционирования микроклимата здания?
11. Почему здание считается единой энергетической системой?

1. ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ

1.1. ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЗДАНИИ

Перемещение теплоты всегда происходит от более теплой среды к более холодной. Процесс переноса теплоты из одной точки пространства в другую за счет разности температуры называется **теплопередачей** и является собирательным, так как включает в себя три элементарных вида теплообмена: **теплопроводность (кондукцию), конвекцию и излучение**. Таким образом, **потенциалом** переноса теплоты является **разность температур**.

1.1.1. Теплопроводность

Теплопроводность – вид передачи теплоты между неподвижными частицами твердого, жидкого или газообразного вещества. Таким образом, теплопроводность – 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 строение 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, потому что чем больше поры, тем больше разность температуры на ее стенках. При рассмотрении теплопроводности характеристики этого процесса относят к общей массе вещества: скелету и порам совместно.

Ограждающие конструкции здания, как правило, являются **плоско-параллельными стенками**, теплоперенос в которых

осуществляется в одном направлении. Кроме того, обычно при 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:

$$q_T = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (1.1)$$

где q_T – **поверхностная плотность теплового потока**, проходящего через плоскость, перпендикулярную **тепловому потоку**, Вт/м²;

λ – **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 (1.1), показывает, что увеличение теплового потока не совпадает с увеличением температуры.

Теплопроводность λ является одной из основных тепловых характеристик материала. Как следует из уравнения (1.1), теплопроводность материала – это мера проводимости теплоты материалом, численно равная тепловому потоку, проходящему сквозь 1 м² площади, перпендикулярной направлению потока, при градиенте температуры вдоль потока, равном 1 °C/м (рис. 1). Чем больше значение λ , тем интенсивнее в таком материале процесс теплопроводности, больше тепловой поток. Поэтому теплоизоляционными материалами принято считать материалы с теплопроводностью менее 0,3 Вт/(м·°C).

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. К.Ф. Фокин [38] для примера

приводит такие данные: теплопроводность абсолютно плотного вещества (без пор) в зависимости от природы имеет теплопроводность от 0,1 Вт/(м·°C) (у пластмассы) до 14 Вт/(м·°C) (у кристаллических веществ при потоке теплоты вдоль кристаллической поверхности), в то время как воздух имеет теплопроводность около 0,026 Вт/(м·°C). Чем выше плотность материала (меньше пористость), тем больше значение его теплопроводности. Понятно, что легкие теплоизоляционные материалы имеют сравнительно небольшую плотность.

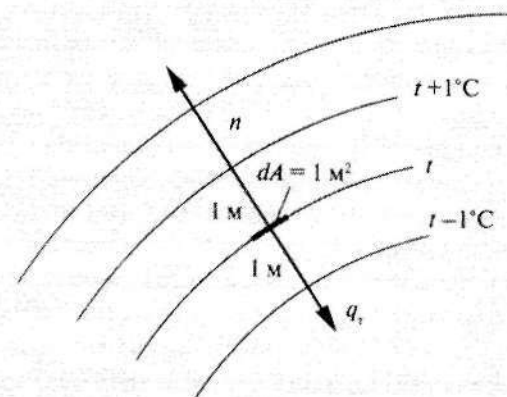


Рис. 1. Направления теплового потока и градиента температуры:
——— - изотермы

Различия в пористости и в теплопроводности скелета приводят к различию в теплопроводности материалов, даже при одинаковой их плотности. Например, следующие материалы (табл. 1) при одной и той же плотности, $\rho_0=1800 \text{ кг/м}^3$, имеют различные значения теплопроводности [38]:

Т а б л и ц а 1

Теплопроводность материалов с одинаковой плотностью 1800 кг/м³ [38]

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

С уменьшением плотности материала его теплопроводность λ уменьшается, так как 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°C в порах диаметром 1 мм теплопроводность излучением составляет 0,0007 Вт/(м·°C), диаметром 2 мм – 0,0014 Вт/(м·°C) и т.д. 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°C, на значения их при 0°C служит эмпирическая формула О.Е. Власова [3]:

$$\lambda_0 = \lambda_t / (1 + \beta t), \quad (1.2)$$

где λ_0 – теплопроводность материала при 0 °C;

λ_t – теплопроводность материала при t °C;

β – температурный коэффициент изменения теплопроводности, 1/°C, для различных материалов, равный около 0,0025 1/°C;

t – температура материала, при которой его коэффициент теплопроводности равен λ_t .

Для плоской однородной стенки толщиной δ (рис. 2) тепловой поток, Вт/м², передаваемый теплопроводностью через однородную стенку, может быть выражен уравнением:

$$q_T = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta \lambda}, \quad (1.3)$$

где τ_1, τ_2 – значения температуры на поверхностях стенки, °C.

Из выражения (1.3) следует, что распределение температуры по толщине стенки линейное. Величина δ/λ названа *термическим сопротивлением материального слоя* и обозначена R_T , м²·°C/Вт:

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (1.4)$$

Следовательно, тепловой поток q_T , Вт/м², через однородную плоскопараллельную стенку толщиной δ , м, из материала с теплопроводностью λ , Вт/м·°C, можно записать в виде

$$q_T = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R_T}, \quad (1.5)$$

Термическое сопротивление слоя – это сопротивление теплопроводности, равное разности температуры на противоположных поверхностях слоя при прохождении через него теплового потока с поверхностной плотностью 1 Вт/м².

Теплообмен теплопроводностью имеет место в материальных слоях ограждающих конструкций здания.

1.1.2. Конвекция

Конвекция – перенос теплоты движущимися частицами вещества. Конвекция имеет место только в жидких и газообразных веществах, а также между жидкой или газообразной средой и поверхностью твердого тела. При этом происходит передача теплоты и теплопроводностью. Совместное воздействие конвекции и теплопроводности в пограничной области у поверхности называют конвективным теплообменом.

Конвекция имеет место на наружной и внутренней поверхностях ограждений здания. В теплообмене внутренних поверхностей помещения конвекция играет существенную роль. При различных значениях температуры поверхности и прилегающего к ней воздуха происходит переход теплоты в сторону меньшей температуры. Тепловой поток, передаваемый конвекцией, зави-

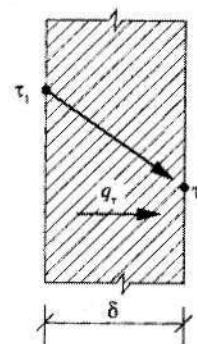


Рис. 2. Распределение температуры в плоской однородной стенке

сит от режима движения жидкости или газа, омывающих поверхность, от температуры, плотности и вязкости движущейся среды, от шероховатости поверхности, от разности между температурами поверхности и омывающей ее среды.

Процесс теплообмена между поверхностью и газом (или жидкостью) протекает по-разному в зависимости от природы возникновения движения газа. Различают *естественную и вынужденную конвекцию*. В первом случае движение газа происходит за счет разности температуры поверхности и газа, во втором – за счет внешних для данного процесса сил (работы вентиляторов, ветра).

Вынужденная конвекция в общем случае может сопровождаться процессом естественной конвекции, но так как интенсивность вынужденной конвекции заметно превосходит интенсивность естественной, то при рассмотрении вынужденной конвекции естественной часто пренебрегают.

В дальнейшем будут рассматриваться только стационарные процессы конвективного теплообмена, предполагающие постоянство во времени скорости и температуры в любой точке воздуха. Но так как температура элементов помещения изменяется довольно медленно, полученные для стационарных условий зависимости могут быть распространены и на процесс *нестационарного теплового режима помещения*, при котором в каждый рассматриваемый момент процесс конвективного теплообмена на внутренних поверхностях ограждений считается стационарным. Полученные для стационарных условий зависимости могут быть распространены и на случай внезапной смены природы конвекции от естественной к вынужденной, например, при включении в помещении рециркуляционного аппарата нагрева помещения (фанкойла или сплит-системы в режиме теплового насоса). Во-первых, новый режим движения воздуха устанавливается быстро и, во-вторых, требуемая точность инженерной оценки процесса теплообмена ниже возможных неточностей от отсутствия коррекции теплового потока в течение переходного состояния.

Для инженерной практики расчетов для отопления и вентиляции важен конвективный теплообмен между поверхностью ограждающей конструкции или трубы и воздухом (или жидкостью).

В практических расчетах для оценки конвективного теплового потока (рис. 3) применяют уравнения Ньютона:

$$q_k = \alpha_k (t_a - \tau), \quad (1.6)$$

где q_k – тепловой поток, Вт, передаваемый конвекцией от движущейся среды к поверхности или наоборот;

$t_{вз}$ – температура воздуха, омывающего поверхность стенки, °С;

τ – температура поверхности стенки, °С;

α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности стенки, Вт/(м²·°С).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k – физическая величина, численно равная количеству теплоты, передаваемой от воздуха к поверхности твердого тела путем конвективного теплообмена при разности между температурой воздуха и температурой поверхности тела, равной 1°С.

При таком подходе вся сложность физического процесса конвективного переноса теплоты заключена в коэффициенте теплоотдачи α_k . Естественно, что величина этого коэффициента является функцией многих аргументов. Для практического использования принимаются весьма приближенные значения α_k .

Уравнение (1.5) удобно переписать в виде:

$$q_k = \frac{t_{вз} - \tau}{R_{конв}}, \quad (1.7)$$

где $R_{конв}$ – *сопротивление конвективной теплоотдаче* на поверхности ограждающей конструкции, м²·°С/Вт, равное разности температуры на поверхности ограждения и температуры воздуха при прохождении теплового потока с поверхностной плотностью 1 Вт/м² от поверхности к воздуху или наоборот.

Сопротивление $R_{конв}$ является величиной обратной коэффициенту конвективной теплоотдачи α_k :

$$R_{конв} = \frac{1}{\alpha_k}. \quad (1.8)$$

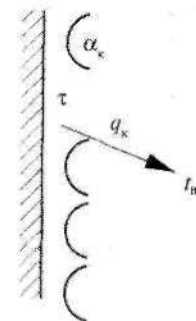


Рис. 3. Конвективный теплообмен стенки с воздухом

этом доля теплоты, передаваемой путем теплопроводности, падает от 38% до 2%, а доля конвективного теплового потока возрастает с 2% до 20% [38].

Прямой расчет этих составляющих достаточно громоздок. Поэтому в нормативных документах [32] приводятся данные о термических сопротивлениях замкнутых воздушных прослоек, которые в 50-х гг. XX в. были составлены К.Ф. Фокиным [38] по результатам экспериментов М.А. Михеева [21]. При наличии на одной или обеих поверхностях воздушной прослойки теплоотражающей алюминиевой фольги термическое сопротивление следует увеличить в два раза. Дело в том, что алюминиевая фольга затрудняет лучистый теплообмен между поверхностями, обрамляющими воздушную прослойку.

Для увеличения термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек в [38] рекомендуется иметь в виду следующие выводы из исследований:

- 1) эффективными в теплотехническом отношении являются прослойки небольшой толщины, так как в них затруднен конвективный теплообмен;
- 2) рациональнее делать в ограждении несколько прослоек малой толщины, чем одну большой;
- 3) воздушные прослойки желательно располагать ближе к наружной поверхности ограждения, так как при этом в зимнее время уменьшается тепловой поток излучением;
- 4) вертикальные прослойки в наружных стенах необходимо перегораживать горизонтальными диафрагмами на уровне междуэтажных перекрытий;
- 5) для сокращения теплового потока, передаваемого излучением, можно одну из поверхностей прослойки покрывать алюминиевой фольгой, имеющей коэффициент излучения около $\varepsilon=0,05$. Покрывание фольгой обеих поверхностей воздушной прослойки практически не уменьшает передачу теплоты по сравнению с покрытием одной поверхности.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что является потенциалом переноса теплоты?
2. Перечислите элементарные виды теплообмена.

3. Что такое теплопередача?
4. Что такое теплопроводность?
5. Что такое коэффициент теплопроводности материала?
6. Напишите формулу теплового потока, передаваемого теплопроводностью в многослойной стенке при известных температурах внутренней t_v и наружной t_n поверхностей.
7. Что такое термическое сопротивление?
8. Что такое конвекция?
9. Напишите формулу теплового потока, передаваемого конвекцией от воздуха к поверхности.
10. Физический смысл коэффициента конвективной теплоотдачи.
11. Что такое излучение?
12. Напишите формулу теплового потока, передаваемого излучением от одной поверхности к другой.
13. Физический смысл коэффициента лучистой теплоотдачи.
14. Как называется сопротивление теплопередаче замкнутой воздушной прослойки в ограждающей конструкции?
15. Какой природы тепловые потоки составляют общий тепловой поток через воздушную прослойку?
16. Какой природы тепловой поток преобладает в потоке через воздушную прослойку?
17. Как влияет толщина воздушной прослойки на распределение потоков в ней.
18. Как уменьшить тепловой поток через воздушную прослойку?

1.1.5. Коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях

Рассмотрим стенку, отделяющую помещение с температурой t_v от наружной среды с температурой t_n . Наружная поверхность путем конвекции обменивается теплотой с наружным воздухом, а лучистой – с окружающими поверхностями, имеющими температуру $t_{окр.в}$. То же самое и с внутренней стороны. Можно записать, что тепловой поток с плотностью q , Вт/м², проходящий сквозь стену, равен

$$q = \alpha_{к.в}(t_v - \tau_v) + \alpha_{л.в}(t_{окр.в} - \tau_v); \quad q = \alpha_{к.н}(t_n - \tau_n) + \alpha_{л.н}(t_{окр.н} - \tau_n), \quad (1.13)$$

где $t_{окр.в}$ и $t_{окр.н}$ – температура поверхностей, окружающих соответственно внутреннюю и наружную плоскости рассматриваемой стенки, °С;

$\alpha_{к.в}$, $\alpha_{к.н}$ — коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$;

$\alpha_{л.в}$, $\alpha_{л.н}$ — коэффициенты лучистой теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$.

В инженерных расчетах принято теплоотдачу на поверхностях ограждающих конструкций не разделять на лучистую и конвективную составляющие. Считается, что на внутренней поверхности наружного ограждения в отапливаемом помещении происходит тепловосприятие, оцениваемое общим коэффициентом $\alpha_{в}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$, а на наружной поверхности — теплоотдача, интенсивность которой определяется коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{н}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$.

Кроме того, принято считать, что температура воздуха и окружающих поверхностей равны друг другу: $t_{окр.в} = t_{в}$, а $t_{окр.н} = t_{н}$, т.е.

$$q = \alpha_{в}(t_{в} - \tau_{в}); \quad q = \alpha_{н}(t_{н} - \tau_{н}), \quad (1.14)$$

Следовательно, принимается, что **коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхностях** ограждения равны сумме коэффициентов лучистого и конвективного теплообмена с каждой стороны:

$$\alpha_{в} = \alpha_{к.в} + \alpha_{л.в}; \quad \alpha_{н} = \alpha_{к.н} + \alpha_{л.н}. \quad (1.15)$$

Коэффициент теплоотдачи на наружной или внутренней поверхности по физическому смыслу — это плотность теплового потока, отдаваемого соответствующей поверхностью окружающей ее среде (или наоборот) при разности температуры поверхности и среды в 1°C .

Величины, обратные коэффициентам теплоотдачи, принято называть **сопротивлениями теплоотдаче на внутренней $R_{в}$, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$, и наружной $R_{н}$, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$, поверхностях ограждения:**

$$R_{в} = 1/\alpha_{в}; \quad R_{н} = 1/\alpha_{н}. \quad (1.16)$$

2.1.6. Теплопередача через многослойную стенку

Если с одной стороны многослойной стенки, состоящей из n слоев, поддерживается температура $t_{в}$, а с другой стороны $t_{н} < t_{в}$, то возникает тепловой поток q , $\text{Вт}/\text{м}^2$ (рис. 6).

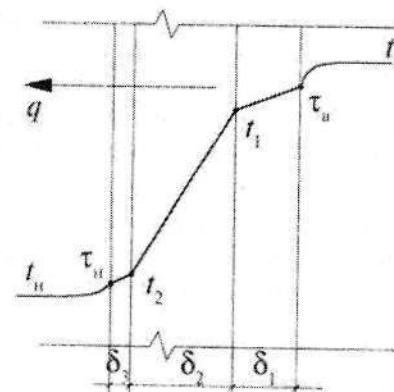


Рис. 6. Распределение температуры при теплопередаче через многослойную стену

Этот тепловой поток движется от среды с температурой $t_{в}$, °C , к среде с температурой $t_{н}$, °C , проходя последовательно от внутренней среды к внутренней поверхности с температурой $\tau_{в}$, °C :

$$q = (1/R_{в})(t_{в} - \tau_{в}), \quad (1.17)$$

затем от внутренней поверхности сквозь первый слой с термическим сопротивлением $R_{Т,1}$ к стыку первого и второго слоев:

$$q = (1/R_{Т,1})(\tau_{в} - t_1), \quad (1.18)$$

после этого через все остальные слои

$$q = (1/R_{Т,i})(t_{i-1} - t_i), \quad (1.19)$$

и, наконец, от наружной поверхности с температурой $\tau_{н}$ к наружной среде с температурой $t_{н}$:

$$q = (1/R_{н})(\tau_{н} - t_{н}), \quad (1.20)$$

где $R_{Т,i}$ — термическое сопротивление слоя с номером i , $\text{м}^2\text{°C/Вт}$;

$R_{в}$, $R_{н}$ — сопротивления теплообмену на внутренней и наружной поверхностях, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$;

t_{i-1} — температура, °C , на стыке слоев с номерами $i-1$ и i ;

t_i — температура, °C , на стыке слоев с номерами i и $i+1$.

Перепишав (1.16) — (1.19) относительно разностей температуры и сложив их, получим равенство:

$$t_{в} - t_{н} = q(R_{в} + R_{Т,1} + R_{Т,2} + \dots + R_{Т,i} + \dots + R_{Т,n} + R_{н}) \quad (1.21)$$

Выражение в скобках — сумма термических сопротивлений плоскопараллельных последовательно расположенных по ходу теплового потока слоев ограждения и сопротивлений теплообме-

ну на его поверхностях называется **общим сопротивлением теплопередаче ограждения** R_o , $\text{м}^2\text{°C/Вт}$:

$$R_o = R_e + \sum R_{T,i} + R_{in}, \quad (1.22)$$

а сумма термических сопротивлений отдельных слоев ограждения – его термическим сопротивлением R_T , $\text{м}^2\text{°C/Вт}$:

$$R_T = R_{T,1} + R_{T,2} + \dots + R_{T,n} + \dots + R_{T,n}, \quad (1.23)$$

где $R_{T,1}$, $R_{T,2}$, ..., $R_{T,n}$ – термические сопротивления отдельных плоскопараллельных последовательно расположенных по ходу теплового потока слоев ограждающей конструкции, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$, определяемые по формуле (1.4);

$R_{e,n}$ – термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$, по п. 1.1.4.

По физическому смыслу общее сопротивление теплопередаче ограждения R_o – это разность температуры сред по разные стороны ограждения, которая формирует проходящий через него тепловой поток плотностью 1 Вт/м^2 , в то время как **термическое сопротивление многослойной конструкции** – разность температуры наружной и внутренней поверхностей ограждения, которая формирует проходящий через него тепловой поток плотностью 1 Вт/м^2 .

Из (1.22) следует, что тепловой поток q , Вт/м^2 , проходящий через ограждение, пропорционален разности температуры сред по разные стороны ограждения $(t_e - t_n)$ и обратно пропорционален общему сопротивлению теплопередаче R_o :

$$q = (1 / R_o) \cdot (t_e - t_n). \quad (1.24)$$

2.1.7. Приведенное сопротивление теплопередаче

При выводе общего сопротивления теплопередаче рассматривалось плоскопараллельное ограждение. Поверхности большинства современных ограждающих конструкций не являются изотермическими, т.е. температура на различных участках наружной и внутренней поверхностей конструкции не является одинаковой из-за наличия различных теплопроводных включений, имеющих в конструкции.

Поэтому введено понятие **приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции**, которым называется сопротивление теплопередаче однослойной ограждающей конструкции той же площади, через которую проходит одинаковый с

реальной конструкцией поток теплоты при одинаковой разности между температурой внутреннего и наружного воздуха. Важно отметить, что приведенное сопротивление теплопередаче относится ко всей конструкции или ее участку, а не к площадке в 1 м^2 . Это происходит потому, что теплопроводные включения могут быть обусловлены не только регулярно уложенными связями, но и довольно крупными элементами крепления фасадов к колоннам, и самими колоннами, врезающимися в стену, и примыканием одних ограждений к другим.

Поэтому приведенное сопротивление теплопередаче конструкции (или участка конструкции) может быть определено выражением:

$$R_o^{np} = \frac{t_e - t_n}{\frac{Q}{A}}, \quad (1.25)$$

где Q – поток теплоты, проходящей через конструкцию (или участок конструкции), Вт ;

A – площадь конструкции (или участка конструкции), м^2 .

Выражение $\frac{Q}{A}$ является по своему смыслу усредненной по площади (или приведенной к единице площади) плотностью потока теплоты через конструкцию, т.е. можно записать:

$$q^{np} = \frac{Q}{A}. \quad (1.26)$$

Из (1.24) и (1.25) следует:

$$q^{np} = \frac{t_e - t_n}{R_o^{np}}. \quad (1.27)$$

Ограждающие конструкции с применением эффективных теплоизоляционных материалов выполняются таким образом, что слой теплоизоляционного материала закрывает, насколько возможно, большую площадь конструкции. Сечения теплопроводных включений выполняют настолько малыми. Следовательно, можно выделить участок конструкции, удаленный от теплопроводных включений. Если пренебречь влиянием теплопроводных включений на этом участке, то его теплозащитные

свойства можно характеризовать при помощи *условного сопротивления теплопередаче* R_o^{ysl} , определенного формулой (1.22). Отношение значения приведенного сопротивления теплопередаче конструкции к значению условного сопротивления теплопередаче рассмотренного участка называется *коэффициентом теплотехнической однородности*:

$$r = \frac{R_o^{np}}{R_o^{ysl}} \quad (1.28)$$

Величина коэффициента теплотехнической однородности оценивает, насколько полно используются возможности теплоизоляционного материала, или по-другому – каково влияние теплопроводных включений. Этот коэффициент практически всегда меньше единицы. Равенство его единице означает, что теплопроводные включения отсутствуют, и возможности применения слоя теплоизоляционного материала используются максимально. Но таких конструкций практически не бывает. Коэффициент теплотехнической однородности определяется прямым расчетом двух- или трехмерного температурного поля конструкции или упрощенно по [32], а для случая стержневых связей по [19].

Величина, обратная приведенному сопротивлению теплопередаче, названа *коэффициентом теплопередачи ограждающей конструкции* K , Вт/м²·°C:

$$K = \frac{1}{R_o^{np}} \quad (1.29)$$

Коэффициент теплопередачи ограждения K равен плотности теплового потока, проходящего сквозь ограждение, при разности температуры сред по разные стороны от него в 1°С.

Следовательно, тепловой поток q , Вт/м², проходящий через ограждение за счет теплопередачи, может быть найден по формуле:

$$q = K(t_a - t_n). \quad (1.30)$$

1.1.8. Распределение температуры по сечению ограждения

Важной практической задачей является расчет распределения температуры по сечению ограждения (рис.7). Из дифференциального уравнения (1.1) следует, что для многослойного ограждения,

состоящего из однородных плоскопараллельных пластин, оно линейно относительно сопротивления теплопередаче, поэтому можно записать температуру t_x в любом сечении ограждения:

$$t_x = t_a - \frac{(t_a - t_n)}{R_o} \cdot R_{x-a} = t_n + \frac{(t_a - t_n)}{R_o} \cdot R_{x-n}, \quad (1.31)$$

где R_{x-a} и R_{x-n} – сопротивления теплопередаче соответственно от внутреннего воздуха до точки x и от наружного воздуха до точки x , м²·°C/Вт.

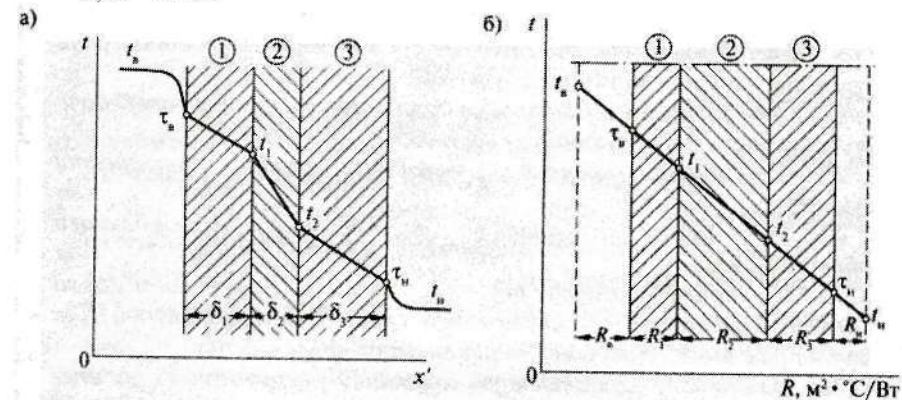


Рис. 7. Распределение температуры в многослойной стенке:

а - в масштабе толщин слоев,
б - в масштабе термических сопротивлений

Для ограждающих конструкций, содержащих какие-либо возмущающие одномерность теплового потока факторы, распределение температуры по сечению может быть ими искажено.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое коэффициент теплоотдачи на поверхности (физический смысл)?
2. Из чего складывается коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ограждения?
3. Из чего складывается коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности ограждения?
4. Из чего складывается термическое сопротивление многослойной ограждающей конструкции с плоскопараллельными слоями по ходу теплового потока?

5. Из чего складывается общее сопротивление теплопередаче многослойной ограждающей конструкции с плоскпараллельными слоями по ходу теплового потока? Напишите формулу общего сопротивления теплопередаче.

6. Физический смысл термического сопротивления многослойной ограждающей конструкции с плоскпараллельными слоями по ходу теплового потока.

7. Физический смысл общего сопротивления теплопередаче многослойной ограждающей конструкции с плоскпараллельными слоями по ходу теплового потока.

8. Физический смысл приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции.

9. Что такое условное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции?

10. Что такое коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции?

11. Что такое коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции?

12. Напишите формулу теплового потока, передаваемого за счет теплопередачи от внутренней среды с температурой t_a к наружной с температурой t_n через многослойную стенку.

13. Начертите качественную картинку распределения температуры в двухслойной стенке при известных температурах окружающих сред t_a и t_n , если $\lambda_1 > \lambda_2$.

14. Начертите качественную картинку распределения температуры в двухслойной стенке при известных температурах окружающих сред t_a и t_n , если $\lambda_1 < \lambda_2$.

15. Напишите формулу для определения температуры внутренней поверхности двухслойной стенки t_a при известных температурах сред t_a и t_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , коэффициентах теплопроводности λ_1 и λ_2 .

16. Напишите формулу для определения температуры наружной поверхности двухслойной стенки t_n при известных температурах сред t_a и t_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , коэффициентах теплопроводности λ_1 и λ_2 .

17. Напишите формулу для определения температуры t_x между слоями двухслойной стенки при известных температурах сред t_a и t_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , коэффициентах теплопроводности λ_1 и λ_2 .

18. Напишите формулу для определения температуры t_x в любом сечении многослойной стенки при известных температурах сред t_a и t_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , коэффициентах теплопроводности λ_1 и λ_2 .

1.2. ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Влажностный режим ограждений тесно связан с их тепловым режимом, поэтому он изучается в курсе Строительной теплофизики. Увлажнение строительных материалов в ограждениях отрицательным образом сказывается на гигиенических и эксплуатационных показателях зданий.

1.2.1. Причины появления влаги в ограждениях

Пути попадания влаги в ограждения различны, а мероприятия по снижению влажности строительных материалов в них зависят от причины увлажнения. Эти причины следующие.

1. **Строительная (начальная) влага** - влага, оставшаяся в ограждении после возведения здания. Ряд строительных процессов является «мокрыми», например, бетонирование, кладка из кирпича и штучных блоков: ячеистобетонных, керамзитобетонных и других, оштукатуривание. Для сокращения продолжительности мокрых строительных процессов в зимних условиях применяются сухие процессы. Например, во внутренних слоях наружных стен поэтажной разрезки ставятся пазогребневые гипсовые гидрофобизированные панели. Обычная внутренняя штукатурка заменяется гипсокартонными листами.

Строительная влага должна быть удалена из ограждений в первые 2-3 года эксплуатации здания. Поэтому очень важно, чтобы в нем хорошо работали системы отопления и вентиляции, на которые ляжет дополнительная нагрузка, связанная с испарением воды.

2. **Грунтовая влага**, та влага, которая может проникнуть в ограждение из грунта путем капиллярного всасывания. Для предотвращения попадания грунтовой влаги в ограждение строителями устанавливаются гидроизолирующие и пароизолирующие слои. Если слой гидроизоляции поврежден, грунтовая влага может подниматься по капиллярам в строительных материалах стен до высоты 2 - 2,5 м над землей.

3. **Атмосферная влага**, которая может проникать в ограждение при косом дожде, при протечках крыш в районе карнизов,

неисправности наружных водостоков. Наиболее сильное воздействие дождевой влаги наблюдается при полной облачности с длительными морозящими дождями с ветром, с высокой влажностью наружного воздуха. Для предотвращения попадания влаги внутрь стены от смоченной наружной поверхности применяются специальные фактурные слои, плохо пропускающие жидкую фазу влаги. Обращается внимание на герметизацию стыков стеновых панелей при крупнопанельном домостроении, на герметизацию периметров окон и других проемов.

4. **Эксплуатационная влага** попадает в ограждение от внутренних источников: при производственных процессах, связанных с применением или выделением воды, при мокрой уборке помещений, при прорывах водопроводных и канализационных сетей. При регулярном использовании воды в помещении делают водонепроницаемые полы и стены. При авариях необходимо как можно быстрее удалить влагу с ограждающих конструкций.

5. **Гигроскопическая влага** находится внутри ограждения вследствие гигроскопичности его материалов. Гигроскопичность – это свойство материала поглощать (сорбировать) влагу из воздуха. При длительном пребывании строительного изделия в воздухе с постоянными температурой и относительной влажностью, количество влаги, содержащейся в материале, становится неизменным (равновесным). Это равновесие влагосодержания соответствует гигротермическому состоянию внешней воздушно-влажной среды и в зависимости от свойств материала (химического состава, пористости и т.д.) может быть большим или меньшим. Нежелательно применять материалы с высокой гигроскопичностью в ограждениях. В то же время, применение гигроскопичных штукатурок (известковых) практикуется в местах с периодическим пребыванием людей, например, в церквях. Про такие впитывающие влагу при увлажнении воздуха и отдающие ее при снижении влажности воздуха стены говорят, что они «дышат».

6. **Парообразная влага**, находящаяся в воздухе, заполняющем поры строительных материалов. При неблагоприятных условиях влага может конденсироваться внутри ограждений. Во избежание отрицательных последствий конденсации влаги внутри ограждения оно должно быть грамотно сконструировано, чтобы умень-

шить риск выпадения конденсата и создать условия для полного высыхания сконденсированной за зиму влаги летом.

7. **Сконденсированная влага** на внутренних поверхностях ограждений при высокой влажности внутреннего воздуха и температуре внутренней поверхности ограждения ниже точки росы. Меры борьбы с увлажнением внутренней поверхности ограждений связаны с вентиляцией помещений, снижающей влажность внутреннего воздуха, и с утеплением ограждающих конструкций, исключаяющим понижение температуры, как на глади поверхности ограждения, так и в местах теплопроводных включений.

1.2.2. Отрицательные последствия увлажнения наружных ограждений

Известно, что с повышением влажности материалов ухудшаются **теплотехнические качества** ограждения за счет увеличения коэффициента теплопроводности материалов, что приводит к увеличению теплопотерь здания и большим энергозатратам на отопление.

Теплопроводность увеличивается с повышением влажности материала из-за того, что вода, находящаяся в порах материала, имеет коэффициент теплопроводности около 0,58 Вт/(м⁰·С), что в 22 раза больше, чем у воздуха. Большая интенсивность возрастания коэффициента теплопроводности материала при малой влажности происходит из-за того, что при увлажнении материала сначала заполняются водой мелкие поры и капилляры, влияние которых на теплопроводность материала больше, чем влияние крупных пор. Еще более резко возрастает коэффициент теплопроводности, если влажный материал промерзает, так как лед имеет теплопроводность 2,3 Вт/(м⁰·С), что в 80 раз больше, чем у воздуха. Установить общую математическую зависимость теплопроводности материала от его влажности для всех строительных материалов невозможно, так как на нее большое влияние оказывает форма и расположение пор.

На внутренних поверхностях ограждения с мокрыми слоями формируется более низкая температура, чем с сухими, создающая в помещении неблагоприятную радиационную обстановку. Если температура на поверхности ограждения окажется ниже точки

росы, то на этой поверхности может выпадать конденсат. Влажный строительный материал неприемлем, так как является благоприятной средой для развития в нем грибов, плесени и других микроорганизмов, споры и мельчайшие частицы которых вызывают у людей аллергию и другие заболевания. Таким образом, увлажнение строительных конструкций ухудшает *гигиенические качества* ограждений.

Чем больше влажность материала, тем менее морозостоек материал, а, значит, недолговечен. Замерзающая в порах материалов и на стыках слоев вода разрывает эти поры, так как при превращении в лед вода расширяется. Деформация возникает также у ограждений, подверженных увлажнению, но выполненных из невлагостойких материалов, таких как фанера, гипс. Поэтому применение невлагостойких материалов в наружных ограждениях ограничено. Следовательно, увлажнение строительных материалов может иметь отрицательные последствия для *технических качеств* ограждений.

1.2.3. Связь влаги со строительными материалами

По характеру своего взаимодействия с водой твердые тела делятся на *смачиваемые (гидрофильные)* и *несмачиваемые (гидрофобные)*. К гидрофильным строительным материалам относят бетоны, гипс, вяжущие на водной основе. К гидрофобным – битумы, смолы, минеральные ваты на несмачиваемых вяжущих. Гидрофильные материалы активно взаимодействуют с водой, а ограниченно смачиваемые и несмачиваемые – менее активно.

Фактором, значительно влияющим на характер взаимодействия материала с влагой, находящейся в воздухе, или при непосредственном контакте с водой является *капиллярно-пористая структура* большинства строительных материалов. При взаимодействии с влагой могут изменяться физико-механические и теплотехнические свойства строительных материалов.

Для правильного понимания путей движения влаги в ограждающих конструкциях и методов предотвращения неблагоприятных процессов или их последствий необходимо знать формы связи влаги со строительными материалами.

Обоснованная система энергетической классификации связи влаги с материалом разработана академиком П.А.Ребиндером [24]. По природе энергии связывания влаги с веществом и величине энергетического уровня различаются три вида этой связи.

1. *Химическая форма связи* влаги с материалом самая прочная, потому что влага в этом случае необходима для химических реакций. Такая влага входит в состав структурной решетки материалов типа кристаллогидратов и не участвует во влагообменных процессах. Поэтому при рассмотрении процессов влагопередачи через ограждение ее можно не учитывать.

2. *Физико-химическая связь* влаги со строительными материалами проявляется в адсорбировании на внутренней поверхности пор и капилляров материала. Адсорбированная влага подразделяется на влагу первичных мономолекулярных слоев, отличающуюся высоким энергетическим уровнем связи с поверхностью гидрофильных материалов, и влагу последующих полимолекулярных слоев, составляющих пленку воды, удерживаемой капиллярными силами. Для удаления мономолекулярной и частично полимолекулярной влаги не достаточно сил естественной сушки в обычных природных условиях и условиях помещений. К физико-химической форме связи относят также осмотически (структурно) связанную влагу в растительных клетках органических материалов растительного происхождения. Эта влага может быть удалена путем естественной сушки.

3. *Физико-механическая связь* определяет удержание влаги в порах и капиллярах силами капиллярного давления и смачивания гидрофильных материалов. Эта влага перемещается внутри материала при возникновении давлений, превышающих капиллярное и испаряется из поверхностных слоев конструкций в процессе естественной сушки. Наибольшей физико-механической прочностью обладает связь воды с микрокапиллярами.

1.2.4. Влажный воздух

Атмосферный воздух, состоящий из кислорода, азота, углекислого газа и небольшого количества инертных газов, всегда содержит некоторое количество влаги в виде водяного пара. Смесь сухого воздуха с водяным паром называют *влажным воздухом*.

снижения величины давления насыщения E . По мере остывания воздуха при некоторой его температуре, когда e_n станет равно E , относительная влажность воздуха станет равной 100%, т.е. воздух достигнет полного насыщения водяным паром. Температура t_p , °C, при которой воздух с определенной абсолютной влажностью находится в состоянии полного насыщения, называется **точкой росы**. Если воздух будет охлаждаться ниже точки росы, то часть влаги начнет конденсироваться из воздуха. Воздух при этом будет оставаться насыщенным водяным паром, а давление насыщения воздуха E соответственно достигнутой температуре будет снижаться. Причем температура воздуха в каждый момент времени будет точкой росы для сформировавшейся абсолютной влажности воздуха.

При соприкосновении влажного воздуха с внутренней поверхностью наружного ограждения, имеющей температуру t_v ниже точки росы воздуха t_p , на этой поверхности будет конденсироваться водяной пар. Таким образом, условиями отсутствия выпадения конденсата на внутренней поверхности ограждения и в его толще является поддержание температуры выше точки росы, а это означает, что парциальное давление водяных паров в каждой точке сечения ограждения должно быть меньше давления насыщения.

1.2.5. Влажность материала

В капиллярно-пористых материалах в естественной воздушной среде всегда находится некоторое количество химически несвязанной влаги. Если образец материала, находящегося в естественных условиях, подвергнуть сушке, то его масса уменьшится. **Влажность по массе** ω_v , %, определяется отношением массы влаги, содержащейся в образце, к массе образца в сухом состоянии:

$$\omega_v = \frac{M_1 - M_2}{M_2} 100, \quad (1.39)$$

где M_1 — масса влажного образца, кг,

M_2 — масса сухого образца, кг.

Объемная влажность ω_o , %, определяется отношением объема влаги, содержащейся в образце, к объему образца:

$$\omega_o = \frac{V_1}{V_2} 100, \quad (1.40)$$

где V_1 — объем влаги в образце, м³,

V_2 — объем самого образца, м³.

Между влажностью по массе ω_v и объемной влажностью ω_o материала существует соотношение

$$\omega_o = \frac{\omega_v \rho}{1000}, \quad (1.41)$$

где ρ — плотность материала в сухом состоянии, кг/м³.

В расчетах чаще используют влажность по массе.

1.2.6. Сорбция и десорбция

При длительном нахождении образца материала во влажном воздухе с постоянными температурой и относительной влажностью, масса влаги, содержащейся в образце, станет неизменной — **равновесной**. При повышении относительной влажности воздуха масса влаги в материале увеличивается, а при увеличении температуры — уменьшается. Это равновесное влагосодержание материала, соответствующее тепловлажностному состоянию воздушной среды, в зависимости от химического состава, пористости и некоторых других свойств материала может быть больше или меньше. Процесс увлажнения сухого материала, помещенного в среду влажного воздуха, называется **сорбцией**, а процесс уменьшения влагосодержания избыточно влажного материала в среде влажного воздуха — **десорбцией**.

Закономерность изменения равновесного влагосодержания материала в воздушной среде с постоянной температурой и возрастающей относительной влажностью выражается **изотермой сорбции**.

Для подавляющего числа строительных материалов изотермы сорбции и десорбции не совпадают. Разность весовых влажностей строительного материала при одной и той же относительной влажности воздуха ϕ называется **сорбционным гистерезисом**. На рис. 8 представлены типы гистерезиса водяного пара в строительных материалах по [9]. Отсутствие гистерезиса (тип 0) наблюдается при чистой адсорбции и характерен для материалов: минеральная вата, глиняный кирпич, керамзит, кварцевый песок.

Тип 1 соответствует проявлению адсорбции и капиллярной конденсации и характерен для ряда пенопластов. Тип 2 характерен для материалов, содержащих целлюлозу или протеин, а также монтмориллонит, у которых в результате сорбции водяного пара изменяется сорбционная способность материалов.

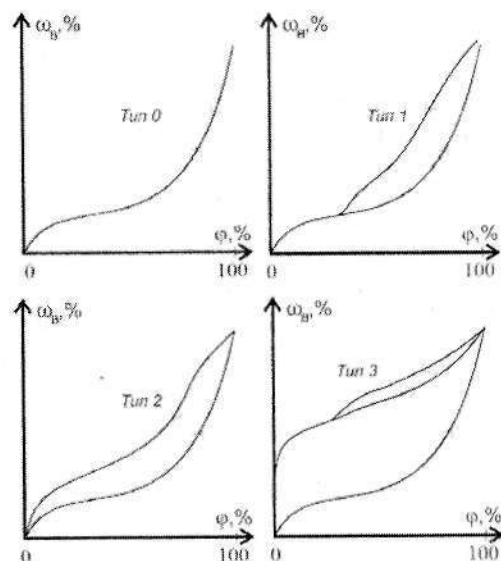


Рис. 8. Типы гистерезиса сорбции водяного пара строительных материалов

Тип 3 относится к случаю, когда кроме действия механизмов адсорбции и капиллярной конденсации молекулы воды заполняют межслоевое (межкристаллическое) пространство и характерен для цементных бетонов. Изотермы сорбции и десорбции водяного пара используются при проведении расчетов влажностного режима ограждающих конструкций, при назначении расчетных значений эксплуатационной влажности материалов, для исследования пористой структуры и некоторых других свойств материалов. Значения сорбционных влажностей строительных материалов приведены в различных литературных источниках, например, в [38].

1.2.7. Паропроницание через ограждающие конструкции

Исключение конденсации водяного пара на внутренней поверхности ограждения не может гарантировать отсутствия конденсации влаги в толще ограждения.

Влага в строительном материале может находиться в трех различных фазах: твердой, жидкой и парообразной. Каждая фаза распространяется по своему закону.

Во избежание путаницы в терминологии сразу оговорим, что **паропроницаемость** — это свойство материалов и конструкции, выполненной из них, пропускать сквозь себя водяной пар и жидкую фазу, а **паропроницание** — это процесс проникания пара и жидкости через материал или ограждение.

Из экспериментальных исследований известно, что **потенциалом переноса пара и воды при незаполненных порах материала** — его движущей силой — служит **парциальное давление водяного пара в воздухе e , Па**.

При небольших значениях относительной влажности воздуха $\phi < 0,30$ в порах материала конденсированная влага отсутствует, поверхность пор и капилляров может быть покрыта адсорбционной пленкой толщиной в 1-2 молекулярных слоя. Перемещение влаги при этом происходит только в виде пара. При больших значениях ϕ адсорбционные пленки утолщаются, и может начаться поверхностная диффузия. Кроме того, капиллярная конденсация в мезопорах (мельчайших порах) может обусловить капиллярную диффузию пара. При увеличении $\phi > 0,90$ внутренняя поверхность материала покрывается смачивающими пленками, которые перемещаются под действием возникающих градиентов расклинивающего давления. Капиллярная конденсация в мезопорах приводит уже не только к усилению капиллярной диффузии пара, но и к капиллярному переносу жидкой влаги. Однако при этом может снизиться диффузия пара вследствие заполнения мезокапилляров конденсатом.

Внутри строительных материалов ограждения влажный воздух находится в порах материала. Влага перемещается от большего парциального давления к меньшему.

В климатических условиях России наиболее актуальна задача движения влаги в зимний период. В холодный период года в по-

мещении температура воздуха значительно выше, чем на улице. Более высокой температуре соответствует более высокое давление насыщения водяным паром E . Несмотря на то, что относительная влажность внутреннего воздуха меньше относительной влажности наружного, парциальное давление водяных паров во внутреннем воздухе e_a значительно превышает парциальное давление водяного пара в наружном воздухе e_n . Поэтому поток пара направлен из помещения наружу. Процесс проникновения пара и жидкой фазы через ограждение относится к *процессам диффузии*. Иначе говоря, водяной пар диффундирует сквозь ограждение. Диффузия есть чисто молекулярное явление, представляющее собой замену молекул одного газа молекулами другого, в данном случае замену молекул сухого воздуха в порах строительных материалов молекулами водяного пара. А процесс диффузии водяного пара через ограждения носит название *паропроницания*.

Паропроницаемость μ зависит от физических свойств материала и отражает его способность пропускать диффундирующий через себя водяной пар. Паропроницаемость материала μ количественно равна диффузионному потоку водяного пара, мг/ч, проходящего через m^2 площади, перпендикулярной потоку, при градиенте парциального давления водяного пара вдоль потока, равном 1 Па/м. При увеличении влажности материала его паропроницаемость возрастает.

Расчетные значения μ приведены в справочных таблицах [32]. Причем для изотропных материалов μ не зависит от направления потока влаги, а для анизотропных (древесины, других материалов, имеющих волокнистую структуру или прессованных) значения μ приводятся в зависимости от соотношения направлений потока пара и волокон. Паропроницаемость для теплоизоляционных материалов, как правило, рыхлых и с открытыми порами имеет большие значения, например, для минераловатных плит на синтетическом связующем при плотности $\rho=50$ кг/м³ коэффициент паропроницаемости равен $\mu=0,60$ мг/(ч·м·Па). Материалам большей плотности соответствует меньшее значение коэффициента паропроницаемости, например, тяжелый бетон на плотных заполнителях имеет $\mu=0,03$ мг/(ч·м·Па). Вместе с тем бывают исключения. Экструдированный пенополистирол, утеплитель с за-

крытыми порами, при плотности $\rho=25 - 45$ кг/м³ имеет $\mu=0,003 - 0,018$ мг/(ч·м·Па) и практически не пропускает через себя пар.

Материалы с минимальной паропроницаемостью используют в качестве *пароизоляционных слоев*. Для листовых материалов и тонких слоев *пароизоляции* ввиду очень малого значения μ в справочных таблицах [32] приводятся сопротивления паропроницанию и толщины этих слоев.

Паропроницаемость воздуха равна $\mu=0,0062$ м² ч Па /мг при отсутствии конвекции и $\mu=0,01$ м² ч Па/мг при конвекции [38]. Поэтому в расчетах сопротивления паропроницанию следует иметь в виду, что пароизоляционные слои ограждения, не обеспечивающие сплошности (имеющие щели) (пароизоляционная пленка, нарушенная внутренними связями ограждения, листовые пароизоляционные слои, проложенные даже внахлест, но без промазки швов пароизоляционной мастикой), будут иметь большую паропроницаемость, чем без учета этого обстоятельства.

Из физики известно, что имеется полная *аналогия между процессами паропроницания и теплопроводности*. Более того, соблюдается *аналогия в процессах теплоотдачи и влагоотдачи на поверхностях ограждения*. Поэтому можно рассматривать *аналогию между сложными процессами теплопередачи и влагопередачи* через ограждение. В табл. 2 представлены прямые аналоги в этих процессах.

По своему физическому смыслу *сопротивление паропроницанию слоя* ограждения – это разность упругостей водяного пара, которую нужно создать на поверхностях слоя, чтобы через 1 м² его площади диффундировал поток пара, равный 1 мг/ч.

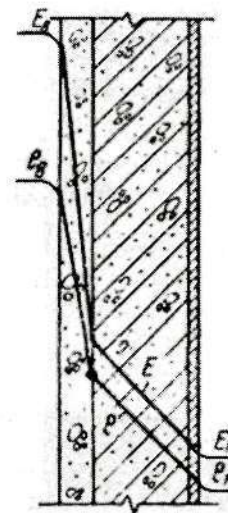


Рис. 9. Распределение парциального давления и давления насыщения водяных паров по сечению ограждения

Общее сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции (при диффузии пара) складывается из сопротивлений паропрооницанию всех его слоев и сопротивлений влагообмену на его поверхностях, как это следует из выражения (1.42).

Т а б л и ц а 2

Аналогия между процессами теплопередачи и влагопередачи при диффузии пара

Тепловое поле	Влажностное поле
Температура - внутреннего воздуха t_a , °C; - внутренней поверхности t_s , °C; - на стыках слоев t_s , °C; - наружной поверхности t_n , °C; - наружного воздуха t_n , °C.	Парциальное давление водяных паров: - во внутреннем воздухе e_a , Па; - на внутренней поверхности $e_{сп}$, Па; - на стыках слоев e_s , Па; - наружной поверхности $e_{нт}$, Па; - в наружном воздухе e_n , Па.
Теплопроводность материала λ , Вт/(м·°C)	Паропрооницаемость материала μ, мг/(ч·м·Па)
Термическое сопротивление слоя толщиной δ , м, $R_T = \delta / \lambda$, м²·°C/Вт	Сопротивление паропрооницанию слоя толщиной δ , м, $R_n = \delta / \mu$, м²·ч·Па / мг (1.42)
Коэффициенты теплоотдачи - на внутренней поверхности α_v , Вт/(м²·°C); - на наружной поверхности α_n , Вт/(м²·°C).	Коэффициенты влагоотдачи - на внутренней поверхности β_v , мг/(ч·м²·Па); - на наружной поверхности β_n , мг/(ч·м²·Па).
Сопротивление теплоотдаче на поверхностях ограждения - на внутренней $R_v = 1/\alpha_v$, м²·°C/Вт; - на наружной $R_n = 1/\alpha_n$, м²·°C/Вт;	Сопротивление влагоотдаче на поверхностях ограждения - на внутренней $R_{п.в} = 1/\beta_v$, м²·ч·Па/мг; (1.43) - на наружной $R_{п.н} = 1/\beta_n$, м²·ч·Па/мг. (2.44)
Общее сопротивление теплопередаче ограждения $R_0 = R_v + \sum(\delta/\lambda) + R_n$, м²·°C/Вт	Общее сопротивление паропрооницанию ограждения $R_{п.0} = R_{п.в} + \sum(\delta/\mu) + R_{п.н}$, м²·ч·Па/мг (1.45)
Плотность теплового потока через ограждение $q = (t_a - t_n)/R_0$, Вт/м²	Плотность диффузионного потока влаги через ограждение $g = (e_a - e_n)/R_{п.0}$, мг/(ч·м²) (1.46)

Коэффициент влагоотдачи, как правило, в инженерных расчетах общего сопротивления паропрооницанию не применяется, в расчетах используют непосредственно сопротивления влагоотда-

че на поверхностях, принимая их значения равными $R_{п.в} = 0,0267$ м²·ч·Па/мг, $R_{п.н} = 0,0052$ м²·ч·Па/мг [4].

Упругость водяного пара, диффундирующего через ограждение, по мере прохождения через его толщу будет изменяться между значениями e_a и e_n .

Для нахождения парциального давления водяного пара e_x в любом сечении ограждения (рис. 9) пользуются формулой, аналогичной формуле (1.31) для определения распределения температуры по сечению ограждения:

$$e_x = e_a - \frac{R_{п.а-х} \cdot x}{R_{п.0,n}} \cdot (e_a - e_n) = e_n + \frac{R_{п.н-х} \cdot x}{R_{п.0,n}} \cdot (e_a - e_n), \quad (1.47)$$

где $R_{п.а-х}$, $R_{п.н-х}$ – сопротивления паропрооницанию, от точки x до соответственно внутреннего и наружного воздуха, м²·ч·Па/мг.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Причины выпадения влаги на поверхности или в толще ограждения.
2. Отрицательные последствия выпадения влаги на поверхности или в толще ограждения.
3. Чем отличаются гидрофильные строительные материалы от гидрофобных?
4. Какова структура большинства строительных материалов?
5. Какие три формы видов связи влаги со строительным материалом по природе энергии связывания и величине энергетического уровня Вы знаете?
6. Что такое влажный воздух?
7. Что такое парциальное давление водяного пара во влажном воздухе?
8. Из чего складывается барометрическое давление влажного воздуха?
9. Что такое относительная влажность воздуха?
10. Какой воздух называется насыщенным водяным паром?
11. Какая температура носит название точки росы?
12. Каковы условия отсутствия конденсата в какой-либо точке сечения ограждающей конструкции?
13. Как определяется влажность материала по массе?
14. Как определяется объемная влажность материала?
15. Что такое равновесная влажность материала?

16. Что такое сорбция и десорбция?
17. В чем проявляется сорбционный гистерезис?
18. Что является потенциалом переноса водяного пара в ограждающих конструкциях?
19. В чем состоит диффузия пара сквозь ограждение?
20. Что такое паропроницание?
21. Что такое паропроницаемость?
22. Чему количественно равна паропроницаемость материала μ ?
23. Что такое пароизоляция?
24. Физический смысл сопротивления паропроницанию слоя?
25. Что такое общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции?
26. Напишите формулу общего сопротивления паропроницанию ограждения.
27. Как определить парциальное давление водяных паров в воздухе при известных его температуре t_a и относительной влажности ϕ_a ?
28. Чем определяется давление насыщенного водяного пара?
29. Начертите качественную картинку распределения парциального давления водяного пара в двухслойной стенке при известных давлениях в окружающих средах e_a и e_n , если $\mu_1 > \mu_2$.
30. Начертите качественную картинку распределения парциального давления водяного пара в двухслойной стенке при известных давлениях в окружающих средах e_a и e_n , если $\mu_1 < \mu_2$.
31. Напишите формулу для определения парциального давления водяного пара на внутренней поверхности двухслойной стенки $e_{вн. пов}$ при известных давлениях в средах e_a и e_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , паропроницаемостях μ_1 и μ_2 .
32. Напишите формулу для определения парциального давления водяного пара на наружной поверхности двухслойной стенки $e_{н. пов}$ при известных давлениях в средах e_a и e_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , паропроницаемостях μ_1 и μ_2 .
33. Напишите формулу для определения парциального давления водяного пара между слоями двухслойной стенки e при известных давлениях в средах e_a и e_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , паропроницаемостях μ_1 и μ_2 .
34. Напишите формулу для определения парциального давления водяного пара e_x в любом сечении многослойной стенки при известных давлениях в средах e_a и e_n , толщинах слоев δ_i , паропроницаемостях μ_i .

1.3. ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЕ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ

1.3.1. Основные положения

Воздухопроницанием через ограждения или материалы называют процесс проникновения воздуха сквозь их неплотности. Проникновение воздуха снаружи внутрь помещений называется **инфильтрацией**, а из помещения наружу – **эксфильтрацией**.

Различают два типа неплотностей, через которые осуществляется **фильтрация воздуха**: **поры строительных материалов** и **сквозные щели**. Щели образуют стыки стеновых панелей, щели в переплетах окон и в местах прилегания окна к оконной коробке и т. д. Кроме сквозной **поперечной фильтрации**, при которой воздух проходит через ограждение насквозь в направлении, перпендикулярном поверхности ограждения, существует, по терминологии Р.Е. Брилинга [5], еще два вида фильтрации – **продольная и внутренняя**.

Воздухопроницаемостью называется свойство строительных материалов и ограждающих конструкций пропускать сквозь себя поток воздуха, **воздухопроницаемостью** считают также расход воздуха в кг, который проходит через 1 м^2 ограждения за час G , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Воздухопроницаемостью обладают все наружные ограждения, но в расчете теплопотерь обычно учитывается только инфильтрация через окна, балконные двери и витражи. Нормы плотности остальных ограждений исключают возможность сквозной воздухопроницаемости, ощутимо влияющей на тепловой баланс помещения.

Как уже было сказано ранее, для пароизоляции ограждающих конструкций с их внутренней стороны делается плотный слой. Этот слой обычно достаточно воздухонепроницаем для поперечной фильтрации. Однако, если с наружной стороны фасадный слой не плотный, может происходить продольная фильтрация, заключающаяся в том, что под воздействием ветра холодный наружный воздух проходит внутрь ограждающей конструкции и в другом месте выходит из нее. Этим вызываются дополнительные теплопотери.

У современных наружных стен с вентилируемым фасадом в слоях из минеральной ваты, пенополистирола или других вспененных материалов может наблюдаться продольная фильтрация [10], которая местно снижает приведенное сопротивление этих конструкций за счет выноса фильтрующимся воздухом теплоты в атмосферу.

Даже, если с обеих сторон ограждающей конструкции обеспечена хорошая защита от проникновения воздуха, а внутренние слои выполнены из воздухопроницаемых материалов, движение воздуха внутри конструкции может возникнуть из-за разности температур в толще ограждения по типу движения воздуха в замкнутых воздушных прослойках. Однако внутренняя фильтрация, как правило, не увеличивает заметно коэффициент теплопередаче ограждения.

Инфильтрация, эксфильтрация и, вообще, любая фильтрация воздуха возникают под воздействием *перепадов полных давлений воздуха* ΔP , Па, с разных сторон ограждения. То есть *потенциалом переноса воздуха* через материалы и ограждающие конструкции является разность давлений воздуха изнутри здания и снаружи. Она объясняется, во-первых, различной плотностью холодного наружного воздуха и теплого внутреннего – *гравитационной составляющей* и, во-вторых, действием ветра, создающего положительное дополнительное давление в набегающем потоке с наветренной стороны и разрежение с подветренной – *ветровой составляющей*.

1.3.2. Разность давлений на наружной и внутренней поверхностях ограждений

Известно, что в столбе газа статическое *гравитационное давление* переменено по высоте. Гравитационное давление $P_{гp}$, Па, в любой точке наружного воздуха на высоте h от поверхности земли, равно

$$P_{гp} = P_{атм} - \rho_n g h \quad (1.48)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление на уровне условного поля отсчета, Па;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ρ_n – плотность наружного воздуха, кг/м³.

Ветровое давление $P_{ветр}$, Па, в зависимости от направления ветра на разных поверхностях здания будет различным, что в расчетах учитывается *аэродинамическим коэффициентом* c , показывающим, какую долю от динамического давления ветра составляет статическое давление на наветренном, боковых и подветренном фасадах. Избыточное ветровое статическое давление на здание пропорционально динамическому давлению ветра $\rho_n v^2 / 2$ при его скорости v , м/с.

Скорости ветра измеряются на метеостанциях на высоте 10 м от земли на открытой местности. В застройке и по высоте скорость ветра изменяется. Для учета изменения скорости ветра в различных типах местности и на разной высоте применяется коэффициент $k_{дин}$, значения которого регламентированы СНиП 2.01.07-85* [31]. Принимаются следующие типы местности:

А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м;

С – городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м.

Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны сооружения на расстоянии $30h$ – при высоте сооружения h до 60 м и 2 км – при большей высоте.

В соответствии с вышесказанным ветровое давление на каждом фасаде равно

$$P_{ветр} = \frac{\rho_n v^2}{2} c k_{дин}, \quad (1.49)$$

где ρ_n – плотность наружного воздуха, кг/м³;

v – скорость ветра, м/с;

c – аэродинамический коэффициент на расчётном фасаде;

$k_{дин}$ – коэффициент учета изменения скоростного давления ветра в зависимости от высоты здания, принимаемый по [31].

По СНиП 2.01.07-85* [31] для большинства зданий величина аэродинамического коэффициента на наветренной стороне равна $c_n = 0,8$, а на подветренной – $c_s = -0,6$.

Величины внутреннего полного избыточного давления $P_{\text{в}}$ для одинаково ориентированных помещений одного этажа могут различаться в силу того, что для каждого помещения формируется свое значение внутреннего давления. Определение внутренних давлений в помещениях является задачей полного расчета воздушного режима здания [6], который довольно трудоемок. Но для упрощения расчета внутреннее давление $P_{\text{в}}$ принято приравнивать к давлению в лестничной клетке.

Существуют упрощенные методы расчета внутреннего давления в здании. Наиболее распространен расчет, справедливый для зданий с равномерно распределенными окнами на фасадах, когда за условно постоянное внутреннее давление в здании принимается полусумма ветрового и максимального гравитационного давления по выражению

$$P_{\text{в}} = \frac{H}{2}(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}})g + \frac{\rho_{\text{н}}v^2}{2} \cdot \frac{(c - c_3)k_{\text{ошн}}}{2} \quad (1.56)$$

Второй, более громоздкий способ расчета величины $P_{\text{в}}$. По предложенный в [36], отличается от первого тем, что ветровое давление усредняется по площадям фасадов. Выражение для внутреннего давления при рассмотрении одного из фасадов в качестве наветренного принимает вид:

$$P_{\text{в}} = \frac{H}{2}(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}})g + \frac{\rho_{\text{н}}v^2}{2} \cdot k_{\text{ошн}} \left[\frac{c_{\text{н}} - c_3}{2} A_{\text{н}} + \frac{c_{\text{б}} - c_3}{2} A_{\text{б}} \right] / (A_{\text{н}} + A_{\text{б}} + A_3) \quad (1.57)$$

где $c_{\text{н}}$, $c_{\text{б}}$, c_3 - аэродинамические коэффициенты на наветренном, боковом и подветренном фасадах;

$A_{\text{н}}$, $A_{\text{б}}$, A_3 - площади окон и витражей на наветренном, боковых и подветренном фасадах, м^2 .

В расчетах теплотеперь учитывается, что каждый фасад может быть наветренным. Следует обратить внимание на то, что величина внутреннего давления $P_{\text{в}}$, принимаемая по (1.57), получается различной для каждого фасада. Эта разница тем заметнее, чем больше отличается плотность окон и витражей на различных фасадах. Для зданий с равномерным распределением окон по фасадам величина $P_{\text{в}}$ приближается к получаемой по (1.56). Таким образом, использование формулы (1.58) для расчета внутреннего давления оправдано в случаях, когда распределение световых проемов по фасадам явно неравномерно или когда рассматриваемое здание примыкает к соседнему, или один фасад либо его часть не имеют окон совсем.

Разность наружного и внутреннего давлений по разные стороны ограждения на наветренном фасаде на любой высоте h с учетом формулы (1.54) равна:

$$\Delta P = (H - h)(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}})g + \frac{\rho_{\text{н}}v^2}{2} \cdot (c - c_3)k_{\text{ошн}} - P_{\text{в}} \quad (1.58)$$

Разность давлений ΔP для окон одного фасада разных этажей будет отличаться только величиной гравитационного давления (первое слагаемое), зависящего от разности $H - h$ отметок верхней точки здания, принятой за ноль отсчета, и центра рассматриваемого окна. На рис. 10 показана картина распределения потоков в здании с естественной вентиляцией.

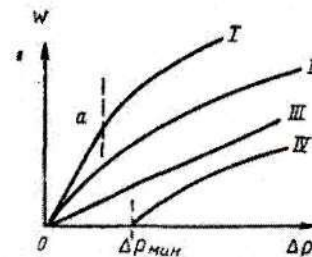
1.3.3. Воздухопроницаемость строительных материалов

Строительные материалы в основной своей массе являются пористыми телами. Размеры и структура пор у различных материалов неодинакова, поэтому воздухопроницаемость материалов в зависимости от разности давлений проявляется по-разному.

На рис. 11 показана качественная картина зависимости воздухопроницаемости G от разности давлений ΔP для строительных материалов, приведенная К.Ф. Фокиным [38].

Прямолинейный участок от 0 до точки a на кривой 1 свидетельствует о ламинарном движении воздуха по порам материала с равномерной пористостью при малых значениях разности давлений.

Рис. 11. Влияние пористости материала на его воздухопроницаемость: 1 - материалы с равномерной пористостью (типа пенобетона); 2 - материалы с порами различных размеров (типа засыпок); 3 - маловоздухопроницаемые материалы (типа древесины, цементных растворов), 4 - влажные материалы



Выше этой точки на криволинейном участке происходит турбулентное движение. В материалах с разными размерами пор движение воздуха турбулентно даже при малой разности давлений, что видно из кривизны линии 2. В маловоздухопроницаемых материалах, напротив, движение воздуха по порам ламинарно и

при довольно больших разностях давлений, поэтому зависимость G от ΔP линейна при любой разности давлений (линия 3). Во влажных материалах (кривая 4) при малых ΔP , меньших определенной минимальной разности давлений ΔP_{\min} , воздухопроницаемость отсутствует, и лишь при превышении этой величины, когда разность давлений окажется достаточной для преодоления сил поверхностного натяжения воды, содержащейся в порах материала, возникает движение воздуха. Чем выше влажность материала, тем больше величина ΔP_{\min} .

При ламинарном движении воздуха в порах материала справедлива зависимость

$$G = i \frac{\Delta P}{\delta}, \quad (1.59)$$

где G – воздухопроницаемость ограждения или слоя материала, кг/(м²·ч);

i – коэффициент воздухопроницаемости материала, кг/(м·Па·ч);
 δ – толщина слоя материала, м.

Коэффициент воздухопроницаемости материала аналогичен коэффициенту теплопроводности и показывает степень воздухопроницаемости материала, численно равную потоку воздуха в кг, проходящему сквозь 1 м² площади, перпендикулярной направлению потока, при градиенте давления, равном 1 Па/м.

Величины коэффициента воздухопроницаемости для различных строительных материалов отличаются друг от друга значительно. Например, для минеральной ваты $i \approx 0,044$ кг/(м·Па·ч), для неавтоклавного пенобетона $i \approx 5,3 \cdot 10^{-4}$ кг/(м·Па·ч), для сплошного бетона $i \approx 5,1 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·Па·ч).

При турбулентном движении воздуха в формуле (1.59) следует заменить ΔP на ΔP^n . При этом показатель степени n изменяется в пределах 0,5 – 1. Однако на практике формула (1.59) применяется и для турбулентного режима течения воздуха в порах материала.

В современной нормативной литературе не применяется понятия коэффициент воздухопроницаемости. Материалы и конструкции характеризуются **сопротивлением воздухопроницанию**

R_w , кг/(м·ч) при разности давлений по разные стороны $\Delta P_0 = 10$ Па, которое при ламинарном движении воздуха находится по формуле:

$$R_w = \frac{1}{G} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P_0}, \quad (1.60)$$

где G – воздухопроницаемость слоя материала или конструкции, кг/(м²·ч).

Сопротивление воздухопроницанию ограждений в своей размерности не содержит размерности потенциала переноса воздуха – давления. Такое положение возникло из-за того, что в нормативных документах [30, 32] делением фактической разности давлений ΔP на нормативное значение давлений $\Delta P_0 = 10$ Па, сопротивление воздухопроницанию приводится к разности давлений $\Delta P_0 = 10$ Па.

В [32] приведены значения **сопротивления воздухопроницанию** для слоев некоторых материалов и конструкций.

Для окон, в неплотностях которых движение воздуха происходит при смешанном режиме, сопротивление воздухопроницанию, кг/(м·ч), определяется из выражения:

$$R_w = \frac{1}{G} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (1.61)$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое воздухопроницаемость материала и ограждения?
2. Что такое воздухопроницание?
3. Что такое инфильтрация?
4. Что такое эксфильтрация?
5. Какая количественная характеристика процесса воздухопроницания названа воздухопроницаемостью?
6. Через какие два типа неплотностей осуществляется фильтрация воздуха в ограждениях?
7. Какие три вида фильтрации существуют по терминологии Р.Е.Брингса?
8. Что является потенциалом воздухопроницания?
9. Какие две природы формируют разность давлений на противоположных сторонах ограждения?

10. Напишите формулу для расчета гравитационного давления $P_{гр}$, Па, в любой точке наружного воздуха на высоте h от поверхности земли.

11. Напишите формулу для расчета ветрового давления на любом фасаде.

12. На каком уровне и на каком фасаде абсолютное давление принимается за условный ноль давления $P_{усл}=0$, Па.

13. Что такое аэродинамический коэффициент?

14. Что учитывается коэффициентом $k_{дин}$?

15. Чему равно полное избыточное давление $P_{из}$, Па, формирующееся в наружном воздухе в точке на высоте h здания?

16. Почему возможно отнести переменную гравитационную составляющую внутреннего давления к наружному и зачем это делается?

17. Напишите формулу упрощенного расчета внутреннего давления для зданий с равномерно распределенными окнами на фасадах?

18. Напишите формулу упрощенного расчета внутреннего давления для зданий с неравномерно распределенными по фасадам окнами и другими воздухопроницаемыми элементами.

19. Чему равна разность давлений по разные стороны воздухопроницаемого элемента?

20. Что такое коэффициент воздухопроницаемости материала?

21. Что такое сопротивление воздухопроницанию ограждающей конструкции?

22. Напишите формулу для определения сопротивления воздухопроницанию при ламинарном движении воздуха через поры материалов конструкции.

23. Напишите формулу для определения сопротивления воздухопроницанию окна.

2. ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАРУЖНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

2.1.1. Холодный период года и отопительный период

Уровень теплозащиты ограждающих конструкций в различных местностях должен быть различным. Наружная среда на различных территориях воздействует на ограждающие конструкции по-разному. Параметры наружной среды постоянно меняются. Совокупность непрерывно меняющихся значений метеорологических элементов и атмосферных явлений, наблюдаемых в данный момент времени в определенном месте, называется **погодой**. Понятие «погода» относится к текущему состоянию атмосферы. Статистический многолетний режим погоды на определенной территории называется **климатом**. Зная, в каком климате находится местность, можно с уверенностью сказать, какой погоды в этой местности принципиально быть не может. Для выбора информации о наружной среде опираются на климатические данные.

Проектные показатели теплозащиты здания должны отвечать нормируемым уровням наружных климатических параметров в **холодный период года**, которым в соответствии с [29] считается отрезок времени со среднесуточной температурой наружного воздуха, равной 8°C и ниже. По [30] для основной массы зданий понятие **отопительного периода** совпадает с понятием холодного периода года и только для лечебно-профилактических, детских учреждений и домов-интернатов для престарелых считается периодом со средней суточной температурой наружного воздуха не менее 10°C .

Параметрами наружного климата, учитываемыми в **теплотехнических расчетах**, являются: **температура наружного воздуха, скорость ветра, зона влажности района строительства**. Одни значения параметров климата описывают наиболее холодный расчетный период и называются **расчетными**, определяющими установленные мощности оборудования. Другие – средние уровни в пределах какого-либо периода, как правило, используются в расчетах эксплуатационных характеристик за

весь этот период. При выборе теплозащиты периодом эксплуатации считается отопительный период, эксплуатационной характеристикой, интересующей специалистов за этот период, являются, например, энергозатраты на возмещение теплопотерь через наружные ограждения за отопительный период. Значения климатических параметров холодного периода года принимаются по табл. 1* СНиП "Строительная климатология" [29], где в алфавитном порядке расположены областные и краевые центры, все остальные пункты даны внутри области или края.

2.1.2. Расчетная температура наружного воздуха

Самые холодные погодные условия в пределах отопительного периода года описываются *расчетными значениями климатических параметров*. Они не являются абсолютными экстремумами для района строительства. Дело в том, что экстремальные, наиболее суровые условия, бывают очень редко – раз в сотни лет. Ориентация на эти значения приводит к значительному удорожанию строительства. Поэтому расчетные уровни принимаются с некоторой *обеспеченностью*, под которой понимается суммарная вероятность того, что данный параметр не превзойдет (в холодный период года по суровости) расчетного значения.

Наиболее значимым параметром холодного периода года для выбора теплозащитных качеств наружных ограждений считается температура. Так как ограждения и помещения обладают тепловой инерцией, иначе говоря, требуют времени для охлаждения или нагрева до изменившейся температуры окружающего воздуха, принято в качестве расчетной t_n принимать *среднюю температуру наиболее холодной пятидневки* – среднюю температуру пяти последовательных суток с самой низкой средней температурой за год.

До 1994 года расчетная температура наружного воздуха для проектирования ограждения увязывалась с его тепловой инерцией. Для «легких» ограждений, быстро остывающих при понижении температуры наружного воздуха, за расчетную температуру принималась средняя температура наиболее холодных суток, а для «массивных» – средняя температура наиболее холодной пятидневки. Пятидневка, как расчетный период усреднения темпе-

ратуры наружного воздуха, в 1946 году была предложена К.Ф.Фокиным [38]. К.Ф.Фокин, во-первых, сделал анализ многолетних данных об изменении температуры наружного воздуха в период похолодания и дал предложения по «нормализации» расчетных кривых изменения температуры наружного воздуха. Во-вторых, он экспериментально установил, что стена из полнотелого кирпича толщиной 64 см, какие в то время были наиболее распространены, имеет теплопотери за 5 суток при переменной температуре наружного воздуха такие же, как если бы температура наружного воздуха держалась постоянной и равной средней за эти 5 суток.

После 1994 года, когда теплозащита зданий была значительно усилена, посчитали, что все ограждения можно отнести к числу «массивных» и расчетной температурой для теплотехнического расчета ограждающих конструкций была принята средняя температура наиболее холодной пятидневки.

Но за *расчетную температуру наружного воздуха t_n* принимается не самая низкая средняя температура наиболее холодной пятидневки, а с *обеспеченностью 0,92*.

Для получения этого значения выбиралась наиболее холодная пятидневка в каждый год рассматриваемого отрезка n лет (в [29] период с 1925 по 1980 годы). Выделенные значения температуры наиболее холодной пятидневки t_5 ранжировались в порядке убывания. Каждому значению присваивался номер m . Обеспеченность каждого m -го члена ряда из n компонентов $K_{об}$ в общем случае вычисляется по формуле:

$$K_{об} = (1 - m/n). \quad (2.1)$$

2.1.3. Средние температура и продолжительность отопительного периода

Для характеристики отопительного периода служат *средняя температура $t_{0.п.}$, °C*, и *продолжительность $z_{0.п.}$, сут.*, этого периода. Причем они относятся к отрезку времени с устойчивыми значениями граничной температуры отопительного периода. Отдельные дни со средней суточной температурой, равной или ниже соответственно 8°C или 10°C, не учитываются. Эти данные приведены в СНиП 23-01-99* «Строительная климатология» [29].

Средняя температура $t_{o.п.}$ и продолжительность $z_{o.п.}$ отопительного периода рассчитаны по следующей методике. Сначала строилась гистограмма годового хода температуры воздуха: наносился прямоугольник, у которого основание равно числу дней месяца, а высота – средней температуре воздуха за данный месяц (рис 12). Кривая годового хода проводилась так, чтобы участок, отсекаемый от прямоугольника, был равен по площади участку, который эта кривая прибавляет к нему с другой стороны. Затем, с графика снимались даты устойчивого перехода средних суточных температур воздуха через соответственно 8°C или 10°C . По разнице между этими датами определяется продолжительность отопительного периода.

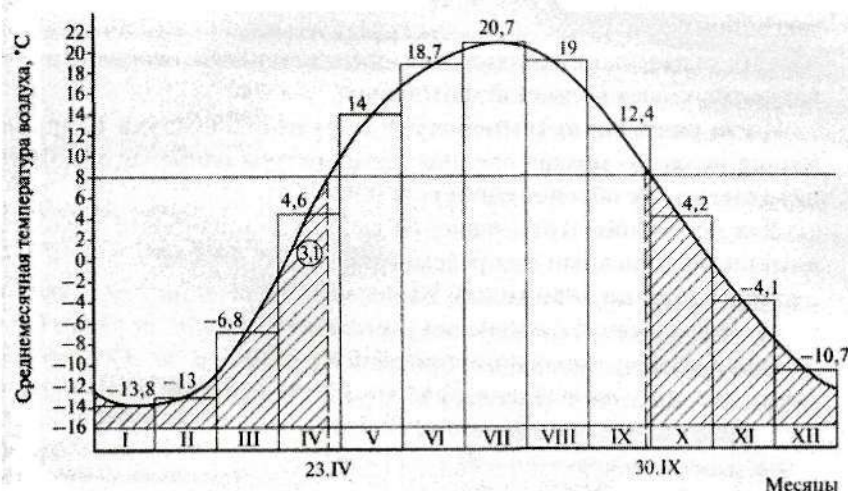


Рис. 12. Расчет продолжительности и средней температуры воздуха периода со среднесуточной температурой воздуха $+8^{\circ}\text{C}$: цифра в кружке – средняя температура воздуха за неполный месяц; 30.IX, 23.IV – даты начала и конца периода со среднесуточной температурой воздуха, равной и ниже $+8^{\circ}\text{C}$ (отопительный период)

2.1.4. Расчетный и среднесезонный ветер

За *расчетную скорость ветра* v принимается максимальная из средних скоростей ветра в январе по румбам (направлениям) ветра. Но учитывается только ветер, повторяемость румба кото-

рого составляет 16% и более. В случае, когда средняя скорость ветра по румбу повторяемостью 12-15% превышает на 1 м/с и более наибольшую из средних скоростей ветра по румбу повторяемостью 16%, максимальная скорость ветра принимается по румбу повторяемостью 12-15%.

Ветровой режим отопительного периода характеризуется средней скоростью $v_{o.п.}$, м/с, за этот период.

2.1.5. Влажностные условия района строительства

Для описания влажностных условий района строительства СНиП «Тепловая защита зданий» [30] выделяет три климатических зоны влажности: 1 – влажная, 2 – нормальная, 3 – сухая, которые обозначены на географической карте России. Она составлена В.М.Ильинским [17] на основе значений комплексного показателя, который рассчитан по соотношению среднего за месяц для безморозного периода количества осадков на горизонтальную поверхность, относительной влажности воздуха в 15 ч самого теплого месяца, среднегодовой суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, годового размаха среднемесячных значений (января и июля) температуры воздуха.

2.2. РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕГО МИКРОКЛИМАТА

В ГОСТ 30494-96 [14] приведены расчетные значения параметров внутреннего микроклимата жилых и общественных зданий в оптимальных и в допустимых для пребывания человека диапазонах. Причем для жилых зданий и зданий детских дошкольных учреждений эти данные выделены в самостоятельные таблицы. Помещения общественных зданий разделены на 6 категорий. При определении теплозащиты общественных зданий следует определить категорию основных функциональных помещений здания. Например, в административном здании основными являются кабинеты и рабочие комнаты, в школе – классы. Иногда одно здание делится на отдельные функциональные зоны, для которых принимаются свои расчетные параметры.

В теплотехнических расчетах сопротивления теплопередаче ограждений жилых и общественных зданий *за расчетную температуру внутреннего воздуха* t_v принимается [30] *минимальное значение оптимальной температуры*.

Расчетную относительную влажность внутреннего воздуха в теплотехнических расчетах принимают для исключения выпадения конденсата в местах теплопроводных включений ограждающих конструкций, в углах и оконных откосах, откосах зенитных фонарей. Эта относительная влажность несколько завышена по отношению к поддерживаемой для комфортного пребывания людей, так как выбирается максимально возможной в расчетном помещении. Для теплотехнических расчетов следует принимать: 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 помещений кухонь – 60%, для ванных комнат – 65%, для подвалов и подполий с коммуникациями – 75%; для теплых чердаков жилых зданий – 55%; для помещений общественных зданий (кроме вышеуказанных) – 50% [30].

В зависимости от сочетания расчетной температуры и расчетной относительной влажности внутреннего воздуха, принимаемых для теплотехнических расчетов, внутренний режим по влажностным условиям делят [30] на сухой, нормальный, влажный и мокрый. Например, при температуре внутреннего воздуха от 12 °С до 24 °С, т.е. для диапазона температур, охватывающего большинство жилых и общественных помещений, влажностный режим считается сухим при относительной влажности 50% и ниже, то есть сюда попадают административные помещения и другие без скопления людей. При относительной влажности свыше 50% и до 60% – нормальным, к этой категории относятся все помещения, перечисленные в предыдущем абзаце, для которых нормируется влажность 55% и 60%. Помещения с относительной влажностью свыше 60% и до 75% считаются влажными, а свыше 75% – мокрыми. К последним относят, как правило, производственные помещения с мокрым режимом. Ванные залы бассейнов считаются помещениями с мокрым режимом, так как при расчет-

ной влажности для теплотехнических расчетов 67% в них поддерживается температура воздуха выше 24 °С.

Парциальное давление водяных паров во внутреннем воздухе для теплотехнических расчетов определяют по расчетным значениям температуры t_v , °С, и относительной влажности ϕ_v , %, по формуле

$$e_v = \frac{E_v \cdot \phi_v}{100}, \quad (2.2)$$

где E_v – давление насыщенных водяных паров при расчетной температуре внутреннего воздуха t_v , Па.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое погода?
2. Что такое климат местности?
3. Что называется холодным периодом года?
4. Что называется отопительным периодом?
5. Какие параметры наружной среды, учитываются в теплотехнических расчетах?
6. Какие параметры климата называются расчетными?
7. Какие параметры климата принимаются для расчета эксплуатационных характеристик?
8. Какая температура принята в качестве расчетной при выборе теплозащиты ограждающих конструкций?
9. Что такое обеспеченность температуры наружного воздуха?
10. Как определяются средняя температура и продолжительность отопительного периода?
11. Какая скорость ветра считается расчетной?
12. Какие три климатические зоны влажности выделяются на территории РФ?
13. Какие параметры внутренней среды принимаются в качестве расчетных для теплотехнических расчетов?
14. Какая температура внутреннего воздуха принимается в качестве расчетной для выбора теплозащиты?
15. Как определяется расчетное давление водяных паров во внутреннем воздухе для теплотехнических расчетов?

2.3. ТРЕБУЕМОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

2.3.1. Показатели теплозащиты здания

СНиП [30] устанавливает три показателя тепловой защиты здания:

а) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающих конструкций;

б) перепад между значениями температуры внутреннего воздуха и на поверхности ограждающих конструкций и сама температура на внутренней поверхности ограждения, которая должна быть выше температуры точки росы (санитарно-гигиенический показатель);

в) удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, позволяющий варьировать величины теплозащитных свойств различных видов ограждающих конструкций здания с учетом объемно-планировочных решений здания и выбора систем поддержания микроклимата для достижения нормируемого значения этого показателя.

Выбор теплозащитных показателей здания осуществляют по одному из двух альтернативных подходов [30]:

- предписывающему, когда нормативные требования предъявляются к отдельным элементам теплозащиты здания – наружным стенам, полам над неотапливаемыми пространствами, покрытиям и чердачным перекрытиям, окнам, входным дверям и т.д.;

- потребителю, когда сопротивления теплопередаче ограждений могут быть снижены по отношению к предписываемому уровню, при условии, что проектный удельный расход тепловой энергии на отопление здания ниже нормативного.

Санитарно-гигиенические требования должны выполняться всегда.

2.3.2. Предписывающий подход к выбору сопротивления теплопередаче наружных ограждений

Требуемое (нормируемое) сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции – это минимально допустимое сопротивление теплопередаче для рассматриваемого ограждения. Для

ограждающих конструкций помещений с температурой внутреннего воздуха выше 12°C приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждений R_o^{np} следует принимать не менее нормируемого значения исходя из нормы энергосбережения, определяемой по табл. 4 [30].

Сопротивления теплопередаче наружных ограждений, в соответствии с действующими нормами выбираются *по условиям необходимости энергосбережения* за отопительный период. Эти нормы, представленные в табл. 4 [30], отражают уровень второго этапа повышения требований к теплозащите, введенного с 2000 года Госстроем России. В таблице величины требуемых сопротивлений теплопередаче R_o^{np} , м²·°C/Вт, приводятся в зависимости от назначения здания, назначения ограждения и числа градусо-суток отопительного периода D_d , °C·сут. Градусо-сутки отопительного периода D_d , °C·сут, определяют по формуле:

$$D_d = (t_g - t_{o,n}) \cdot z_{o,n}, \quad (2.3)$$

где t_g – расчетная температура внутреннего воздуха для основных помещений здания, °C, по п.2.2;

$t_{o,n}$, $z_{o,n}$ – средняя температура, °C, и продолжительность, сут, отопительного периода в районе строительства, принимаемые по [29] в соответствии с п. 2.1.3.

Тот факт, что в качестве расчетных параметров для выбора требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций принимается средняя за отопительный период температура и его продолжительность, а не температура наиболее холодной пятидневки, объясняется тем, что основным требованием, обосновывающим этот выбор, является минимизация энергопотребления на отопление за отопительный период.

До 1994 года ограждающие конструкции имели сопротивление теплопередаче, обеспечивающее минимально возможную границу *по санитарно-гигиеническим условиям*. При расчете требуемого сопротивления теплопередаче ограждений R_o^{np} , м²·°C/Вт, исходили из поддержания в заданных пределах разности Δt_n , °C, между температурой внутренней поверхности ограждения и внутреннего воздуха в расчетный зимний период:

$$R_o^{np} = \frac{(t_g - t_n) \cdot n}{\Delta t_n \cdot \alpha_s}, \quad (2.4)$$

где n – коэффициент положения ограждения относительно наружного воздуха, уменьшающий разность температуры для ограждений, не соприкасающихся с наружным воздухом. Значения коэффициента принимаются по [30];

$t_{в}$ – расчетная температура внутреннего воздуха для теплотехнического расчета наружных ограждений для основных помещений зданий, °C,

$t_{н}$ – расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °C, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92;

$\Delta t_{н}$ – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха $t_{в}$ и температурой внутренней поверхности $t_{в}$ ограждения. Значения нормируемого перепада $\Delta t_{н}$ приведены в [30] в зависимости от функционального назначения здания и назначения ограждения;

$\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°C). Для стен полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты ребер к расстоянию между гранями соседних ребер не более 0,3 $\alpha_{в}=8,7$ Вт/(м²·°C), для окон $\alpha_{в}=8$ Вт/(м²·°C), для зенитных фонарей $\alpha_{в}=9,9$ Вт/(м²·°C).

В настоящее время формула (2.4) применяется для определения требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждений (кроме окон) производственных зданий с большими избытками теплоты, для зданий, предназначенных для сезонной эксплуатации (весной или осенью), а также для зданий с расчетной температурой внутреннего воздуха 12°C и ниже. Формула (2.4) определяет норму сопротивления теплопередаче внутренних ограждений здания, если разность температуры разделяемых помещений равна 6°C и более. При этом за температуры наружного $t_{н}$ и внутреннего воздуха $t_{в}$ принимаются расчетные значения температуры помещений, разделенных ограждением, а коэффициент n приравнивается к 1. По формуле (2.4) определяют минимально допустимое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций реконструируемых зданий, являющихся памятниками архитектуры, так как для сохранения архитектурного облика в таких зданиях нельзя делать утепление фасадов снаружи.

2.3.3. Понятие об экономически целесообразном сопротивлении теплопередаче ограждения

Рост цен на тепловую энергию, в последние годы происходящий наиболее быстро, делает весьма актуальной задачу по определению *экономически целесообразной толщины утеплителя* в наружных ограждениях здания. Наиболее простая модель, дающая упрощенное представление об экономическом анализе, направленном на решение этой задачи, называется *методом минимума приведенных затрат*. Она состоит в следующем. Инвестор осуществляет единовременные вложения (*капитальные затраты*) K на строительство 1 м² ограждающей конструкции. Годовые затраты на компенсацию теплопотерь через 1 м² этой конструкции зависят от ее сопротивления теплопередаче и составляют величину \dot{Q} (*эксплуатационные затраты*). Суммарные затраты на строительство и эксплуатацию конструкции в течение T лет (*приведенные затраты*) составляют:

$$\Pi = K + T \dot{Q} \quad (2.5)$$

Задача заключается в минимизации величины Π 1 м² конструкции. Упрощенно можно считать, что капитальные затраты линейно зависят от толщины утеплителя, а следовательно, от сопротивления теплопередаче ограждения. В то же время эксплуатационные затраты обратно пропорциональны сопротивлению теплопередаче, потому что, чем оно больше, тем меньше теплопотери, и тем меньше затраты на отопление. Чтобы найти минимум приведенных затрат и соответствующее ему экономически целесообразное приведенное сопротивление теплопередаче, надо продифференцировать выражение (2.5) и, приравняв нулю производную, найти искомую величину сопротивления теплопередаче.

Графической интерпретацией этого расчета может служить рис. 13.

Недостатком этой методики, указанным в [11], является то, что изменение капитальных затрат на конструкцию считается линейной функцией от ее сопротивления теплопередаче R_0 . На самом деле, по мере увеличения R_0 капитальные затраты меняются скачкообразно. Так как K – это одно из слагаемых приведенных затрат Π , то дифференцирование выражения (2.5) становится не корректным.

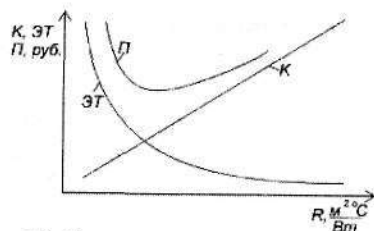


Рис. 13. К расчету приведенных затрат

В современных условиях рыночной экономики методом выявления экономически целесообразного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции считается **метод совокупных дисконтированных затрат** (СДЗ) [25], которые рассчитываются по формуле:

$$СДЗ = K \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right)^T + Э \cdot \left[\left(1 + \frac{p}{100}\right)^T - 1 \right] \cdot \left(\frac{100}{p}\right), \quad (2.6)$$

где p - норма дисконта, %, равная среднерыночной банковской ставке по кредитам;

K - капитальные затраты, руб., для соответствующего варианта;

T - годы;

$Э$ - годовые эксплуатационные затраты, руб./год, по вариантам.

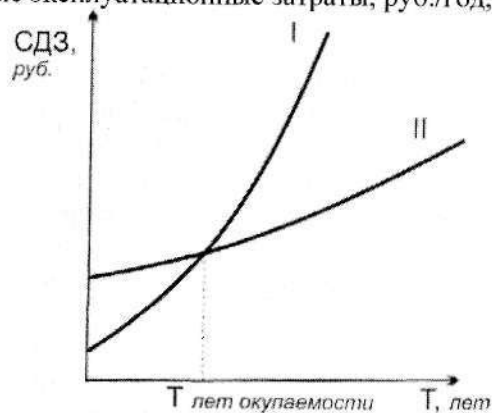


Рис. 14. Сравнение совокупных дисконтированных затрат на два варианта утепления здания и нахождение срока окупаемости дополнительных капитальных затрат (вариант II) меньшими эксплуатационными затратами (вариант I)

Суть метода заключается в том, что для оплаты дополнительного утепления здания привлекаются заемные средства. Если годовая экономия расходов на тепловую энергию в дополнительно утепленном варианте превзойдет годовой процент за кредит, то вариант рентабелен, если нет, то следует уменьшить толщину доутепления. При использовании выражения (2.6) удается более корректно выявить экономическую целесообразность одного варианта утепления над другим. Для определения срока окупаемости средств следует построить графики СДЗ для сравниваемых вариантов от T и найти точку их пересечения. Таким образом, метод позволяет найти вариант не только с минимальными СДЗ за заданное число лет, но и определить за какое время дополнительные затраты окупятся. На рис. 14 показана качественная картинка сравнения СДЗ для двух вариантов.

2.4. ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ НА ЕГО ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ КАЧЕСТВА

2.4.1. Теплотехнические требования к конструированию ограждающей конструкции

В общем случае ограждение состоит из конструктивного слоя, теплоизоляционного слоя и внутреннего и наружного фактурных слоев. Фактурные слои несут защитную функцию от непосредственного воздействия сред на внутренние слои ограждающей конструкции. Основную нагрузку в формировании тепловлажностного режима ограждения несут теплоизоляционный и конструктивный слои. Важным является вопрос: в какой очередности от наружной поверхности надо располагать теплоизоляционный и конструктивный слои.

Конструктивным слоем является, как правило, материал с высокой плотностью ρ_k , обладающий высокой теплопроводностью λ_k и с малой паропроницаемостью μ_k . Теплоизоляционный слой, наоборот, имеет малую плотность $\rho_{т.и.}$, малую теплопроводность $\lambda_{т.и.}$ и высокую паропроницаемость $\mu_{т.и.}$. То есть можно утверждать: $\rho_k > \rho_{т.и.}$; $\lambda_k > \lambda_{т.и.}$; $\mu_k < \mu_{т.и.}$

Для ответа на поставленный выше вопрос рассмотрим два двухслойных ограждения, состоящих из одинаковых конструк-

тивного и теплоизоляционного слоев. Толщина конструктивного слоя в обоих ограждениях одинакова, также как и толщина теплоизоляционных слоев. Отличаются стены только перестановкой слоев. Оба ограждения находятся в равных условиях: температура t_n и парциальное давление водяных паров e_n наружного воздуха, а также температура t_v и парциальное давление водяных паров e_v внутреннего воздуха одинаковы для обоих ограждений.

Построим распределения температуры по сечению каждой стены (рис. 15) и по полученным значениям температуры определим давления насыщения E . Построим также линию изменения парциального давления водяных паров e по сечению стен. Значения потенциала переноса влаги – парциального давления водяных паров e – выше внутри помещения, чем снаружи, что вызывает потенциальное движение влаги изнутри наружу. Следовательно, при необходимости устройства пароизоляции, она должна размещаться ближе к внутренней поверхности ограждения. Кроме того, для уменьшения потока влаги в ограждение без устройства пароизоляции следует внутренние фактурные слои делать плотными, а наружные паропроницаемыми, чтобы не мешать пару выходить в наружный воздух.

Если линии E и e пересекаются, это говорит о том, что в месте где парциальное давление e оказалось выше давления насыщенных водяных паров E (чего физически быть не может), происходит конденсация водяного пара.

Из рис.15 видно, что в случае расположения теплоизоляционного слоя с внутренней стороны, риск выпадения конденсата выше. Следовательно, слой утеплителя необходимо располагать ближе к наружной поверхности ограждающей конструкции.

Такое расположение приводит к следующим преимуществам:

1. Снижается возможность выпадения конденсата внутри ограждающей конструкции, отпадает необходимость ставить пароизоляцию с внутренней стороны ограждения.

2. Стык конструктивного и теплоизоляционного слоев находится всегда в зоне положительных температур, что исключает образование и оттаивание льда и, как следствие, отслаивание утеплителя от конструктивного слоя.

3. Несущие конструкции здания или сооружения находятся при стабильных температурах и подвергаются незначительным температурным деформациям.

4. Ограждения более теплоустойчивы как к воздействию суточных колебаний параметров наружной среды, так и к колебаниям теплоступлений от внутренних тепловых источников.

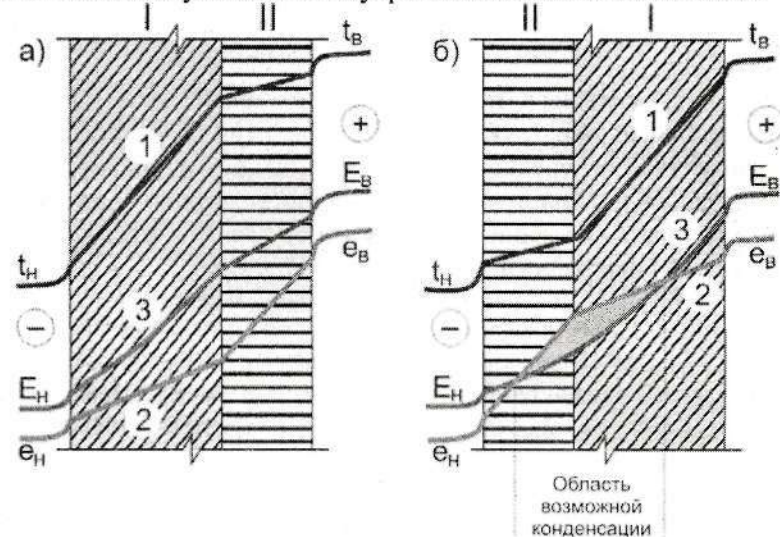


Рис. 15. Линии распределения температуры t (1), парциального давления водяных паров e (2) и давления насыщения E (3) по толщине двухслойной ограждающей конструкции:

I – теплоизоляционный слой, II – конструктивный слой; (а) – конструкция с наружным утеплением стены, (б) – конструкция с внутренним теплоизоляционным слоем (серым залита область, где из построения E оказалось меньше e , что говорит о зоне возможной конденсации в толще ограждения между точками пересечения E и e)

2.4.2. Плоскость возможной конденсации

При разработке *требуемых сопротивлений паропроницанию* было введено понятие условной *плоскости возможной конденсации* внутри ограждающей конструкции, то есть плоскости, с которой наиболее вероятно начинается выпадение конденсата. Требуемые сопротивления паропроницанию ограждения между

внутренней средой и плоскостью возможной конденсации, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, рассчитываются в соответствии с [30]. Плоскость возможной конденсации в однородной (однослойной) ограждающей конструкции располагается на расстоянии, равном $2/3$ толщины конструкции от ее внутренней поверхности, а в многослойной конструкции совпадает с наружной поверхностью утеплителя. Требуемые сопротивления паропроницанию нормируются исходя:

- из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации. В этом случае в среднем за год поток влаги, приходящий в ограждающую конструкцию через внутреннюю поверхность, должен быть не больше, чем поток влаги, высыхающей с наружной поверхности:

$$\frac{(e_B - E)}{R_{\Pi, \text{вн}}} \leq \frac{E - e_H}{R_{\Pi, \text{нар}}}, \quad (2.7)$$

Тогда требуемое сопротивление теплопередаче по первому условию $R_{\Pi}^{\text{тр}}$, Па, равно:

$$R_{\Pi}^{\text{тр}} = \frac{(e_B - E)R_{\Pi, \text{нар}}}{E - e_H}, \quad (2.8)$$

где $R_{\Pi, \text{нар}}$ - сопротивление паропроницанию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, части ограждающей конструкции, расположенной между наружной средой и плоскостью возможной конденсации;

$R_{\Pi, \text{вн}}$ - сопротивление паропроницанию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, части ограждающей конструкции, расположенной между внутренней средой и плоскостью возможной конденсации;

e_B - парциальное давление водяных паров в воздухе помещения, Па, по п. 2.2;

E - парциальное давление водяного пара, Па, в плоскости возможной конденсации за годовой период эксплуатации, определяемое по формуле

$$E = (E_1 z_1 + E_2 z_2 + E_3 z_3) / 12; \quad (2.9)$$

E_1, E_2, E_3 - парциальное давление водяного пара, Па, принимаемое по температуре в плоскости возможной конденсации, устанавливаемой при средней температуре

наружного воздуха соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов (при расчете E_3 для летнего периода температура внутреннего воздуха должна приниматься не ниже средней температуры наружного воздуха для этого периода).

z_1, z_2, z_3 - продолжительность, мес., зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов года, определяемая по табл. 1 с учетом следующих условий:

а) к зимнему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха ниже минус 5°C ;

б) к весенне-осеннему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха от минус 5°C до плюс 5°C ;

в) к летнему периоду относятся месяцы со средними температурами воздуха выше плюс 5°C ;

- из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха. Это второе ограничение требует, чтобы масса влаги M , мг, которую может вобрать в себя без деструкции (разрушения) теплоизоляционный слой, была больше массы влаги, накапливающейся в ограждающей конструкции в течение месяцев с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха:

$$M \geq \frac{24z_0(e_B - E_0)}{R_{\Pi, \text{вн}}} - \frac{24z_0(E_0 - e_H)}{R_{\Pi, \text{нар}}}, \quad (2.10)$$

где E_0 - парциальное давление водяного пара, Па, в плоскости возможной конденсации, определяемое при средней температуре наружного воздуха периода месяцев с отрицательными средними месячными температурами;

z_0 - продолжительность, сут, периода влагонакопления, принимаемая равной периоду с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха по [29];

e_H - среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, определяемое по [29].

Коэффициент 24 приводит продолжительность z_0 к часам.

Масса влаги, которая допускается в материале утеплителя, M , мг определяется из выражения:

$$M = 1000000 \rho_{ув} \delta_{ув} \frac{\Delta w_{ув}}{100}, \quad (2.11)$$

где $\rho_{ув}$ – плотность материала увлажняемого слоя, кг/м³;

$\delta_{ув}$ – толщина увлажняемого слоя ограждающей конструкции, м, принимаемая равной 2/3 толщины однородной (однослойной) стены или толщине теплоизоляционного слоя (утеплителя) многослойной ограждающей конструкции;

$\Delta w_{ув}$ – предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, %, за период влагонакопления, принимаемое по [30].

Таким образом, за увлажняемый слой принят утеплитель. Предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя $\Delta w_{ув}$ показывает, какую долю от массы утеплителя толщиной $\delta_{ув}$, м, и плотностью $\rho_{ув}$, кг/м³, может в себя вобрать утеплитель, не разрушаясь.

Тогда требуемое сопротивление паропрооницанию по второму условию $R_{п2}$, Па, равно:

$$R_{п2}^{TP} = \frac{0,0024 z_o (e_B - E_o)}{\rho_{ув} \delta_{ув} \Delta w_{ув} + 0,0024 z_o (E_o - e_{п1}) / R_{п,нар}}. \quad (2.12)$$

Если какое-либо из двух условий не выполняется, то необходимо принять более плотные слои с внутренней стороны. Можно приближенно рассчитать необходимое сопротивление паропрооницанию дополнительного пароизоляционного слоя по формуле (2.13). Расчет выполняется на основе построения, подобного показанному на рис.15,б при температуре наружного воздуха, равной средней января:

$$R_{п,доп} \geq \frac{R_{п,о} (e_v - E_{кр}) - R_{п,кр} (e_v - e_n)}{E_{кр} - e_n}, \quad (2.13)$$

где $R_{п,о}$ – общее сопротивление паропрооницанию, м²·ч Па/мг, определяемое по (1.48);

$R_{п,кр}$ – сопротивление паропрооницанию от воздуха помещения до критического сечения стены, в котором разность (e-E) максимальна, м²·ч Па/мг;

$E_{кр}$ – упругость водяного пара при полном насыщении в критическом сечении стены, Па.

2.4.3. Тепловлажностные условия эксплуатации ограждающих конструкций здания

Влажностное состояние материалов в ограждающих конструкциях зданий зависит от климата района строительства и от влажностного режима помещений. Различные сочетания наружных и внутренних влажностных режимов формируют условия эксплуатации ограждающих конструкций. Принято выделять две градации условий: А и Б. Условиям эксплуатации А соответствуют сочетания сухого или нормального влажностного режима помещения (по п. 2.2) с сухой зоной района строительства (по п. 2.1.5), а так же сухого режима помещения с нормальной климатической зоной влажности. Все остальные сочетания влажностного режима помещения и климатических зон влажности формируют условия эксплуатации Б, что отражено в [30].

Рекомендуемые [32] значения λ приняты при температуре, равной 25 °С. Для различных строительных материалов с указанием их плотности нормативные значения λ , соответствующие условиям эксплуатации А и Б, приведены в ряде документов, например, в [32]. При этом в таблице указана весовая влажность материала, соответствующая условиям эксплуатации.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В какой очередности от наружной среды с теплотехнической точки зрения надо располагать теплозащитный и конструктивный слои?
2. Где располагается плоскость возможной конденсации в ограждающей конструкции?
3. Из каких условий нормируются требуемые сопротивления паропрооницанию ограждающей конструкции в пределах от внутренней среды до плоскости возможной конденсации.
4. Объясните, что означает условие недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации.
5. Объясните, что означает условие ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха.

6. Где располагается плоскость возможной конденсации водяных паров в однослойной и многослойной стенке?

7. Какой период года считается периодом влагонакопления?

8. Какой слой в многослойной ограждающей конструкции предполагается увлажняемым?

9. Какие части года в расчете влажностного режима ограждения отнесены к зимнему, весенне-осеннему и летнему периодам?

10. Что такое предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, %, за период влагонакопления.

11. Какие две градации тепловлажностных условий эксплуатации зданий выделяются теплотехническими нормами?

2.5. ВЛИЯНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ НА ЕГО ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ КАЧЕСТВА

2.5.1. Фильтрация воздуха через ограждение

Фильтрация холодного наружного воздуха через ограждение вызывает увеличение потерь теплоты и снижение температуры в толще ограждения за счет того, что часть теплоты, проходящей через ограждающую конструкцию, затрачивается на нагревание фильтрующегося воздуха.

Дифференциальное уравнение одномерного температурного поля многослойной стенки при наличии в ней фильтрации с расходом G , кг/(м²·ч) и при отсутствии сопротивлений фильтрационному потоку на границах материальных слоев имеет вид:

$$\frac{d^2 t}{dR^2} - Gc \frac{dt}{dR} = 0 \quad (2.14)$$

где t – температура, изменяющаяся по толщине стенки, °C;

c – удельная теплоемкость воздуха, $c = 1006$ Дж/(кг·°C);

R – термическое сопротивление конструкции, м²·°C/Вт.

Решение этого уравнения предложено Ф.В. Ушковым [37]. Оно определяет температуру t_x , °C, в любом сечении x , считая от наружной поверхности конструкции:

$$t_x = t_n + (t_s - t_n) \frac{e^{cGR_x} - 1}{e^{cGR_0} - 1}, \quad (2.15)$$

где t_n , t_s – температуры наружного и внутреннего воздуха, °C;

R_x – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции при отсутствии фильтрации от наружного воздуха до рассматриваемой плоскости на расстоянии x от наружной поверхности ограждения, м²·°C/Вт;

R_0 – сопротивление теплопередаче всей ограждающей конструкции при отсутствии фильтрации, м²·°C/Вт.

Коэффициент теплопередачи ограждения k_n , Вт/(м²·°C), для случая инфильтрации наружного воздуха через него равен:

$$k_n = \frac{cGe^{cGR_0}}{e^{cGR_0} - 1}. \quad (2.16)$$

При эксфильтрации, то есть при фильтрации воздуха через ограждающую конструкцию из помещения наружу, расход воздуха G отрицателен и, коэффициент теплопередачи ограждения k_o , Вт/(м²·°C), в этом случае рассчитывается по формуле:

$$k_o = \frac{cG}{e^{cGR_0} - 1}. \quad (2.17)$$

Влияние потока фильтрующегося воздуха на трансмиссионный перенос через ограждающую конструкцию характеризуют [4] *коэффициентом порового охлаждения* ε , который равен отношению теряемой через ограждение теплоты при наличии фильтрации к теплотерям без фильтрации наружного воздуха через ограждение:

$$\varepsilon = \frac{k_u}{k_o} = \frac{R_o c G e^{cGR_0}}{e^{cGR_0} - 1} \quad (2.18)$$

где $k_o = 1/R_0$ – коэффициент теплопередачи ограждения без фильтрации наружного воздуха, Вт/(м²·°C).

2.5.2. Нормируемое сопротивление воздухопроницанию

Приведенное сопротивление воздухопроницанию окон, балконных дверей, витражей и световых фонарей жилых, общественных и производственных зданий в соответствии с [30] должно быть не менее *нормируемого сопротивления воздухопроницанию* R_n^{np} , м²·ч/кг:

$$R_n^{np} = \frac{1}{G_n} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{2/3} \quad (2.19)$$

где G_n – нормируемая воздухопроницаемость ограждающих конструкций, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;

ΔP_o – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях светопрозрачных ограждений, при которой определяется сопротивление воздухопроницанию, $\Delta P_o = 10 \text{ Па}$;

ΔP – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях светопрозрачных ограждений, которая формируется по разные стороны рассматриваемого окна.

Нормируемая воздухопроницаемость – это максимальная разрешенная воздухопроницаемость конструкции при любых погодных условиях, в которых может находиться здание, принимаемая в соответствии со СНиП [30]. Например, для жилых и общественных зданий допускается проникновение через окно не более $5 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ при деревянных переплетах и $6 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ при металлических или пластиковых.

Для определения расчетной разности давлений при нахождении требуемого сопротивления воздухопроницанию окна в [30] заложена преобразованная формула (1.58). Наибольшая разность давлений наблюдается в холодный расчетный период на окнах первого этажа, расположенных на наветренном фасаде. Для них расчетная разность давлений может быть получена подстановкой (1.56) в (1.58) при условии, что h , расчетная высота, м, от уровня земли до центра рассматриваемого окна, близка к 0. Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (H-h)(\rho_n - \rho_v)g + (\rho_n v^2/2) K_{\text{дин}}(c_n - c_z) - P_v \approx \\ &\approx H(\rho_n - \rho_v)g + (\rho_n v^2/2) K_{\text{дин}}(c_n - c_z) - 0,5 H(\rho_n - \rho_v)g - \\ &\quad - 0,5 (\rho_n v^2/2) K_{\text{дин}}(c_n - c_z) = \\ &= 0,5 H(\rho_n - \rho_v)g + 0,25 (\rho_n v^2) K_{\text{дин}}(c_n - c_z) \end{aligned} \quad (2.20)$$

В [30], во-первых, принято, что расстояние от центра окна первого этажа до верха здания H равно высоте здания от земли до верха здания (с запасом), во-вторых, что для большинства зданий произведение $(c_n - c_z) K_{\text{дин}}$ приближается к 1, в-третьих, величину ρ_n заменили на γ_n/g , и, в-четвертых, для некоторого запаса коэффициенты увеличили, и формула для расчета разности давлений при определении требуемого сопротивления воздухопроницанию приняла вид:

$$\Delta P = 0,55 H(\gamma_n - \gamma_v) + 0,03 \gamma_n v^2, \quad (2.21)$$

где v – расчетная скорость ветра – максимальная из средних скоростей ветра в январе по румбам v ;

γ_n, γ_v – объемный вес наружного и внутреннего воздуха, $\text{Н}/\text{м}^3$, $\gamma_n = \rho_n g$; $\gamma_v = \rho_v g$.

Объемный вес воздуха γ можно определить по формуле, вытекающей из (1.32):

$$\gamma = (3463) / (273 + t), \quad (2.22)$$

где t – температура, при которой рассчитывается γ . Для определения γ_n температура наружного воздуха принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92, а при расчете γ_v – равной расчетной температуре внутреннего воздуха t_v .

На рис. 16 приведены расчетные разности давлений и требуемые сопротивления воздухопроницанию окон зданий различной высоты в Москве при расчетной температуре наружного воздуха $t_n = -28^\circ\text{C}$ и расчетном ветре $v = 4,9 \text{ м/с}$.

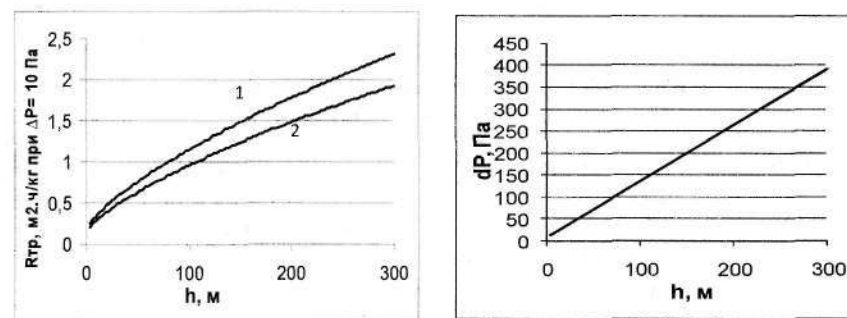


Рис. 16. Зависимость характеристик воздухопроницания заполнения светопроемов от высоты здания на примере г. Москвы: а) расчетные разности давлений ΔP , Па, по разные стороны окна; б) требуемые сопротивления воздухопроницанию $R_{\text{инт}}^{\text{req}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч}/\text{кг}$ при $\Delta P = 10 \text{ Па}$: верхняя кривая для окон в пластиковых или металлических переплетах, нижняя кривая для окон в деревянных переплетах

2.5.3. Приведенное сопротивление воздухопроницанию окон, балконных дверей, витражей и световых фонарей жилых, общественных и производственных зданий

Величина приведенного сопротивления воздухопроницанию окон жилых, общественных и производственных зданий $R_{и}$, $\text{м}^2\text{ч/кг}$ при $\Delta P = 10$ Па, должна по сертификату на заполнение проема быть больше $R_{и}^{тр}$.

По показателям воздухопроницаемости ГОСТ 23166-99 [13] подразделяет оконные и балконные дверные блоки в деревянных, пластиковых и металлических переплетах на 5 классов. Основным признаком классификации является объемная воздухопроницаемость при $\Delta P = 100$ Па. В табл. 3 максимально допустимые воздухопроницаемости для выделенных классов по [13] пересчитаны в массовые воздухопроницаемости при $\Delta P = 10$ Па по СНиП [30], а также в соответствующие им сопротивления воздухопроницанию при разности давлений $\Delta P = 10$ Па.

Таблица 3

Классификация заполнений световых проемов по воздухопроницаемости

Класс	Объемная воздухопроницаемость, $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$, при $\Delta P = 100$ Па для построения нормативных границ классов	Воздухопроницаемость, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ при $\Delta P = 10$ Па	Сопротивление воздухопроницанию, $\text{м}^2\cdot\text{ч/кг}$ при $\Delta P = 10$ Па
А	3	0,77	1,299
Б	9	2,31	0,433
В	17	4,36	0,229
Г	27	6,93	0,144
Д	50	12,83	0,078

2.5.4. Потребность в теплоте на нагревание инфильтрационного воздуха

Расход наружного воздуха, поступающего в помещения в результате инфильтрации в расчетных условиях, зависит от объемно-планировочного решения здания, плотности окон, балконных

дверей, витражей. Задача инженерного расчета для каждого помещения сводится к определению расхода инфильтрационного воздуха G , кг/ч , через отдельные ограждения помещения. Так как проникновение воздуха в помещения через стены и покрытия невелики, ими обычно пренебрегают и рассчитывают только инфильтрацию через заполнения световых проемов, а также через закрытые двери и ворота, которые в обычном эксплуатационном режиме не открываются. В расчетах энергопотребления за отопительный период теплотраты на нагревание инфильтрационного воздуха выполняется через все имеющиеся в здании входные двери и ворота в закрытом состоянии. Затраты теплоты на врывание воздуха через открывающиеся двери и ворота в расчетном режиме учитываются добавками к основным теплотерям через входные двери и ворота.

Расчет должен выявить максимально возможную в расчетных условиях инфильтрацию, поэтому считается, что каждое окно или дверь находится на наветренной стороне здания.

Расчетная разность давлений ΔP , Па, для окна или двери каждого этажа рассчитывается по формуле (1.58) при расчетных температурах наружного и внутреннего воздуха (определяющих плотность наружного и внутреннего воздуха ρ_n и ρ_v) и скорости ветра.

Внутреннее давление P_v в таких расчетах обычно приближенно принимается по (1.56). Тогда разность давлений по разные стороны воздухопроницаемого элемента здания принимает вид:

$$\Delta P = (H-h)(\rho_n - \rho_v)g + (\rho_n v^2/2)K_{дин}(c_n - c_z) - P_v \approx (H-h)(\rho_n - \rho_v)g + (\rho_{ext} v^2/2)K_{дин}(c_n - c_z) - 0,5 \cdot H(\rho_n - \rho_v)g - 0,5(\rho_n v^2/2)K_{дин}(c_n - c_z) = 0,5H(\rho_n - \rho_v)g - h(\rho_n - \rho_v)g + 0,25(\rho_n v^2/2)K_{дин}(c_n - c_z), \quad (2.23)$$

где H – высота здания от земли до верха вытяжной шахты, м;

h – расстояние от земли до центра рассматриваемого воздухопроницаемого элемента в здании (окна, балконной двери, входной двери в здание, ворот, витража), м;

ρ_{ext} , ρ_v – плотности, кг/м^3 , наружного и внутреннего воздуха, определяемые по формуле (1.56);

g – ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

$K_{дин}$ — коэффициент, с помощью которого учитывают изменение динамических свойств ветра в застройке в зависимости от высоты h , принимается по [31].;

c_n, c_z — аэродинамические коэффициенты на наветренном и подветренном фасадах, принимаемые в соответствии с п. 1.5.2.

Из формулы (3.18) видно, что при определенных соотношениях значений слагаемых формулы на верхних этажах может сформироваться отрицательная разность давлений $\Delta P = P_n - P_v$, что означает возможность инфильтрации.

Расход инфильтрационного воздуха $G_{инф}$, кг/(ч·м²), при этой разности давлений составит:

- через окна

$$G_{инф} = (1/R_{и,ок}^{тр}) (\Delta P / \Delta P_0)^{2/3}, \quad (2.24)$$

- через двери и ворота

$$G_{инф} = (1/R_{и,дв}^{тр}) (\Delta P / \Delta P_0)^{1/2}, \quad (2.25)$$

где $R_{и,ок}^{тр}$ — фактическое сопротивление воздухопроницанию окна, м²·ч/кг, при $\Delta P = 10$ Па;

$R_{и,дв}^{тр}$ — фактическое сопротивление воздухопроницанию двери и ли ворот, м²·ч/кг, при $\Delta P = 10$ Па.

ΔP_0 — разность давлений, принятая для определения требуемого сопротивления воздухопроницанию, $\Delta P_0 = 10$ Па.

Расход теплоты на нагревание инфильтрационного воздуха $Q_{инф}$, Вт, определяется по формуле

$$Q_{инф} = 0,28 G_{инф} c A (t_v - t_n) k, \quad (2.26)$$

где c — теплоемкость воздуха, $c = 1,006$ кДж/(кг·°C);

k — коэффициент учета влияния встречного теплового потока в воздухопроницаемых конструкциях, равный 0,7 — для окон и балконных дверей с тройными раздельными переплетами, 0,8 — для окон и балконных дверей с двойными раздельными переплетами, 0,9 — для окон и балконных дверей со спаренными переплетами, и 1 — для окон и балконных дверей с одинарными переплетами.

Расчеты показали [20], что через плотные окна в многоэтажных зданиях существует инфильтрация, которая доходит до 20% от трансмиссионных теплопотерь и должна быть учтена в тепловой нагрузке на отопление здания.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Как влияет фильтрация наружного воздуха через ограждающую конструкцию на теплопотери через нее.
2. Что такое коэффициент порового охлаждения?
3. Что такое нормативная воздухопроницаемость ограждения G^n ?
4. Что такое нормируемое сопротивление воздухопроницанию?
5. Напишите формулу расчета требуемого сопротивления воздухопроницанию $R_n^{тр}$ окна.
6. Напишите формулу для определения фактической воздухопроницаемости окна.
7. Напишите формулу расчета разности давлений по обе стороны окна при выборе его уплотнения.
8. От чего зависит фактическая воздухопроницаемость окна?
9. Почему через окна разных этажей инфильтрация различна?
10. Напишите формулу расчета разности давлений по обе стороны окна при определении инфильтрации в здании со сбалансированной вентиляцией.
11. Что определяет внутреннее давление в здании со сбалансированной вентиляцией?
12. Напишите формулу расчета разности давлений по обе стороны окна при определении инфильтрации в здании с естественной вытяжной вентиляцией и неорганизованным притоком.
13. Что определяет внутреннее давление в здании с естественной вытяжной вентиляцией и неорганизованным притоком.
14. От чего зависит гравитационная часть разности давлений по обе стороны окна?
15. От чего зависит ветровая часть разности давлений по обе стороны окна?
16. Физический смысл аэродинамических коэффициентов c_n и c_z здания при определении ветрового давления.
17. Физический смысл коэффициента $K_{дин}$ при определении ветрового давления.

3. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ СЛОЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ

3.1. ОСНОВНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ И МЕТОДЫ ЕГО РЕШЕНИЯ

Процесс передачи теплоты через ограждение, все параметры которого остаются неизменными во времени, называется *стационарным* и является наиболее простым случаем теплопередачи. К стационарной теплопередаче обычно стремятся привести расчетные условия. Когда это удастся, решение сводится к рассмотрению сравнительно простых стационарных температурных полей и режимов теплопередачи конструкций.

Тепловые и влажностные процессы, рассмотренные выше, также относятся к стационарным. Но это были *одномерные температурные и влажностные поля* с распространением температуры и парциального давления водяного пара в одном направлении (вдоль одной оси).

В этом разделе будут рассмотрены методы решения задач, связанных с двумерным распределением температуры в конструкции. *Двумерные и трехмерные температурные поля* в ограждениях возникают по многим причинам. Во-первых, из-за примыкания ограждений друг к другу и неоднородной геометрии самого ограждения (рис. 17). То есть, наличие углов, которые образуют наружные стены, примыкание перекрытий и перегородок к ним, нарушение глади стены различными проемами, заполненными окнами, витражами, дверями и т. д. приводит к искривлению температурного поля. Кроме того сами современные наружные ограждения отличаются сложностью своей конструкции. В них нередко имеются теплопроводные включения в виде регулярно уложенных связей, кронштейнов, обрамляющих контуров и других конструктивных элементов.

При рассмотрении конструкции с двумерным температурным полем [4] инженера интересует два вопроса: какая наименьшая температура сформируется в какой-либо точке на внутренней поверхности наружного ограждения, и какие теплопотери двумерной зоны следует учесть в нагрузке на отопление.

Двумерное температурное поле описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial t}{\partial y} \right] = 0, \quad (3.1)$$

где $\lambda(x, y)$ - заданное значение теплопроводности в каждой точке поля, Вт/(м·°C).

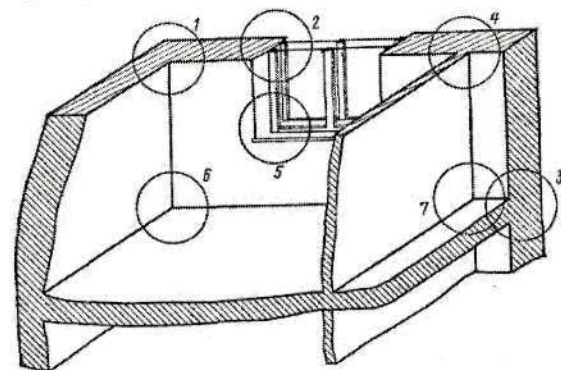


Рис. 17. Элементы формирования двумерных и трехмерных температурных полей в наружных ограждениях здания

Уравнение температурного поля в однородной изотропной массе упрощается:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0. \quad (3.2)$$

Решение этого уравнения для различных условий может выполняться различными методами. *Аналитические методы* применимы только для простейших случаев, но они бывают полезны, так как позволяют приблизительно рассчитать температурное поле и определить наиболее значимые факторы, влияющие на процесс теплопередачи. Как пример аналитического решения уравнения (3.2) [25], полезна формула для определения температурного профиля по сечению стены в наружном углу, т.е. изменения температуры от внутренней поверхности вглубь угла до наружной поверхности:

$$t_x = t_B - r' \cdot (t_B - t_H), \quad (3.3)$$

где t_B - температура внутреннего воздуха, °C;

t_n — температура наружного воздуха, °C;

r' — относительное термическое сопротивление стены, равное:

$$r' = \frac{R_x \cdot r}{R_o^{np}} - \frac{1}{2} \left(\frac{R_x \cdot r}{R_o^{np}} \right)^2 + \sqrt{\frac{R_x \cdot r}{2R_o^{np}}} - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{R_x \cdot r}{R_o^{np}} \right)^{3/2}. \quad (3.4)$$

Здесь R_x — сопротивление теплопередаче от внутреннего воздуха до точки x , м²·°C/Вт;

R_o^{np} — приведенное сопротивление теплопередаче глади стены, м²·°C/Вт;

r — коэффициент теплотехнической однородности стены.

При $R_x/R_x < 0,15$, что соответствует $R_o > 1$ м²·°C/Вт, вторым и четвертым слагаемыми можно пренебречь. Погрешность будет менее 5%, причем в сторону завышения r' или занижения температуры в углу, что дает запас. Для получения формулы, описывающей температуру на внутренней поверхности наружного угла τ_y , в формуле (3.4) следует на место R_x поставить сопротивление теплообмену на внутренней поверхности R_w . После подстановки полученного выражения в (3.3) с учетом выравнивающего действия теплопроводного слоя с внутренней поверхности ограждения, приводящего к уменьшению отклонения τ_y от температуры на внутренней поверхности стены вдали от угла, получим:

$$\tau_y = t_n - \frac{1}{2} \left(\frac{R_w \cdot r}{R_o^{np}} + \sqrt{\frac{R_w \cdot r}{2R_o^{np}}} \right) \cdot (t_n - t_n),$$

или упрощенно

$$\tau_y = t_n - 0,75 \left(R_w \cdot r / R_o^{np} \right)^{2/3} \cdot (t_n - t_n). \quad (3.5)$$

Температура внутренней поверхности угла в холодный период года всегда ниже, чем на глади стены, потому что наружная холодная поверхность намного превышает внутреннюю теплую поверхность. Знание температуры в углу необходимо для проверки отсутствия конденсации водяных паров из воздуха помещения на холодных поверхностях угла.

Численные сеточные методы обычно реализуются на ЭВМ. К таким методам относятся метод конечных разностей, метод конечного элемента и др. Эти методы могут достигать практически любой требуемой точности, но весьма трудоемки и, как правило,

требуют хорошей математической подготовки. **Приближенные инженерные методы** связаны, во-первых, с экспертной оценкой процесса, а во-вторых, основаны на обобщении результатов подробных и трудоемких расчетов. Из **методов физической аналогии** в настоящее время реально применяется метод электротепловой аналогии.

3.2. МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Метод конечных разностей относится к методам сеток. Сущность метода сеток [4] состоит в замене температурного поля с распределенными параметрами полем с сосредоточенными параметрами, путем разбивки области двумерного сечения конструкции на элементарные площадки (рис. 18, а и б), центры которых соединяют сосредоточенными термическими сопротивлениями.

Уравнение стационарной двумерной теплопроводности в случае однородного изотропного материала для такой сетки записывают в конечных разностях:

$$\frac{\Delta_x^2 t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta_y^2 t}{\Delta y^2} = 0. \quad (3.6)$$

Вторые конечные разности приращения температуры в направлениях x , $\Delta_x^2 t$, и y , $\Delta_y^2 t$, равны

$$\Delta_x^2 t = (t_1 - t_0) - (t_0 - t_2) = t_1 + t_2 - 2t_0; \quad \Delta_y^2 t = (t_3 - t_0) - (t_0 - t_4) = t_3 + t_4 - 2t_0. \quad (3.7)$$

Решение уравнения (3.6) относительно температуры в произвольном узле сетки t_0 (рис. 18), если шаг сетки Δx в направлении x и Δy в направлении y одинаковый, может быть получено в виде.

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}. \quad (3.8)$$

Таким образом, при однородном поле температура в произвольном узле сетки с равными шагами по обоим координатам равна среднеарифметическому значению температуры в соседних узлах. Для конструкции неоднородной и с произвольным шагом разбивки сетки решение конечно-разностного уравнения относительно t_0 имеет вид:

$$t_0 = \frac{k_{0-1}t_1 + k_{0-2}t_2 + k_{0-3}t_3 + k_{0-4}t_4}{k_{0-1} + k_{0-2} + k_{0-3} + k_{0-4}}, \quad (3.9)$$

где k_{0-1} , k_{0-2} , k_{0-3} , k_{0-4} – проводимости соединений тепловой сетки (их определение для двух частных случаев приведено на рис. 19 и 20).

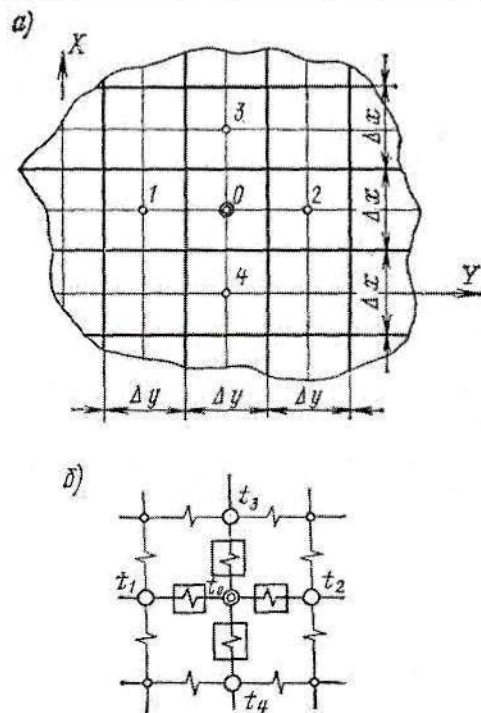


Рис. 18. Сетка, разбивающая непрерывное температурное поле на элементарные площадки (а) и схема термических сопротивлений, связывающая сосредоточенные центры блоков (б)

Из уравнения (3.7) следует, что в общем случае температура в произвольном узле равна средневзвешенному (по проводимостям связей) значению температур в соседних узлах. Это уравнение может быть использовано и для определения температуры в узлах, граничащих с поверхностью ограждения (рис. 19) и в узлах на стыках материальных слоев (рис. 20).

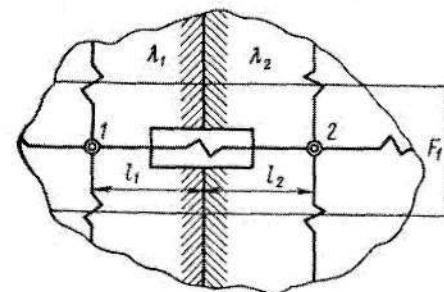


Рис. 19. К определению проводимостей теплоты между центрами элементарных площадок для неоднородного поля

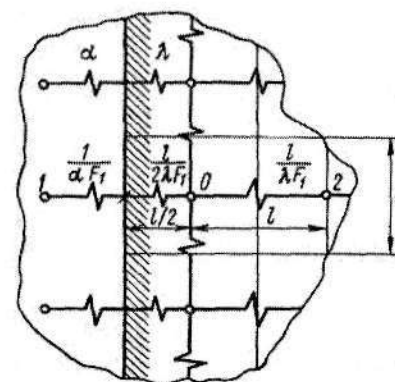


Рис. 20. К определению проводимостей теплоты на границе тела со средой

Проводимость k между узлами должна определяться по правилу сложения параллельно и последовательно расположенных термических сопротивлений R . Могут быть два случая определения термических сопротивлений. Сопротивление теплопроводности однородного плоского элемента равно:

$$R = l / (\lambda F), \quad (3.10)$$

где l – расстояние между двумя узлами, между которыми определяется термическое сопротивление R , м;

F – шаг по оси, перпендикулярной рассматриваемой линии соединения узлов.

Например, термическое сопротивление между узлами 1 и 2 на рис. 18 равно:

$$R_{1-2} = \frac{l_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{l_2}{\lambda_2 F_1} = \frac{\Delta x_1}{2\lambda_1 \Delta y} + \frac{\Delta x_2}{2\lambda_2 \Delta y}. \quad (3.11)$$

Проводимость k_{1-2} в этом случае равна $k_{1-2} = 1/R_{1-2}$.

Сопротивление теплоотдаче на поверхности элемента, граничащего с воздухом, равно:

$$R = 1/(\alpha F), \quad (3.12)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на этой поверхности, Вт/(м²·°C);

F – длина элемента, м.

Сопротивление теплопередаче между узлами 0 и 1, а также 0 и 2 по рис. 19 равно:

$$R_{0-1} = \frac{1}{\alpha F_1} + \frac{l}{2\lambda F_1} = \frac{1}{\alpha \Delta y} + \frac{\Delta x}{2\lambda \Delta y}. \quad (3.13)$$

$$R_{0-2} = \frac{l}{\lambda F_1} = \frac{\Delta x}{\lambda \Delta y}. \quad (3.14)$$

где l – расстояние между двумя узлами по оси x , $l = \Delta x$, м;

F – шаг по оси, перпендикулярной рассматриваемой линии соединения узлов, $F = \Delta y$, м.

Проводимости в этом случае равны $k_{1-2} = 1/R_{0-1}$; $k_{0-2} = 1/R_{1-2}$.

Разбивку на элементарные блоки, в центрах которых расположены узлы тепловой сетки, лучше проводить так, чтобы их границы совпадали с характерными поверхностями в сечении ограждения. Чем мельче разбивка, тем выше точность расчета. Расчет состоит в решении системы линейных уравнений, состоящей из столько уравнений, сколько узлов в принятой тепловой сетке.

3.3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ

3.3.1. Коэффициент теплотехнической однородности

Уже упоминавшийся в п. 1.1.7 *коэффициент теплотехнической однородности* g является оценкой влияния различных случаев нарушения одномерности теплового потока сквозь наружное

ограждение. Это могут быть регулярные внутренние связи, прижимающие слой утеплителя и фасадный слой к внутреннему конструктивному слою; кронштейны, удерживающие навесные фасадные системы, а также примыкающие друг к другу ограждающие конструкции. Для теплотехнических расчетов g очень удобная характеристика, так как сразу показывает долю, которую составляет сопротивление теплопередаче реальной конструкции по отношению к условному сопротивлению теплопередаче конструкции без теплопроводных включений и примыканий.

Значения коэффициента теплотехнической однородности получают из подробного прямого расчета сложной трехмерной конструкции одним из численных методов, например, методом конечных разностей. Поэтому понятно, что точность применения коэффициента теплотехнической однородности зависит от того, насколько близко выполненный расчет отражает реальный случай.

Диапазон значений коэффициента теплотехнической однородности лежит в очень широких пределах: 1 – 0,5 и даже ниже. Разумеется, архитекторы и конструкторы стремятся к проектированию ограждающих конструкций с высоким g , однако в ряде случаев это практически невозможно. Столь значительный диапазон g свидетельствует о том, что при расчете теплопотерь инженер-теплотехник должен очень ответственно подходить к оценке сопротивлений теплопередаче ограждений, так как завышение значения коэффициента теплотехнической однородности может привести к занижению фактических теплопотерь, а занижение – к лишним затратам на утепление здания.

3.3.2. Метод сложения проводимостей

Для плоских ограждающих конструкций с теплопроводными включениями толщиной больше 50% толщины ограждения, теплопроводность которых не превышает теплопроводности основного материала более чем в 40 раз, эквивалентное термическое сопротивление определяется следующим образом.

1. Плоскостями, параллельными направлению теплового потока, ограждающая конструкция (или ее часть – регулярный элемент) условно разрезается на параллельные теплового потоку

участки. Термическое сопротивление всей конструкции определяется по формуле:

$$R = \frac{A}{\sum_{i=1}^I (A_i / R_i)}, \quad (3.15)$$

где A_i, R_i — соответственно площадь, m^2 , и термическое сопротивление, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, i -го параллельного участка в выделенном регулярном элементе;

A — общая площадь регулярного элемента конструкции, равная сумме площадей всех параллельных участков, m^2 ;

I — число параллельных участков, на которые разбит регулярный элемент.

При этом участки могут быть однородными (однослойными) или многослойными по ходу движения теплового потока. Для этих участков термическое сопротивление определяется по формуле (1.23), в которой термическое сопротивление каждого слоя рассчитывается по (1.4).

2. Плоскостями, перпендикулярными теплому потоку, ограждающая конструкция в пределах регулярного элемента условно разрезается на слои. При этом слои могут быть однородными (однослойными) или многослойными по ходу движения теплового потока. Для каждого из этих однородных слоев термическое сопротивление определяется по формуле (1.4). Другие слои могут состоять из двух или более параллельных участков. Эквивалентное термическое сопротивление таких слоев находится по формуле (3.15). Термическое сопротивление конструкции рассчитывается по формуле (1.23).

3. Эквивалентное термическое сопротивление всей конструкции с учетом полученного термического сопротивления при разбивке параллельными теплому потоку плоскостями R_{\parallel} и при разбивке перпендикулярными потоку плоскостями R_{\perp} равно:

$$R = \frac{R_{\parallel} + 2R_{\perp}}{3}. \quad (3.16)$$

Если величина R_{\parallel} превышает величину R_{\perp} более чем на 25% или ограждение не является плоским (имеет выступы на поверхности), то эквивалентное сопротивление теплопередаче ограж-

дающей конструкции следует определять подробным расчетом двумерного или трехмерного температурного поля.

3.3.3. Фактор формы

Еще одним методом инженерного расчета приведенного сопротивления теплопередаче, основанного на обобщении результатов подробных прямых расчетов трехмерного температурного поля, является метод *фактора формы* [4]. Сейчас, когда нормы теплозащиты резко возросли, те инженерные наработки, которые существовали до выдвижения этих норм, не адекватно оценивают характеристики процесса теплопередачи. Пока не будет выполнено обобщение новых расчетов, применение фактора формы на практике маловероятно.

Рассмотрим сущность метода фактора формы на примере стыка наружной стены с окном. Нам необходимо определить влияние этого стыка на приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены. Считается, что это влияние (нарушение одномерности теплового потока) значительно проявляется на полосе стены вдоль всего стыка. Ширина этой полосы (отсчитывая от стыка) равна двум калибрам стены. За один калибр принимают условную толщину однородного ограждения с термическим сопротивлением R , равным термическому сопротивлению реальной стены, и теплопроводностью λ , равной средней теплопроводности материалов, из которых выполнено само ограждение. До введения повышенных норм теплозащиты ограждающие конструкции по большей части были однослойными, и с выбором среднего значения λ трудностей не возникало. Сейчас же необходимо способ усреднения оговаривать при обобщении результатов расчета для определения факторов формы. Ширина a_f в два калибра:

$$a_f = 2 \lambda R. \quad (3.17)$$

Фактор формы f показывает, во сколько раз тепловой поток на участке с двумерным температурным полем больше теплового потока через стену с одномерным температурным полем (вдали от стыка).

Для некоторых двумерных элементов (угла наружной стены, стыков различных ограждений) фактор формы может быть вычислен относительно внутренней или наружной поверхности ог-

раждения. В общем случае для одного и того же элемента фактор формы величина переменная, зависящая не только от геометрии элемента, но и от условий теплообмена на его поверхностях, то есть от отношения R_b/R_o [25]. При увеличении этого отношения фактор формы любого элемента стремится к 1, а при уменьшении к предельной величине, зависящей только от геометрии элемента. Так как в расчете теплопотерь помещением площади ограждений принимают по наружному обмеру, f следует определять относительно наружной поверхности. При этом приведенное сопротивление теплопередаче $R_{o,пр}$, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, например, наружной стены определяется следующим образом. Теплопотери через всю стену $Q_{н,с}$, Вт, равны:

$$Q_{н,с} = \frac{A}{R_{o,пр}} (t_s - t_n), \quad (3.18)$$

где A – площадь стены, m^2 ;

t_s, t_n – температура соответственно внутреннего и наружного воздуха, $^\circ C$.

Площадь A_f , на которой проявляется двумерное температурное поле, т.е. площадь полосы шириной в два калибра и длиной и длиной стыка l равна: $A_f = a_f \cdot l$. Так как к наружной стене примыкают окно, перекрытие – потолок, перекрытие – пол, перегородки, то надо суммировать воздействия всех стыков, имеющих факторы формы f_i . Если принять, что сопротивление теплопередаче стены по глади равно R_o , $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, то теплопотери через стену с учетом всех примыканий будут равны

$$Q_{н,с} = \frac{A}{R_o} (t_s - t_n) + \sum_{i=1}^I (f_i - 1) \frac{a_f \cdot l_i}{R_o} (t_s - t_n). \quad (3.19)$$

Так как выражения (3.18) и (3.19) можно приравнять друг другу, то из этого равенства найдется выражение для приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции:

$$R_{o,пр} = R_o \frac{1}{1 + \frac{1}{A} \sum_{i=1}^I (f_i - 1) a_f \cdot l_i}. \quad (3.20)$$

Таким образом, вывод формулы (3.20) через фактор формы полностью согласуется с определением приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, данным в п.1.1.7.

3.4. ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ АНАЛОГИЯ

Одним из методов расчета двумерного температурного поля является метод моделирования процесса теплопроводности с помощью электропроводности. Возможность замены явления, которые различны по содержанию, обоснована аналогией между ними, подтверждающей одинаковым математическим описанием обоих процессов дифференциальными уравнениями [4], которые для однородных конструкций записываются в следующем виде:

$$\text{в тепловом поле } \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0; \quad (3.21)$$

$$\text{в электрическом поле } \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0, \quad (3.22)$$

где t и U – потенциалы переноса энергии t – температура в тепловом поле и U – в электрическом.

В процессах теплопроводности и электропроводности существуют соответствующие друг другу прямые аналоги, которые приведены в табл. 4.

Таблица 4

Прямые аналоги в тепловом и электрическом полях

Тепловое поле	Электрическое поле
Температура, потенциал переноса теплоты, $t, ^\circ C$	Напряжение, электрический потенциал $U, В$
Количество теплоты, $Q, Дж$	Количество электричества, Кул
Теплопроводность материала λ , $Вт/(м \cdot ^\circ C) = Дж/(с \cdot м \cdot ^\circ C)$	Электрическая проводимость $1/\rho$, Кул/($с \cdot м \cdot В$), где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом $м$
Термическое сопротивление однородного ограждения площадью $A, м^2$, и толщиной $\Delta_r, м$, $R_r = \Delta_r / (A \cdot \lambda)$, $^\circ C / Вт$	Электрическое сопротивление проводника сечением $S, м^2$, и длиной $\Delta_s, м$, $R_s = \Delta_s \cdot \rho / S$, Ом
Тепловой поток, $q = \Delta t / R_r$, $Дж/с = Вт$	Сила электрического тока $I = \Delta U / R_s$, А

Часто приходится решать задачи теплопередачи, а не только теплопроводности. Но в электрическом поле нет аналогов коэффициентам теплоотдачи на внутренней α_n , Вт/(м²·°C), и на наружной α_n , Вт/(м²·°C), поверхностях. Поэтому, процесс теплоотдачи на поверхностях ограждения при электро моделировании заменяется процессом теплопроводности, и граничные условия третьего рода заменяются на граничные условия первого рода.

Как правило, все способы решения тепловых задач с помощью электротеплового моделирования разделяют на две группы [4]. К одной группе относят способы, использующие модель из материала с непрерывной проводимостью. Модели этой группы называют «геометрическими аналогами», так как они повторяют геометрию моделируемой системы и ее непрерывный характер. В другую группу входят способы, создающие модель из эквивалентных электрических цепей с сосредоточенными электрическими характеристиками (сопротивлением и т.д.). Модели второй группы называют «моделирующими цепями».

Применяются модели из тонкого листа токопроводящей графитовой бумаги, работающие по принципу «геометрического аналога».

Электрическая модель вырезается из листа по форме, геометрически подобной оригиналу; условия на границах задаются контактами из листовой латуни.

На рис. 21,а изображено сечение гладкой наружной стены, а справа – электрическая модель этого ограждения. Так как все рассуждения, приведенные ниже, сохраняют силу и для сечения конструкций с двумерным температурным полем для простоты на рис.21, а рассмотрено однородное ограждение с одномерным распределением температуры. Изотермы в сечении такой стены горизонтальны. На рис.21, б представлена электро модель – геометрический аналог той же стены.

Толщине стены $\Delta_{ст}^T$, м, в модели соответствует $\Delta_{ст}^Э$, м, а длине стены l_T , м, соответствует $l_Э$, м.

Введем в тепловой модели на внутренней и наружной поверхностях стены дополнительные слои, эквивалентные своим сопротивлением теплопроводности реальному сопротивлению тепло-

отдачи $\Delta_{эв}^B$, м, и $\Delta_{эв}^H$, м. Толщины эквивалентных слоев на внутренней и наружной поверхностях стены, м, равны:

$$\Delta_{эв}^B = \frac{\lambda}{\alpha_n}, \quad \Delta_{эв}^H = \frac{\lambda}{\alpha_n}, \quad (3.23)$$

где λ – теплопроводность материала стены, Вт/(м·K);

α_n , α_n – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, Вт/(м²·K).

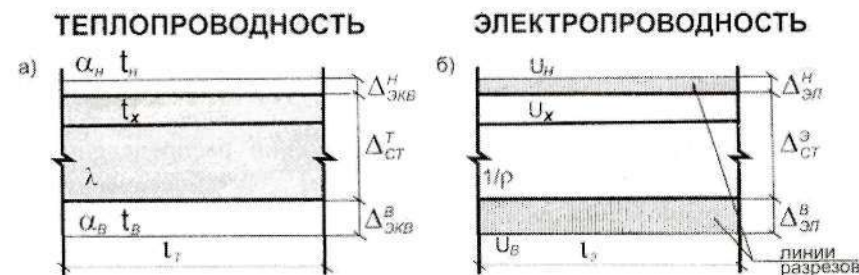


Рис. 21. Электротепловая аналогия:

а – сечение наружной стены; б – электро модель стены

В электрическом поле аналогами эквивалентных слоев будут $\Delta_{эл}^B$, м, и $\Delta_{эл}^H$, м. Эти слои должны обладать проводимостью только в одном, перпендикулярном поверхности ограждения направлении. Проводимость электрического тока в этих слоях в направлении, параллельном поверхности, устраняется разрезами, показанными на рис. 21,б.

Если на поверхности эквивалентных слоев ограждения заданы значения температуры внутреннего t_n и наружного t_n воздуха, то распределение температуры по сечению ограждения в общем случае определяется величинами $1/\lambda$, $\Delta_{эв}^B$, $\Delta_{ст}^T$, $\Delta_{эв}^H$, l_T . Аналогичное распределению температуры в сечении стены распределение электрического потенциала на электро модели зависит от значений ρ , $\Delta_{эл}^B$, $\Delta_{ст}^Э$, $\Delta_{эл}^H$, $l_Э$, где ρ – удельное электрическое сопротивление токопроводящей бумаги, Ом·м или м·ед.потенц./с/(ед. колич. эл.).

Для того, чтобы процессы были подобны друг другу, необходимо соблюдать следующие масштабные соотношения:

- масштаб температуры:

$$m_t = \frac{t_g - t_n}{U_g - U_n}, \quad (3.24)$$

- масштаб длин:

$$m_l = \frac{l_T}{l_\Sigma} = \frac{\Delta_{cm}^T}{\Delta_{cm}^g} = \frac{\Delta_{экв}^B}{\Delta_{эл}^B} = \frac{\Delta_{экв}^H}{\Delta_{эл}^H}. \quad (3.25)$$

- масштаб сопротивлений:

$$m_{\gamma_\lambda} = \frac{1}{\rho}. \quad (3.26)$$

Температурное поле стены с равномерно распределенными параметрами воспроизводится на модели электрическим полем также с равномерно распределенными параметрами. Поэтому, измерив значения потенциала в отдельных точках модели и построив электрическое поле в форме линий равных потенциалов, можно пересчитать его в температурное поле в виде изотерм в стене. Для этого надо воспользоваться масштабом температур.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое стационарная теплопередача?
2. Что такое двумерное температурное поле?
3. Каким дифференциальным уравнением описывается двумерное температурное поле в стационарном режиме?
4. Какие методы расчета двумерных температурных полей Вы знаете?
5. Перечислите характерные двумерные элементы в наружной стене угловой комнаты верхнего этажа.
6. Что является задачей расчета теплопередачи через двумерный элемент наружного ограждения?
7. Сущность метода сеток.
8. Напишите уравнение двумерной теплопроводности в конечных разностях.

9. Чему равна температура в произвольном узле сетки двумерного температурного поля при однородном материале и равношаговой разбивке в обоих направлениях?

10. Чему равна температура в произвольном узле сетки двумерного температурного поля при неоднородном материале или произвольной разбивке в обоих направлениях?

11. Что такое фактор формы?

12. Что такое калибр при определении фактора формы?

13. Что такое приведенное сопротивление теплопередаче сложного ограждения?

14. Что такое электротепловая аналогия?

15. Почему возможна электротепловая аналогия?

16. Какие прямые аналоги в тепловом и электрическом полях Вы знаете?

17. Существует ли в электрическом поле аналог коэффициента теплообмена на поверхности стенки?

18. С помощью каких двух групп электрических моделей осуществляется моделирование процессов теплопередачи?

19. Из какого материала выполняется электрическая модель?

20. Почему в электрической модели приходится прибегать к эквивалентным слоям, отсутствующим в реальной стенке?

21. Зачем в модели эквивалентного слоя делаются надрезы перпендикулярно границе стенки?

22. Зачем при моделировании соблюдаются масштабные соотношения?

23. Чему равен масштаб температур при электротепловом моделировании?

24. Чему равен масштаб длин при электротепловом моделировании?

4. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДЕНИЯ И ПОМЕЩЕНИЯ

4.1. ОСНОВНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

В естественных условиях режим теплопередачи через ограждения всегда является **нестационарным**, т.е. с изменяющейся температурой в каких-либо точках, а в общем виде и с другими изменяющимися характеристиками, например теплопроводностью. Температура наружного воздуха, интенсивность солнечной радиации, сила и направление ветра непрерывно меняются. Температура внутри помещения также изменяется. Ее колебания происходят около некоторых средних значений в пределах отдельных сезонов. Поэтому, несмотря на известную сложность, для правильного расчета теплового режима помещений процесс передачи теплоты через ограждения необходимо рассматривать как нестационарный.

Основным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности является уравнение Фурье:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (4.1)$$

где z — время.

Это уравнение можно переписать в конечно-разностном виде. Для случая однородного материала это уравнение имеет вид:

$$\Delta_z t = \frac{\Delta z}{c\rho} \lambda \frac{\Delta_x^2 t}{\Delta x^2}. \quad (4.2)$$

То же уравнение можно короче записать через критерий Фурье. Учитывая, что в конечных разностях этот критерий равен

$$Fo_{\Delta} = \frac{\Delta z}{c\rho \Delta x} \cdot \frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{\Delta z \cdot a}{\Delta x^2}, \quad (4.3)$$

уравнение примет вид

$$\Delta_z t = Fo_{\Delta} \cdot \Delta_x^2 t. \quad (4.4)$$

4.2. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Основными методами, используемыми на практике для решения задач нестационарной теплопередачи через ограждения являются:

- **аналитические методы решения** применяются для ограниченного круга задач и тем не менее достаточно сложны для повседневной инженерной практики;

- **методы аналогии** — электротепловой, теплогидравлической; требуют специального оборудования;

- **численные методы решения на ЭВМ.** Одним из таких методов является **метод конечных разностей**.

Рассмотрим явную схему конечно-разностного решения. Разобьем стену на элементарные отрезки Δx . (рис. 22). Выберем слой n . Слева от него находится слой $n-1$, справа — $n+1$. В момент z температура в центрах слоев была t_n , t_{n-1} , t_{n+1} . Нас интересует какой будет температура $t_{n,z+1}$ в центре слоя n через временной шаг Δz . С учетом того, что разность температуры во времени в точке n $\Delta_z t = t_{n,z+1} - t_{n,z}$, и вторая разность по координате в точке n $\Delta_x^2 t = (t_{n-1,z} - t_{n,z}) - (t_{n,z} - t_{n+1,z}) = t_{n-1,z} + t_{n+1,z} - 2t_{n,z}$, и подставив эти значения в уравнение (4.4), получим:

$$t_{n,z+1} = t_{n,z} + Fo_{\Delta} (t_{n-1,z} + t_{n+1,z} - 2t_{n,z}). \quad (4.5)$$

Если сделать разбивку на Δx и Δz так, чтобы $Fo_{\Delta} = 1/2$, то температура в произвольном сечении n , спустя временной шаг Δz , будет равна

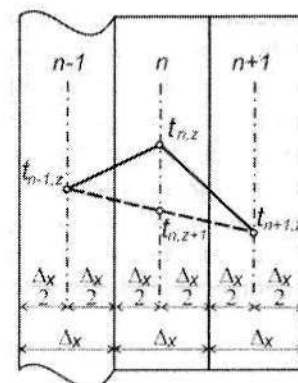


Рис. 22. Разбивка на элементарные слои при явной конечно-разностной схеме

$$t_{n,z+1} = \frac{t_{n-1,z} + t_{n+1,z}}{2}. \quad (4.6)$$

Написав уравнения (4.6) для всех точек сечения ограждения, можно многократно решать систему уравнений по числу элементарных слоев, последовательно определяя значения температуры в центре каждого элементарного слоя через шаг по времени Δz в зависимости от изменения температуры на границах интересующей в решении области.

Помимо рассмотренной явной схемы решения уравнения теплопроводности существуют неявные схемы, в которых шаги по координате и по времени не связаны. Решение получается с большей точностью при достаточно быстрой сходимости.

Методом конечных разностей можно решать практически любые задачи нестационарной теплопроводности. Если на границах задавать коэффициенты теплоотдачи в зависимости от интересующих в задаче факторов (изменяющихся температуры окружающей среды и подвижности воздуха у ограждения), то можно учесть их изменение во времени. Следует внимательно относиться к задаваемым начальным условиям – распределению температуры по сечению ограждения.

4.3. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАЖДЕНИЯ

Часто при определении нагрузок на системы кондиционирования воздуха возникают задачи, связанные с оценкой периодически изменяющихся теплоступлений в помещение. Брать нагрузку по максимуму – значит завышать требуемую мощность охлаждения, так как максимальная нагрузка непродолжительна. Средняя за время работы кондиционера может оказаться заниженной. Для периодических задач в СССР была разработана **теория теплоустойчивости**, позволяющая найти решение этих задач. У истоков теории теплоустойчивости стояли О.Е. Власов [8], Г.А. Селиверстов [27], Е.Г. Швидковский [41], С.И. Муромов [22], А.М. Шкловер [42], Л.А. Семенов [28].

Теплоустойчивость ограждения – это его свойство поддерживать относительное постоянство температуры при изменении тепловых воздействий.

Теория теплоустойчивости построена на решении задач при **гармонических** (изменяющихся по синусоиде) **тепловых воздействиях**. Любая другая периодическая кривая изменения воздействия может быть разложена в ряд Фурье и задача решена относительно каждой гармоники этого ряда. После этого все решения складываются.

В теории теплоустойчивости рассматриваются два аспекта периодических тепловых воздействий:

- по отношению к внутренним тепловым воздействиям;
- по отношению к наружным тепловым воздействиям.

4.3.1. Коэффициент теплоусвоения материала

Если представить себе полуграниченный массив какого-либо однородного материала, на плоскую поверхность которого воздействует гармонический тепловой поток с амплитудой A_Q , то колебания температуры этой поверхности тоже будут гармоническими. Обозначим амплитуду этих колебаний A_T . Чем более теплоустойчив материал, тем меньше амплитуда его колебаний. Отношение амплитуд A_Q к A_T служит характеристикой теплоустойчивости материала и называется **коэффициентом теплоусвоения материала** s , Вт/(м²·°C)

$$s = \frac{A_Q}{A_T}. \quad (4.7)$$

Таким образом, коэффициент теплоусвоения материала характеризует способность материала более или менее интенсивно воспринимать теплоту при колебаниях температуры на его поверхности. Коэффициент теплоусвоения материала имеет размерность, Вт/(м²·°C). Величина коэффициента теплоусвоения зависит от его теплофизических свойств и периода T , с которым происходят колебания воздействующего теплового потока:

$$s = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\rho}{T}}, \quad (4.8)$$

где λ – теплопроводность материала, Вт/(м·°C);

c – удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·°C);

ρ – плотность материала, кг/м³;

T – период колебаний, с.

Значения s при суточном периоде колебаний для большого числа строительных материалов приведено в [32]. Для суточного периода коэффициент теплоусвоения материала равен $s = 0,00852 \sqrt{\lambda c \rho} \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$. Формула (4.8) показывает, что коэффициент теплоусвоения материала увеличивается с уменьшением периода T . В пределе, когда $T=0$, т.е. колебания теплового потока отсутствуют, $s \rightarrow \infty$. В этом случае по формуле (4.7) получим, что $A_t=0$, то есть колебания температуры на внутренней поверхности полуограниченного массива будут отсутствовать, что относится к стационарному режиму.

4.3.2. Слой резких колебаний. Показатель тепловой инерция слоя D

Колебания температуры на внутренней поверхности ограждения вызывают колебания температуры в толще ограждения. По мере удаления от внутренней поверхности амплитуды колебания температуры будут постепенно уменьшаться, т.е. затухать в толще ограждения. Кроме этого по мере удаления от внутренней поверхности ограждения происходит еще запаздывание этих колебаний. Т.е. максимум температуры в каждой точке сечения ограждения будет наблюдаться тем позже, чем дальше эта точка от внутренней поверхности. Расстояние между двумя точками, температура в которых колеблется одинаково, т.е., если запаздывание колебаний в какой-то точке равно периоду T , то расстояние между этими точками называется *длиной волны* λ . Для условной и весьма приближенной характеристики числа волн, укладывающихся в толще ограждения, служит *показатель тепловой инерции* D , определяемый для однородного ограждения по формуле:

$$D = R \cdot s. \quad (4.9)$$

Для многослойного ограждения с числом слоев I показатель тепловой инерции определяется как сумма показателей D для всех слоев:

$$D = \sum_{i=1}^I R_i \cdot s_i. \quad (4.10)$$

Показатель тепловой инерции D является безразмерной величиной. С уменьшением периода колебаний теплового потока уве-

личивается показатель тепловой инерции ограждения, т.е. в толще ограждения укладывается большее число волн, уменьшается длина температурной волны и быстрее затухают температурные колебания. При увеличении периода колебаний происходит обратное явление.

Большое значение для понимания затухания температурных колебаний в толще ограждения имеет так называемый *слой резких колебаний*. Это слой, непосредственно примыкающий к внутренней поверхности ограждающей конструкции, в толще которого амплитуда колебаний температуры уменьшается в 2 раза. В слое резких колебаний располагается $1/8$ длины температурной волны. Слой резких колебаний характеризуется тем, что для него показатель тепловой инерции равен 1, т.е. $D_{р.к.} = R_{р.к.} \cdot s = 1$, где $R_{р.к.}$ - термическое сопротивление слоя резких колебаний. Толщина δ слоя резких колебаний равна:

$$\delta = \frac{\lambda}{s}. \quad (4.11)$$

Считается, что на величину колебаний температуры внутренней поверхности ограждения основное влияние оказывают теплофизические характеристики слоя резких колебаний.

4.3.3. Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения

Отношение амплитуды колебания теплового потока A_Q , воздействующего на внутреннюю поверхность ограждения, к амплитуде колебаний температуры на этой поверхности A_t называется *коэффициентом теплоусвоения внутренней поверхности ограждения* $Y_{в.н}$ $\text{Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$:

$$Y_{в.н} = \frac{A_Q}{A_t}. \quad (4.12)$$

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения возрастает с уменьшением периода T колебаний теплового потока, и зависит главным образом от теплофизических характеристик материалов слоев, из которых состоит ограждение. Чем больше величина коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения $Y_{в.н}$ при одной и той же величине A_Q , тем

меньше будет амплитуда колебаний температуры A_t на этой поверхности.

Приближенный расчет коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения состоит в следующем. Если слой резких колебаний укладывается в прилегающий к внутренней поверхности слой, т. е. если

$$D_1 \geq 1, \text{ то } Y_{в.п.} = s_1. \quad (4.13)$$

Если слой резких колебаний захватывает следующий слой и для этого слоя $D_2 \geq 1$, то сначала определяется Y_2 поверхности стыка первого и второго слоев, который принимается равным коэффициенту теплоусвоения материала второго от внутренней поверхности ограждения слоя $Y_2 = S_2$, и тогда

$$Y_{в.п.} = \frac{R_1 s_1 + y_2}{1 + R_1 Y_2}. \quad (4.14)$$

Если $D \geq 1$ имеет только слой n от наружной поверхности, то $Y_{n-1} = s_n$.

$$Y_{n-1} = \frac{R_{n-1} s_{n-1} + y_n}{1 + R_{n-1} Y_n}. \quad (4.15)$$

Затем последовательно определяются по рекуррентной формуле (4.15) все Y_i до внутренней поверхности.

Если ограждение представляет собой тонкую перегородку толщиной δ , разделяющую два помещения с одинаковым колебанием температуры, то на оси этой перегородки отсутствует тепловой поток $A_Q = 0$. Если показатель тепловой инерции половины толщины перегородки $D_{\delta/2} \leq 1$, то на оси $Y_2 = 0$. Тогда по формуле (4.15).

$$Y_{в.п.} = R_1 s_1^2. \quad (4.16)$$

Для безынерционного ограждения, например, для окна $Y_2 = \alpha_n$ и $s_1 = 0$. По формуле (4.14)

$$Y_{в.п.} = \frac{y_2}{1 + R_1 Y_2} = \frac{\alpha_n}{1 + R_1 \alpha_n} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + R_1} = \frac{1}{R_{ок} - R_e} = K'_{ок}. \quad (4.17)$$

где R_1 — термическое сопротивление окна, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

$K'_{ок}$ — неполный коэффициент теплопередачи окна, $Вт / (м^2 \cdot ^\circ C)$, равный

$$K'_{ок} = \frac{1}{R_{ок} - R_e}. \quad (4.18)$$

$R_{ок}$ — общее приведенное сопротивление теплопередаче окна, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$.

Как было сказано в п. 4.3.2 на величину коэффициента теплоусвоения наибольшее влияние оказывают прилегающие к внутренней поверхности слои. Поэтому, если необходимо в помещении стабильно поддерживать постоянную температуру, стремясь к уменьшению амплитуды колебаний температуры на внутренней поверхности ограждений, надо с внутренней стороны располагать теплоустойчивые слои. Если же требуется быстрое изменение температуры поверхности ограждения после смены режима отопления, то надо внутреннюю поверхность ограждений отделывать легкими материалами с малым коэффициентом теплоусвоения. Это относится к прерывистому отоплению, когда на ночь тепловой поток отопления снижается, температура поверхности ограждения падает, а к началу рабочего дня эту температуру следует повысить. Чем с меньшим коэффициентом теплоусвоения материал будет лежать на внутренней поверхности ограждения, тем экономичнее будет прерывистое отопление.

4.3.4. Коэффициент теплопоглощения ограждения

Коэффициент теплопоглощения ограждения по физическому смыслу равен отношению амплитуды колебаний теплового потока к амплитуде колебаний температуры воздуха около ограждения:

$$B_{в.п.} = \frac{A_Q}{A_{tg}}. \quad (4.19)$$

Если пренебречь сдвигом колебаний во времени, то $A_Q = \alpha_v (A_{tg} - A_t)$. Это дает нам право написать:

$$\frac{1}{\alpha_v} = \frac{A_{tg}}{A_Q} - \frac{A_t}{A_Q}, \text{ или } \frac{1}{B_{в.п.}} = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{Y_{в.п.}}$$

откуда

$$B_{в.п.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{Y_{в.п.}}}. \quad (4.20)$$

4.3.5. Теплоустойчивость наружного ограждения по отношению к внешним воздействиям

Считается, что температура наружного воздуха изменяется во времени z по закону правильного гармонического колебания с точным периодом T вокруг своей средней за сутки величины $t_{н.о.}$:

$$t_n(z) = t_{н.о.} + A_n \cos \frac{2\pi}{T} z. \quad (4.21)$$

Температура на внутренней поверхности ограждения τ колеблется с тем же периодом T , запаздывая на ε часов:

$$\tau(z) = \tau_o + A_\tau \cos \frac{2\pi}{T} (z - \varepsilon). \quad (4.22)$$

Средняя за период температура внутренней поверхности ограждения τ_o определяется по законам стационарной теплопередачи по известной средней за сутки температуре наружного воздуха $t_{н.о.}$. Для нахождения амплитуды колебаний температуры внутренней поверхности ограждения A_τ введен показатель – *затухание температурной волны в ограждении* ν :

$$\nu = \frac{A_n}{A_\tau}. \quad (4.23)$$

Затухание температурной волны показывает во сколько раз амплитуда температуры наружной среды A_n больше амплитуды колебаний температуры внутренней поверхности ограждения A_τ , вызванных колебаниями температуры наружной среды. Величина затухания ν зависит от теплофизических характеристик материалов, из которых выполнены слои ограждения:

$$\nu = 0,9 e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_n)(s_2 + Y_1) \dots (s_n + Y_{n-1})(\alpha_n + Y_n)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_n + Y_n)\alpha_n}. \quad (4.24)$$

где $e = 2,718$, основание натуральных логарифмов,

D – показатель тепловой инерции ограждающей конструкции по п. 4.3.2;

$s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ – коэффициенты теплоусвоения материалов слоев 1, 2, 3... n , отсчитанных от внутренней поверхности, Вт/(м²°C), по п. 4.3.1;

$Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_n$ – коэффициенты теплоусвоения наружных поверхностей отдельных слоев ограждения, определяемые, начиная с первого слоя от внутренней поверхности, Вт/(м²°C), по п. 4.3.3;

α_n, α_n – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях, Вт/(м²°C).

Запаздывание температурной волны ε , ч, можно рассчитать по приближенной формуле:

$$\varepsilon = 2,7 D - 0,4. \quad (4.25)$$

Чтобы получить большее затухание колебаний температуры, надо слой из более теплоустойчивого материала располагать с той стороны стенки, где коэффициент теплоотдачи меньше независимо от направления волны. Так как с внешней стороны наружных ограждений α_n в подавляющем большинстве случаев больше α_n , то теплоустойчивый слой надо делать изнутри, что кстати хорошо согласуется с необходимостью делать утепление с наружной стороны ограждения.

Затухание тепловой волны ν в стенке будет наименьшим, когда материалы ее лишены теплоустойчивости (т.е. $s=0$). Это практически возможно в двух случаях: когда удельная теплоемкость с этих материалов весьма мала или период колебаний T весьма велик. Наименьшим пределом для затухания температурной волны в ограждении является произведение $R_o \alpha_n$. Если затухание равно или близко к предельному, любые изменения температуры наружной среды передаются без запаздывания на внутреннюю поверхность стенки с уменьшением в $R_o \alpha_n$ раз, т.е. как процесс стационарной теплопередачи.

4.4. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ПОМЕЩЕНИЯ

Теплоустойчивость помещения – это его свойство поддерживать относительное постоянство температуры при изменении тепловых воздействий. Теплоустойчивость помещения обеспечивается его ограждающими конструкциями, мебелью и оборудованием, объемом воздуха, воздухообменом помещения.

Теплоустойчивость помещения характеризуется двумя показателями: *показателем теплоусвоения помещения* Y_n и *показателем теплопоглощения помещения* – P_n .

Основными характеристиками температурной обстановки в помещении при его нестационарном тепловом режиме служат амплитуды колебаний температуры внутреннего воздуха $A_{тв}$ и радиационной температуры помещения $A_{тр}$. Если колебания темпе-

ратуры в помещении носят не гармонический характер, то амплитудой колебаний температуры считается максимальное отклонение от своей среднесуточной величины.

Наиболее распространенными видами изменения во времени тепловых воздействий являются *гармонические и прерывистые колебания теплоступлений* в помещение.

Показателем теплоусвоения помещения Y_n , Вт/°С, принимается сумма произведений коэффициентов теплоусвоения внутренних поверхностей каждого из I ограждения Y_i , обращенных в помещение, и площади A_i этой поверхности:

$$Y_n = \sum_{i=1}^I Y_i \cdot A_i. \quad (4.26)$$

Физический смысл показателя теплоусвоения помещения – отношение амплитуды колебания теплового потока, изменяющегося в помещении A_Q к амплитуде колебаний радиационной температуры помещения A_{tr} :

$$Y_n = \frac{A_Q}{A_{tr}}. \quad (4.27)$$

Основной составляющей **показателя теплопоглощения помещения** P_n , Вт/°С, является **показатель теплопоглощения ограждений** $P_{огр}$, который, в свою очередь, является суммой произведений коэффициентов теплопоглощения внутренних поверхностей каждого из I ограждения P_i , обращенных в помещение, и площади A_i этой поверхности:

$$P_{огр} = \sum_{i=1}^I P_i \cdot A_i \approx \frac{1}{1/Y_n + 1/\alpha_B \sum A_i}. \quad (4.28)$$

Кроме того, показатель теплопоглощения помещения должен включать в себя теплопоглощение внутреннего объема воздуха и мебели помещения. Но эти показатели по сравнению с основным незначительны и поэтому их не учитывают. Значимой составляющей P_n является **показатель теплопоглощения вентиляционного воздухообмена** $P_{вент}$, Вт/°С:

$$P_{вент} = 0,28 L c \rho. \quad (4.29)$$

где L – расход вентиляционного воздуха в помещение, м³/ч;
 c – теплоемкость воздуха, равная 1,005 кДж/(кг·°С);
 ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Таким образом, принимается, что показатель теплопоглощения помещения равен:

$$P_n = P_{огр} + P_{вент}. \quad (4.30)$$

Физический смысл показателя теплопоглощения помещения – отношение амплитуды колебания теплового потока, изменяющегося в помещении A_Q к амплитуде колебаний температуры воздуха помещения A_{tr} :

$$P_n = \frac{A_Q}{A_{tr}}. \quad (4.31)$$

Амплитуда колебаний температуры воздуха в случае гармонических колебаний тепловых воздействий равна:

$$A_{tr} = \frac{0,9 \cdot A_Q}{\frac{1}{1/Y_n + 1/\alpha_B \sum A_i} + P_{вент}} \quad (4.32)$$

где A_Q – амплитуда возмущающего теплового потока, Вт;

α_B – средний коэффициент теплообмена на внутренних поверхностях наружных и внутренних ограждений, принимаемый равным 6,25 Вт/(м²·°С) [2].

Коэффициент 0,9 учитывает несовпадение по фазе колебаний температуры воздуха и поверхности отдельных ограждений.

Прерывистыми теплоступлениями считаются периодические теплоступления (рис. 23), которые постоянны и равны Q_n в течение m , ч, периода T , ч, и отсутствуют в течение остального времени периода n , ч.

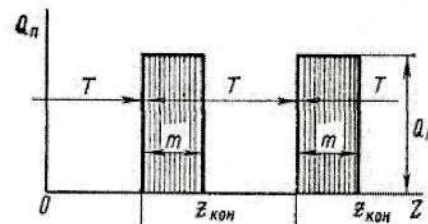


Рис. 23. Прерывистые поступления теплоты

Показатель теплопоглощения помещения при прерывистых теплоступлениях корректируется с учетом измененной формы кривой изменения во времени теплоступлений:

$$P_{n,\Pi} = P_{\text{оп},\Pi} + P_{\text{вент}} = \frac{1}{\frac{\Omega_{\text{макс}}}{Y_n} + \frac{1}{\alpha_v \sum A_i}} + P_{\text{вент}} \quad (4.33)$$

где Ω – максимальный поправочный коэффициент на форму прерывистой кривой в зависимости от соотношения $m/T=m/(m+n)$.

Амплитуда колебаний температуры воздуха A_t , $^{\circ}\text{C}$, в случае прерывистых тепловых воздействий равна:

$$A_t = \frac{0,9 \cdot Q_{\Pi}}{\frac{1}{\frac{\Omega_{\text{макс}}}{Y_n} + 1/\alpha_v \sum A_i} + P_{\text{вент}}} \quad (4.34)$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Напишите основное дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности.
2. Перечислите методы решения задач нестационарной теплопередачи через наружное ограждение.
3. В чем сущность метода конечных разностей при решении задач нестационарной теплопроводности?
4. Напишите уравнение нестационарной теплопроводности в конечных разностях.
5. Чему равна температура в произвольном сечении стенки в произвольный момент времени при решении методом конечных разностей?
6. Физический смысл коэффициента теплоусвоения материала.
7. Что такое показатель тепловой инерции ограждения?
8. Что такое слой резких колебаний?
9. Чему равна толщина слоя резких колебаний ограждения?
10. Что такое теплоустойчивость ограждения?
11. В каких проявлениях интересует нас теплоустойчивость ограждений и помещений?
12. В чем физический смысл коэффициента теплоусвоения поверхности конструкции?
13. Какая часть конструкции учитывается при определении коэффициента теплоусвоения поверхности ограждения?

14. Чему равен коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения, если слой резких колебаний укладывается в прилегающий к ней материальный слой?

15. Чему равен коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения, если слой резких колебаний захватывает два или более прилегающих к ней материальных слоев?

16. При каком расположении конструктивного и теплоизоляционного слоев теплоустойчивость ограждения по отношению к внутренним тепловым воздействиям будет выше?

17. Какую по теплоустойчивости отделку следует сделать в помещении, в котором для экономии энергии осуществляется отопление только в рабочую часть суток?

18. Какую по теплоустойчивости отделку следует сделать в помещении, в котором постоянно пребывают люди и осуществляется периодическое печное отопление?

19. В чем физический смысл коэффициента теплопоглощения поверхности ограждения?

20. Чему равен коэффициент теплопоглощения поверхности ограждения?

21. Что такое затухание температурной волны в ограждающей конструкции?

22. Что такое запаздывание температурной волны ограждающей конструкции?

23. Чему равно минимальное затухание температурной волны?

24. При каком расположении слоев затухание увеличивается?

25. Что такое теплоустойчивость помещения?

26. В чем физический смысл показателя теплоусвоения помещения?

27. В чем физический смысл показателя теплопоглощения помещения?

28. Чему равна амплитуда колебаний температуры помещения при гармонических колебаниях теплового потока?

29. Что учитывает поправочный коэффициент в формуле для определения амплитуды колебаний температуры помещения?

30. Какая периодическая тепловая подача называется прерывистой?

5. ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

Ограждения теплообмениваются друг с другом лучистой теплотой и конвективной теплотой с воздухом. На рис. 24 показана схема лучистого (Л) и конвективного (К) теплообмена пола помещения.

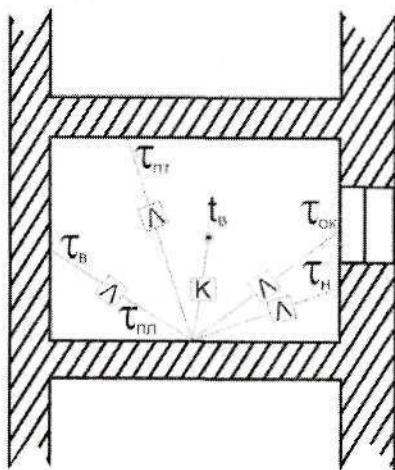


Рис. 24. Схема теплообмена в помещении $\tau_{пл}$, $\tau_{в}$, $\tau_{пт}$, $\tau_{ок}$, $\tau_{н}$ — температуры пола, внутреннего воздуха, потолка, окна, внутренней поверхности перегородки, потолка, окна, внутренней поверхности наружной стены, °С; $t_{в}$ — температура воздуха помещения; Л — лучистый теплообмен, К — конвективный теплообмен

5.1. ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн. Тепловое излучение приходится на инфракрасный участок спектра излучения. Излучение, которое определяется природой данного тела и его температурой, называется *собственным излучением*. Тела, которые поглощают всю падающую на них энергию теплового излучения, называются *абсолютно черными*.

Специфика лучистого теплообмена в помещении состоит в следующем:

1. Ограниченный диапазон температуры 0-150°С (чаще 5-95 °С).
2. Все поверхности помещения — серые тела с коэффициентом поглощения $\varepsilon=0,9$ (0,85-0,98) близки к абсолютно черному телу.
3. Помещения имеют определенную геометрию и размеры.

5.1.1. Основные законы излучения абсолютно черного тела

Спектральная интенсивность излучения I_{λ} , Вт/(м²м), абсолютно черного тела — излучение в данном участке спектра с длиной волны λ , мк (микрон). *Закон Планка* (рис.25) устанавливает зависимость интенсивности излучения от температуры и длины волны.

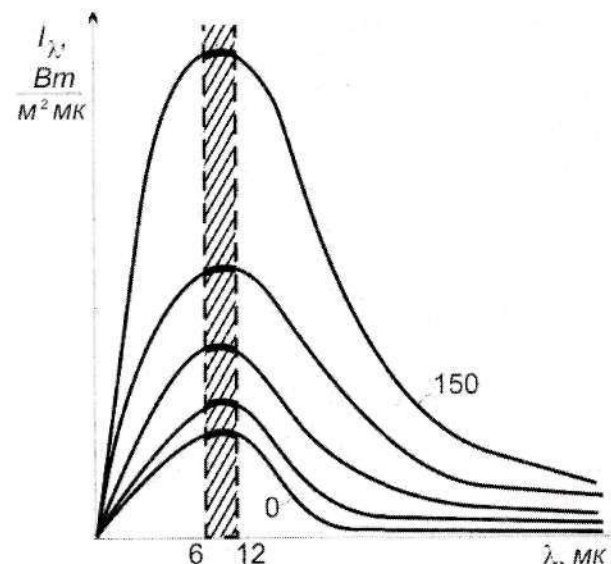


Рис. 25. Спектральная интенсивность излучения поверхности абсолютно черного тела

По *закону Вина* максимальная интенсивность излучения абсолютно черного тела зависит от температуры. Оказывается, что максимальная интенсивность излучения в помещении лежит в узком диапазоне длин волн 6-12 мк. Излучение, относящееся к узкому интервалу изменений длин волн, называется потоком *мономохроматического* излучения. На основании законов Планка и Вина излучение в помещении считается мономохроматическим.

Суммарное излучение с поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства и по всем длинам волн называется *интегральным* или *полным лучистым потоком*. *Закон Стефана — Больцмана* устанавливает зависимость плотно-

сти интегрального полусферического излучения от температуры. Плотность интегрального полусферического излучения E_0 , Вт/м², определяется как суммарная энергия излучения по всем длинам волн:

$$E_0 = \int I_\lambda \cdot d\lambda = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (5.1)$$

где C_0 — постоянная Больцмана, равная 5,67 Вт/(м²·К⁴).

Интенсивность излучения в общем случае зависит от направления и является величиной, пропорциональной косинусу β_1 (рис. 26) между направлением излучения и нормалью к поверхности тела (*закон Ламберта*).

Плотность лучистого потока с поверхности 1 в направлении луча, составляющего с поверхностью 1 угол β_1 , в соответствии с законом Ламберта равна:

$$E_{0,\beta_1} = E_{0,1} \cos \beta_1, \quad (5.2)$$

где $E_{0,1}$ — плотность теплового потока излучения с поверхности 1 в направлении нормали к ней.

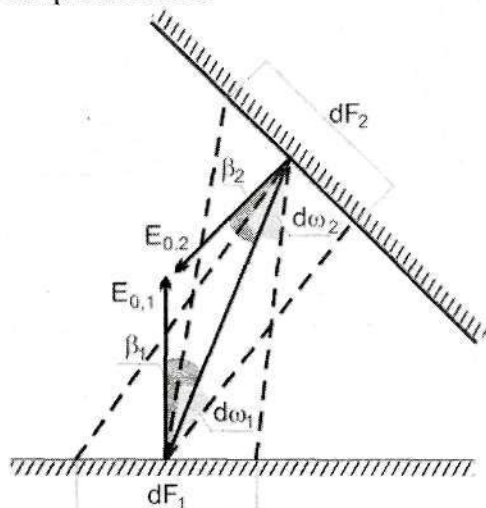


Рис. 26. Теплообмен излучением между двумя поверхностями

Излучение свойственно всем поверхностям тел. Теплота передается как от более нагретого тела к менее нагретому, так и от менее нагретого к более теплому. Тепловой поток, Вт, переда-

ваемый излучением между двумя произвольно расположенными поверхностями, определяется как разность потоков лучистой энергии, исходящей от каждой из этих поверхностей. Если каждую поверхность разбить на элементарные площадки dF_1 и dF_2 и определить тепловой поток между ними, то для определения потока с одной полной поверхности на другую надо будет проинтегрировать тепловой поток по каждой поверхности. Лучистый поток, падающий с элементарной площадки dF_1 на элементарную площадку dF_2 находится внутри телесного угла $d\omega_1$, под которыми из какой-либо точки элементарной площадки dF_1 видна элементарная площадка dF_2 (рис. 26) и равен:

$$Q_{0,dF_1-dF_2} = E_{0,1} d\omega_1 \frac{\cos \beta_1}{\pi} dF_1. \quad (5.3)$$

Соответственно поток с элементарной площадки dF_2 на элементарную площадку dF_1 равен:

$$Q_{0,dF_2-dF_1} = E_{0,2} d\omega_2 \frac{\cos \beta_2}{\pi} dF_2, \quad (5.4)$$

где $d\omega_1$ и $d\omega_2$ — элементарные телесные углы, под которыми лучистый поток уходит с элементарной площадки dF_1 на элементарную площадку dF_2 и соответственно встречный поток с элементарной площадки dF_2 на элементарную площадку dF_1 .

По определению телесные углы равны:

$$d\omega_1 = \frac{dF_2 \cos \beta_2}{R^2}, \quad (5.5)$$

$$d\omega_2 = \frac{dF_1 \cos \beta_1}{R^2}. \quad (5.6)$$

Если обозначить лучистый поток с поверхности 1 на поверхность 2 $Q_{0,1-2}$, Вт, а с поверхности 2 на поверхность 1 $Q_{0,2-1}$, Вт, тогда лучистый поток между поверхностями 1 и 2, как разность между ними, равен:

$$Q_{0,1-2} - Q_{0,2-1} = \int_{A_1} \int_{A_2} \left(E_{0,1} d\omega_1 \frac{\cos \beta_1}{\pi} dF_1 - E_{0,2} d\omega_2 \frac{\cos \beta_2}{\pi} dF_2 \right) = \quad (5.7)$$

$$= (E_{0,1} - E_{0,2}) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{\pi \cdot R^2} \cdot dF_2 \cdot dF_1,$$

где $E_{0,1}$, $E_{0,2}$ — интегральная интенсивность излучения 1-й и 2-й абсолютно черных поверхностей по направлению нормали к ним, Вт/м²;

A_1, A_2 – площади поверхностей 1 и 2 соответственно, m^2 .

Для удобства инженерных расчетов введено понятие *коэффициента облученности* с одной поверхности на другую. Например, коэффициент облученности с поверхности 1 на поверхность 2 φ_{1-2} показывает, какую долю от всего излучаемого поверхностью 1 потока $Q_{0,1}$, составляет поток $Q_{0,1-2}$, попадающий на поверхность 2. Физический смысл коэффициента облученности определяется формулой:

$$\varphi_{1-2} = \frac{Q_{0,1-2}}{Q_{0,1}}. \quad (5.8)$$

Если принять, что коэффициенты облученности равны:

$$\varphi_{1-2} = \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi R^2} dF_2; \quad (5.9)$$

$$\varphi_{2-1} = \int_{F_1} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi R^2} dF_1, \quad (5.10)$$

то лучистый поток между поверхностями 1 и 2 равен:

$$Q_{0,1-2} - Q_{0,2-1} = (E_{0,1} - E_{0,2})\varphi_{1-2}A_1 = (E_{0,1} - E_{0,2})\varphi_{2-1}A_2, \quad (5.11)$$

Из (5.9), (5.10) следует, что коэффициент облученности – геометрическая характеристика излучающей системы.

Коэффициенты облученности подчиняются трем законам геометрии лучистых потоков:

Закон взаимности гласит, что если два тела находятся во взаимном лучистом теплообмене, то их коэффициенты облученности обратно пропорциональны площадям поверхности тел, что определяется формулой:

$$\varphi_{1-2} \cdot A_1 = \varphi_{2-1} \cdot A_2. \quad (5.12)$$

Закон замкнутости лучистых потоков заключается в том, что если между одной из поверхностей замкнутой системы тел происходит лучистый теплообмен со всеми другими поверхностями, сумма коэффициентов облученности с поверхности 1 в сторону всех окружающих поверхностей i равна единице:

$$\sum_i \varphi_{1-i} = 1. \quad (5.13)$$

Закон распределительности лучистых потоков состоит в том, что поток от поверхности 1 к поверхности 2 может быть

представлен в виде суммы потоков между m отдельными частями поверхности 1 ($\sum_{j=1}^M A_j = A_1$) и n частями поверхности 2

$$(\sum_{n=1}^N A_n = A_2):$$

$$A_1 \varphi_{1-2} = \sum_j^M \sum_n^N A_j \varphi_{j-n}, \quad (5.14)$$

Коэффициент облученности φ_{j-n} при различном расположении поверхностей в помещении может быть вычислен с помощью свойств замкнутости, взаимности и распределительности лучистых потоков [4]. Ниже приведены формулы коэффициентов облученности для простейших схем расположения поверхностей относительно друг друга. На рис. 27, 28, 29, 30 показаны некоторые из них с формулами для определения коэффициентов облученности с одной поверхности на другую. Площади поверхностей обозначены A , а индекс относит площадь к соответствующей поверхности.

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2A_1} [(A_1 + A_3)\varphi_{(1+3)-(2+4)} - A_1\varphi_{1-4} - A_3\varphi_{3-2}]. \quad (5.15)$$

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{4A_1} [\varphi_{(1+3+5+7)-(2+4+6+8)}(A_1 + A_3 + A_5 + A_7) - \varphi_{(1+3)-(6+8)}(A_1 + A_3) - \varphi_{(5+7)-(2+4)}(A_5 + A_7) - \varphi_{(1+7)-(4+6)}(A_1 + A_7) + \varphi_{1-6}A_1 + \varphi_{7-4}A_7 - \varphi_{(3+5)-(2+8)}(A_3 + A_5) - \varphi_{3-8}A_3 + \varphi_{5-2}A_5] \quad (5.16)$$

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{A_1} [(A_1 + A_3)\varphi_{(1+3)-(2+4)} - A_3\varphi_{3-(2+4)} - (A_1 + A_3)\varphi_{(1+3)-4} + A_3\varphi_{3-4}]. \quad (5.17)$$

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2A_1} [\varphi_{(1+3)-(2+4)}(A_1 + A_3) - \varphi_{1-4}A_1 - \varphi_{3-2}A_3]. \quad (5.18)$$

Применяя законы замкнутости, взаимности и распределительности лучистых потоков, можно вывести формулы и для более сложных случаев. Однако в их основе, также как и в основе приведенных выше формул лежит необходимость знания коэффициентов облученности двух параллельных друг другу и находящихся друг против друга прямоугольных поверхностей (рис. 31,а) и двух взаимно перпендикулярных прямоугольных поверхностей с общей гранью (рис. 31,б).

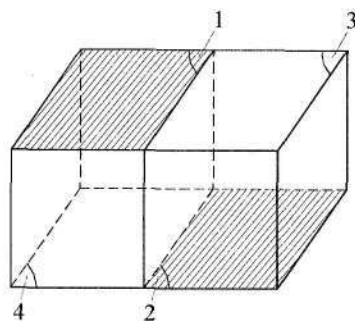


Рис. 27. Схема расположения прямоугольных поверхностей в параллельных плоскостях, когда одна сторона одной поверхности лежит в одной перпендикулярной им плоскости со стороной другой поверхности

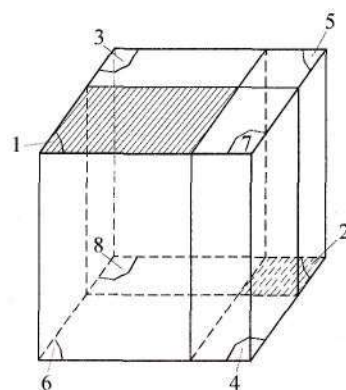


Рис. 28. Схема расположения прямоугольных поверхностей в параллельных плоскостях, когда угол одной поверхности лежит на одной прямой с углом другой

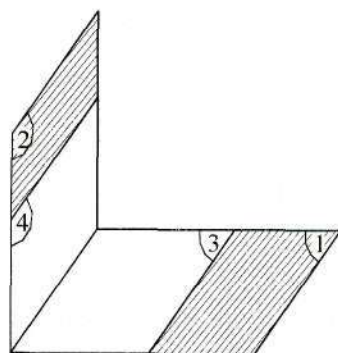


Рис. 29. Схема расположения прямоугольных поверхностей в перпендикулярных плоскостях и отстоящих от линии пересечения плоскостей

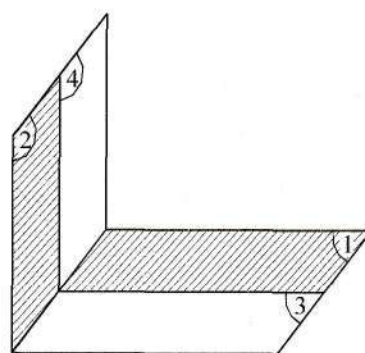


Рис. 30. Схема расположения в перпендикулярных плоскостях прямоугольных поверхностей, углы которых соприкасаются на линии пересечения плоскостей

Эти базовые формулы могут быть получены интегрированием коэффициентов взаимной облученности прямоугольника и параллельной или перпендикулярной ему элементарной площадки. Площадка последовательно перемещается по плоскости и результаты суммируются. Однако, этот метод всегда будет иметь погрешность. Чем меньше будет взята площадка в качестве элементарной, тем больше вычислений, но и тем точнее результат. Наиболее точным является метод нахождения угловых коэффициентов алгебраическим путем, разработанный Г.Л. Поляком [23]. Полученные им формулы по [43] приведены ниже.

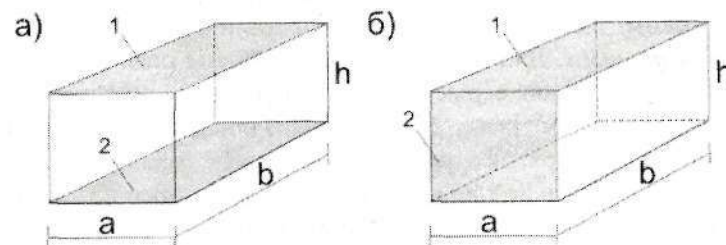


Рис. 31. Расположение прямоугольных поверхностей:
а - в параллельных плоскостях друг против друга;
б - в перпендикулярных плоскостях с общей гранью

Для расчета коэффициентов облученности между двумя одинаковыми прямоугольниками, расположенными в параллельных плоскостях друг против друга (рис. 31, а) справедливо равенство:

$$\varphi_{1-2} = 2/(\pi \cdot x \cdot y) \cdot \left(0,5 \cdot \ln \left(\frac{z \cdot w}{(z+w-1)} \right) + y \cdot \sqrt{z} \cdot \arctan \left(\frac{y}{\sqrt{z}} \right) \right) \quad (5.19)$$

$$+ x \cdot \sqrt{w} \cdot \arctan \left(\frac{x}{\sqrt{w}} \right) - y \cdot \arctg(y) - x \cdot \arctg(x),$$

где a, b - стороны прямоугольников, м;

h - расстояние между ними, м;

$x = b/h$, $y = a/h$, $z = 1 + x^2$, $w = 1 + y^2$.

- для расчета коэффициентов облученности между двумя прямоугольниками, расположенными в перпендикулярных плоскостях с общей гранью (рис. 31, б):

$$\varphi_{1-2} = (1/\pi) \cdot (\arctg(a/b) + (h/b) \cdot \arctg(a/h) - \sqrt{1 + h^2/b^2} \cdot \arctg(a/\sqrt{b^2 + h^2}) -$$

$$\begin{aligned}
& -0,25(a/b) \cdot \ln((a^2 + b^2 + h^2) \cdot a^2 / ((a^2 + b^2) \cdot (a^2 + h^2))) + \\
& + 0,25(b/a) \cdot \ln((a^2 + b^2 + h^2) \cdot b^2 / ((b^2 + h^2) \cdot (a^2 + b^2))) + \\
& + 0,25h^2/(a \cdot b) \cdot \ln((a^2 + b^2 + h^2) \cdot h^2 / ((a^2 + h^2) \cdot (b^2 + h^2))),
\end{aligned} \quad (5.20)$$

где a - общая грань, м;

b - сторона 1-го прямоугольника, м;

h - сторона 2-го прямоугольника, м.

5.1.2. Излучение поверхности серого тела

Тела, для которых *коэффициент поглощения* для монохроматического излучения не зависит от длины волны, называются *серыми телами*. Для серых тел коэффициент поглощения меньше единицы, так как серые тела поглощают не всю падающую на них лучистую энергию. В помещении поверхности относятся к серым. Закон Кирхгофа устанавливает связь между излучательной и поглощательной способностью серых и абсолютно черных тел. Он гласит, что при постоянной температуре отношение излучательной способности к поглощательной не зависит от природы тела и равно излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре. Таким образом, если тело мало излучает, то оно мало поглощает. Закон Кирхгофа устанавливает еще одно важное положение: при постоянной температуре коэффициент поглощения численно равен *коэффициенту излучения* или *степени черноты* ε .

Собственное излучение серого тела равно $E_{\text{собств}} = \varepsilon E_0$. Если на поверхность тела падает лучистый поток $E_{\text{пад}}$, то поглощенная энергия будет равна $E_{\text{погл}} = \varepsilon E_{\text{пад}}$, тогда отраженная лучистая энергия равна $E_{\text{отр}} = (1 - \varepsilon) E_{\text{пад}}$ (рис. 32). Но так как коэффициент излучения в помещениях $\varepsilon \approx 0,9$, то можно считать, что отраженная энергия близка к 0.

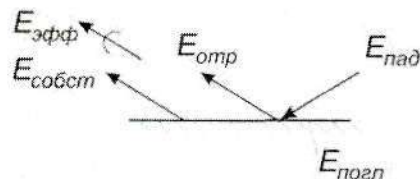


Рис. 32. Структура лучистых потоков на поверхности

Сумму собственного и отраженного лучистого потока называют *эффективным излучением*. Так как отраженная теплота мала, то считается, что эффективное излучение равно собственному:

$$E_{\text{эфф}} \approx E_{\text{собств}} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (5.21)$$

5.1.3. Лучистый теплообмен между двумя поверхностями серого тела

Тепловой поток между двумя поверхностями серого тела равен

$$\begin{aligned}
Q_{1,2} &= \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot C_0 \cdot \left[\frac{T_1}{100} \right]^4 - \varphi_{2-1} \cdot A_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot C_0 \cdot \left[\frac{T_2}{100} \right]^4 \\
&= \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]
\end{aligned} \quad (5.22)$$

где ε_{1-2} - приведенный коэффициент излучения серой поверхности 1 на поверхность 2.

Приведенный коэффициент излучения с поверхности 1 на поверхность 2 зависит от расположения и величины поверхностей:

- две бесконечные параллельные поверхности

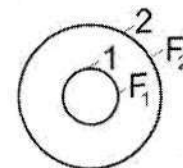


Рис. 33. Одна поверхность окружена другой

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \quad (5.23)$$

- поверхность 2 полностью перекрывает поверхность 1

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (5.24)$$

- поверхности малы или далеко расположены друг от друга

$$\varepsilon_{1-2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2. \quad (5.25)$$

В инженерных расчетах неудобно использовать разность четвертых степеней температуры. Поэтому был введен коэффициент

линеаризации b , позволяющий заменить эту разность на разность в первой степени:

$$b_{1-2} = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{(t_1 - t_2)}. \quad (5.26)$$

Понятно, что коэффициент b имеет размерность K^3 и зависит от абсолютных значений температуры теплообменивающихся поверхностей. При средней температуре поверхностей $19^\circ C$ $b_{1-2} = 1$. Коэффициент b может быть определен по приближенной формуле:

$$b_{1-2} = 0,81 + 0,01 \cdot \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (5.27)$$

После введения приведенного коэффициента излучения серой поверхности с одной поверхности на другую и коэффициента линеаризации разности четвертых степеней температуры упрощенная формула лучистого теплового потока между «серыми» поверхностями 1-2 примет вид:

$$Q_{\lambda,1-2} = \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot b_{1-2} \cdot (t_1 - t_2), \quad (5.28)$$

где $\varphi_{1-2} \cdot A_1$ - геометрический поток с поверхности 1 на поверхность 2, m^2 ;

$\varepsilon_{1-2} \cdot C_0$ - приведенное излучение с поверхности 1 на поверхность 2, $Вт/(m^2 K^4)$;

$b_{1-2} \cdot (t_1 - t_2)$ - приведенная разность температуры, K^4 .

Для большей простоты расчетов принято произведение коэффициентов в формуле (5.14) заменять одним коэффициентом лучистого теплообмена $\alpha_{\lambda,1-2}$, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$, с поверхности 1 на поверхность 2:

$$\alpha_{\lambda,1-2} = \varphi_{1-2} \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot b_{1-2} \quad (5.29)$$

Тогда тепловой поток $Q_{\lambda,1-2}$, $Вт$, с поверхности 1 на поверхность 2 примет вид:

$$Q_{\lambda,1-2} = A_1 \cdot \alpha_{\lambda,1-2} \cdot (t_1 - t_2). \quad (5.30)$$

5.1.4. Радиационная температура помещения

Радиационная температура относительно поверхности 1 есть усредненная температура всех обращенных в помещение поверхностей по признаку эквивалентности лучистого теплообмена поверхности 1 в реальном помещении.

$$t_{R,1} = \sum \varphi_{1-i} \cdot t_i \quad (5.31)$$

где $t_{R,1}$ - осредненная по коэффициентам облученности температура всех поверхностей, окружающих поверхность 1, $^\circ C$.

Таким образом, радиационная температура по своему физическому смыслу должна относиться к какой-то поверхности и оценивать среднюю температуру поверхностей, ее окружающих. Для оценки температурной обстановки в помещении принимают радиационную температуру t_R относительно человека, стоящего посередине комнаты. Для простоты расчета часто t_R рассчитывают как среднюю по площадям A_i всех поверхностей, обращенных в помещение:

$$t_R = \frac{\sum A_i \cdot t_i}{\sum A_i} \quad (5.32)$$

Когда речь идет о теплообмене одной поверхности помещения со всеми остальными в помещении, и можно считать, что по закону замкнутости $\sum_i \varphi_{1-i} = 1$, то говорят о коэффициенте лучистого теплообмена этой поверхности $\alpha_{\lambda,1}$, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$,

$$\alpha_{\lambda,1} = \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot b_{1-R}. \quad (5.33)$$

Если принять, что средний коэффициент излучения поверхностей в помещении $\varepsilon_{1-2} = 0,9$, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(m^2 K^4)$ и $b \approx 1$, то величина коэффициента лучистого теплообмена поверхности в помещении приблизительно равна $\alpha_{\lambda,1} \approx 5 \text{ Вт}/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Лучистый поток от одного ограждения, например, наружного, в сторону помещения может быть записан как:

$$Q_{\lambda,1} = A_1 \cdot \alpha_{\lambda,1} \cdot (t_1 - t_R). \quad (5.34)$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем состоит специфика лучистого теплообмена в помещении?
2. Что такое собственное излучение поверхности тела?
3. Почему излучение в помещении можно считать монохроматическим?
4. Чему равно интегральное излучение абсолютно черного тела?

5. Как изменяется интенсивность излучения по различным направлениям?

6. Чем серое тело отличается от абсолютно черного?

7. Чему равно излучение серого тела?

8. Напишите уравнение лучистого теплообмена между двумя поверхностями абсолютно черного тела.

9. Что такое коэффициент облученности и как он определяется?

10. В чем состоит свойство замкнутости лучистых потоков?

11. В чем заключается свойство взаимности лучистых потоков?

12. В чем состоит свойство распределительности лучистых потоков?

13. Изобразите схему структуры лучистых потоков на поверхности серого тела.

14. Напишите уравнение лучистого теплообмена между двумя серыми поверхностями.

15. Чему равен температурный коэффициент в формуле лучистого теплообмена?

16. Чему равен радиационный баланс поверхности в помещении со всеми остальными поверхностями?

17. Чему равен коэффициент лучистого теплообмена между двумя поверхностями в помещении?

18. Что такое радиационная температура в помещении?

19. Чему равен численно (приблизительно) коэффициент лучистого теплообмена в помещении?

5.2. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

5.2.1. Движение воздуха у внутренней поверхности ограждения

Специфика конвективного теплообмена в помещении заключается в том, что

1. Воздух помещения имеет температуру близкую к 20°C .

2. В помещении формируются небольшие разности температуры Δt ($130 \dots 1^{\circ}\text{C}$).

3. Помещение представляет собой определенный ограниченный объем определенной геометрии.

Конвективный теплообмен в помещении естественный – возникающий за счет естественный сил, формирующихся в результате разности температуры воздуха и поверхностей Δt . В обычных условиях на внутренней поверхности ограждений помещения наблюдается **естественная конвенция**. В процессе естественной конвекции выделяют наиболее хорошо изученный идеальный случай **свободной конвекции**, когда практически неограниченная по длине поверхность находится в большом объеме воздуха. Температура поверхности постоянна по длине и ширине. Воздух вдали от поверхности неподвижен и его температура одинакова. Будем считать температуру стенки выше температуры воздуха, что вызовет нагрев прилегающего к поверхности воздуха и подъем его вверх, за счет вытеснения снизу более холодным воздухом (при температуре поверхности ниже температуры воздуха, охлажденный воздух будет опускаться вниз). Теплообмен при охлаждении аналогичен процессу нагрева воздуха, но противоположен по направлению.

Около нагретой (охлажденной) поверхности формируется пограничный слой (рис. 34) с возрастающей по направлению движения толщиной. Существенное влияние на процесс конвективного теплообмена оказывает характер движения газа. Из гидродинамики известно, что имеются два основных режима течения: ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме частицы газа движутся не перемешиваясь, параллельно поверхности, с которой газ обменивается теплотой, при турбулентном – неупорядоченно, хаотически, направление и скорость отдельных частиц непрерывно меняется. Так вот, в нижней части нагретой поверхности движение воздуха носит ламинарный характер. На некотором расстоянии от начала движения режим течения становится турбулентным.

Процесс теплообмена на поверхности ограждения в ламинарной и турбулентной зонах происходит различно.

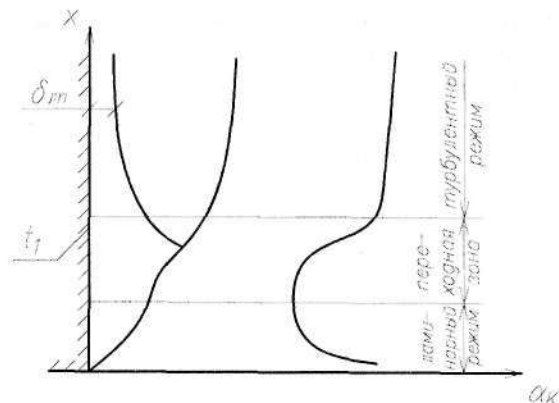


Рис. 34. Пограничные слои у нагретой стенки и коэффициент конвективного теплообмена

Около поверхности температура и скорость воздуха изменяются по направлению его движения, причем температура меняется в пределах теплового пограничного слоя, а скорость затухает — в пределах гидродинамического пограничного слоя. В общем случае размеры этих слоев не совпадают. Толщина ламинарного пограничного слоя $\delta_{лп}$ растет по высоте, в переходной области происходит резкое увеличение толщины пограничного слоя, а в турбулентной области она остается неизменной.

Из классического курса теплопередачи известно, что интенсивность естественного конвективного потока для любых форм поверхностей и сред в обобщенном виде определяются произведением критериев Грасгофа ($Gr = \beta g l^3 \Delta t / \nu^2$) и Прандтля ($Pr = \nu / a$). Для воздуха помещения при температуре 20°C , произведение этих критериев, подсчитанное В.Н.Богословским в [4], равно $GrPr = [(1/293) \cdot 9,81 \cdot l^2 \cdot \Delta t / (15,06 \cdot 10^{-6})^2] \cdot 0,709 = 0,148 \cdot 0,709 \cdot 10^8 \cdot l^3 \cdot \Delta t \approx 1,05 \cdot 10^8 \cdot l^3 \cdot \Delta t$ (здесь β — коэффициент температурного расширения воздуха равный $1/T = 1/293 \text{ K}^{-1}$; g — ускорение силы тяжести, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха; при температуре воздуха 20°C равный $15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; Pr — критерий Прандтля, для воздуха с температурой 20°C равный $0,709$, l — определяющий размер поверхности в направлении потока воздуха, м; Δt — разность между температурой поверхности и воздуха, $^\circ\text{C}$).

Переход от ламинарного к турбулентному режиму течения происходит на некотором расстоянии $h_{кр}$ от начала поверхности (рис. 34). По данным Эккерта для воздуха этот переход происходит при критическом значении критерия Грасгофа $Gr = 10^9$. Тогда $1,05 \cdot 10^8 \cdot l^3 \cdot \Delta t / 0,709 = 10^9$, и критическое расстояние, на котором происходит переход от ламинарного к турбулентному режиму, равно

$$h_{кр} \approx 1,89 \cdot \Delta t^{-1/3}, \quad (5.35)$$

и, как видно, зависит от перепада между значениями температуры воздуха и поверхности. Значения $h_{кр}$ по этому выражению приведены на рис. 35.

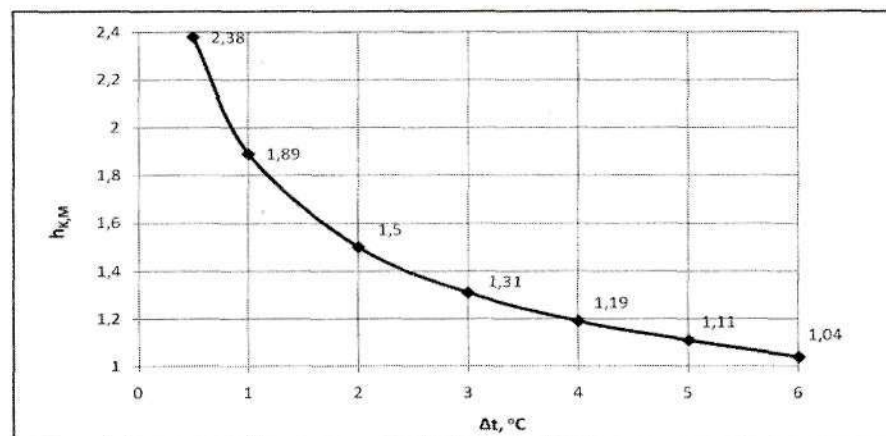


Рис. 35. Критический размер перехода от ламинарного к турбулентному режиму на поверхности в помещении в зависимости от разности температур Δt воздуха и поверхности

Из рис. 35 следует, что в помещении имеют место как зона турбулентного течения воздуха у поверхности ограждения, так и зона ламинарного режима. Причем, чем больше разность температуры воздуха и поверхности, тем меньше ламинарная зона. Если говорить только о внутренних поверхностях наружных ограждающих конструкций, то в зданиях с теплозащитой, соответствующей нормам, введенным с 2000 года, эта разность, как правило, менее 2°C , и ламинарная область занимает значительное место. Уверенно сказать, что большую часть поверхности занима-

ет турбулентная зона, можно про окно, так как в расчетных условиях холодного периода года в средней полосе России разность температур окна и воздуха превышает 6°C. Преимущественно турбулентный режим течения воздуха у внутренних поверхностей наружных ограждений принимался для зданий, построенных до 2000 года.

5.2.2. Коэффициент конвективного теплообмена на внутренней поверхности ограждения при естественной конвекции

Для расчета коэффициента конвективного теплообмена в турбулентной области сначала А.М. Шкловером [43], а затем В.Н.Богословским [4], были предложены формулы для расчета коэффициента конвективного теплообмена исходя из преимущественно турбулентного течения воздуха у внутренних поверхностей ограждения, для которого М.А.Михеевым [21] на основе экспериментальных данных приводится зависимость

$$Nu = 0,135 \sqrt[3]{Gr \cdot Pr} = 0,135 \sqrt[3]{1,05 \cdot 10^8 \cdot \Delta t}. \quad (5.36)$$

Так как $Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda}$, то при температуре внутреннего воздуха 20°C коэффициент конвективного теплообмена для ограждений равен:

$$\alpha_k = A \cdot \Delta t^{1/3}, \quad (5.37)$$

Для вертикальных поверхностей $\alpha_k = 1,67 \cdot \Delta t^{1/3}$, для горизонтальной нагретой поверхности, обращенной вверх, или охлажденной, обращенной вниз, $\alpha_k = 2,27 \cdot \Delta t^{1/3}$, для горизонтальной нагретой поверхности, обращенной вниз, или охлажденной, обращенной вверх, $\alpha_k = 1,17 \cdot \Delta t^{1/3}$ (рис. 36).

Следует отметить, что, если температура воздуха отличается от 20°C, при которой были получены коэффициенты в вышеприведенных формулах, то эти коэффициенты будут уменьшаться на 1% при увеличении температуры воздуха на 10°C, и, наоборот, возрастать при падении температуры воздуха на 10°C [4].

Из уравнения (5.37) видно, что величина конвективного теплообмена в турбулентной области зависит только от разности

между температурой воздуха и внутренней поверхности ограждения.



Рис. 36. Коэффициент А для нагретых и охлажденных поверхностей в помещении

Для ламинарной зоны В.Н. Богословским [4] из критериального выражения, определяющего интенсивность теплообмена в произвольном сечении x при $Pr=0,709$

$$Nu_x = 0,356 (Gr)^{1/4}, \quad (5.38)$$

выведена формула расчета среднего по длине l значения коэффициента конвективного теплообмена α_k , Вт/м²·°С. Для вертикальных ограждений при температуре воздуха 20°C он равен

$$\alpha_k = 1,39 \cdot (\Delta t/l)^{1/4}. \quad (5.39)$$

Формула (5.39) приводит даже к завышенным значениям коэффициентов конвективного теплообмена по сравнению с полученными из экспериментальных исследований [2]. Для горизонтальной нагретой поверхности, обращенной вверх, или охлажденной, обращенной вниз, величина коэффициента конвективного теплообмена составит

$$\alpha_k = 1,89 \cdot (\Delta t/l)^{1/4}, \quad (5.40)$$

для горизонтальной нагретой поверхности, обращенной вниз, или охлажденной, обращенной вверх,

$$\alpha_k = 0,971 \cdot (\Delta t/l)^{1/4}. \quad (5.41)$$

5.2.3. Особенности конвективного теплообмена на поверхности в помещении

Экспериментально доказано, что стесненность условий для конвекции в реальном помещении приводит к некоторым особенностям формирования коэффициентов конвективного теплообмена на его поверхностях [4].

На рис. 37 приведены качественные графики характера изменения локальных значений коэффициента конвективной теплоотдачи $\alpha_{к,х}$ на вертикальной поверхности нагретой панели, занимающей всю высоту помещения. Кривая 1 относится к случаю свободной конвекции, вторая – к случаю естественной конвекции в стесненных условиях помещения. Из сравнения графиков можно отметить следующие последствия стеснения.

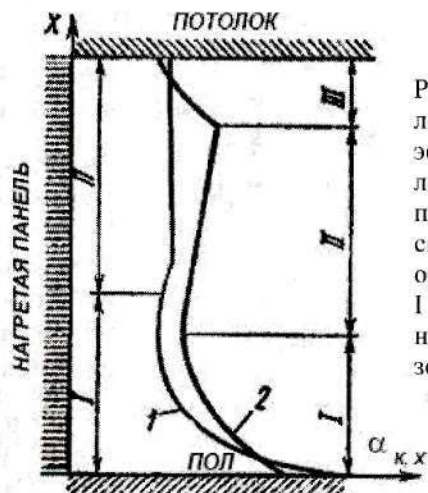


Рис. 37. Качественное сопоставление локальных значений коэффициентов конвективной теплоотдачи вертикальной нагретой поверхности, расположенной 1 – свободно, 2 – в ограниченном объеме помещения.

I – ламинарная зона теплообмена, II – турбулентная зона, III – зона торможения

1. Образуется зона торможения.
2. В турбулентной области значения коэффициентов конвективной теплоотдачи $\alpha_{к,х}$ больше, чем при свободной конвекции, и зависят от координаты.
3. Ламинарная область короче. В начале ламинарной зоны $\alpha_{к,х}$ имеет меньшие значения, чем при свободной конвекции, но с высотой они быстро возрастают и становятся больше значений на кривой 1.

4. Интенсивность конвективного теплообмена в помещении в среднем намного выше, чем при свободной конвекции.

5.2.4. Коэффициент конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности ограждения с учетом общей подвижности воздуха в помещении

В помещении всегда есть подвижность воздуха, не зависящая от естественной конвекции на поверхностях ограждений, поэтому конвективный теплообмен принимает характер смешанной (естественной и вынужденной) конвекции. Для учета общей подвижности воздуха в помещении В.Н.Богословский [4] предложил энергетический подход, при котором, зная вынужденную подвижность v_v воздуха в помещении, можно было бы установить разность температур Δt_v , формирующую конвективный поток вдоль поверхности с такой же интенсивностью теплообмена. Для этого потенциальную энергию естественного конвективного потока надо приравнять кинетической энергии вынужденного движения воздуха. Потенциальная энергия естественной конвекции за счет разности температур Δt_v в гравитационном поле равна $W = l\beta \Delta t_v$ (β – коэффициент температурного расширения воздуха, $\beta = 1/273$ 1/К), а кинетическая энергия движущегося воздуха со скоростью v_v в вынужденном потоке составит $W_k = (v_v)^2/2g$. Считая потери на трение пренебрежимо малыми, получим

$$(v_v)^2/2g = l\beta \Delta t_v. \quad (5.42)$$

Принимая во внимание положение [4] о том, что теплообмен в потоке свободной конвекции оказывается таким же, как и в вынужденном потоке, если скорость свободного движения v_e равна половине максимальной скорости вынужденного потока v_v , получаем $\Delta t_v = (v_v)^2/(2g \cdot l\beta) = (2v_e)^2/(2g \cdot l\beta) = 293 \cdot (2v_e)^2/(2 \cdot 9,81 \cdot 1) \approx 60(v_e)^2/l. (5.43)$

Можно принять условную разность температур $\Delta t_{усл}$, как сумму разностей температуры при свободной конвекции Δt и при вынужденной Δt_v :

$$\Delta t_{усл} = \Delta t + \Delta t_v. \quad (5.44)$$

В качестве определяющего размера l для стен принимается высота помещения, а для полов и потолков – их длина.

$$\alpha_k = A \sqrt[3]{\Delta t_{усл}}. \quad (5.45)$$

1. В чем специфика конвективного теплообмена в помещении.
2. Что такое свободная конвекция?
3. Изобразите пограничные слои конвективного потока у вертикальной поверхности при свободной конвекции.
4. Какими критериями определяется интенсивность обтекания поверхности воздухом при свободной конвекции?
5. Чему равно произведение критериев Грасгофа и Прандтля для воздуха с температурой 20°C ?
6. Чему равно критическое значение произведения критериев Грасгофа и Прандтля?
7. Напишите формулу для критерия Нуссельта при турбулентном теплообмене.
8. Чему равен коэффициент конвективного теплообмена на поверхности при свободной конвекции?
9. В чем особенности конвективного теплообмена на нагретых и охлажденных горизонтальных поверхностях?
10. В чем особенности естественного конвективного теплообмена в ограниченном объеме помещения?
11. Какое влияние оказывает общая подвижность воздуха в помещении на интенсивность конвективного теплообмена на поверхностях?
12. Чему равна температурная добавка к перепаду температур, учитывающая общую подвижность воздуха в помещении?
13. Чему равен коэффициент конвективного теплообмена на поверхности в помещении с учетом общей подвижности воздуха?
14. Каково условие равенства интенсивности конвективного теплообмена при свободном и вынужденном обтекании поверхности воздухом?

5.3.1. Система уравнений теплообмена в помещении

Теплообмен помещения описывается системой уравнений, описывающих тепловые балансы каждой поверхности в помещении и тепловой баланс воздуха помещения.

Тепловой баланс поверхности в помещении включает в себя (рис. 38) лучистый теплообмен со всеми другими ограждениями с общей радиационной температурой t_R , конвективный теплообмен с воздухом, имеющим температуру t_v , тепловой поток, идущий вглубь ограждения за счет теплопередачи к наружной среде с температурой t_n , а также лучистый поток от внутреннего источника или от непосредственно проникшей в помещение через окно солнечной радиации q .

Для стационарных условий уравнение теплового баланса поверхности помещения, имеющей температуру τ_1 можно записать в виде:

$$\alpha_K(t_v - \tau_1) + \alpha_L(t_R - \tau_1) + k'(t_n - \tau_1) + q = 0, \quad (5.46)$$

где q – интенсивность падающего на внутреннюю поверхность ограждения лучистого теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

k' – неполный коэффициент теплопередаче наружного ограждения 1, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{C})$:

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (5.47)$$

Тепловой баланс воздуха в помещении включает в себя конвективный теплообмен воздуха с каждой поверхностью помещения и конвективную теплоту, которую могут внести вентиляцион-

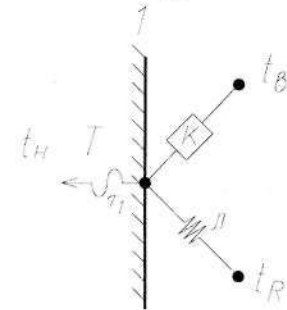


Рис. 38. Схема теплообмена поверхности в помещении. К – конвективный теплообмен, Л – лучистый теплообмен, Т – теплопроводность

ные или инфильтрационные потоки входящего в помещение воздуха и конвективные тепловыделения от внутренних источников:

$$\sum \alpha_k (\tau_i - t_{\theta}) + Lc\rho(t_{np} - t_{\theta}) + Q_k = 0. \quad (5.48)$$

где L – расход приточного или инфильтрационного воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

$c\rho$ – объемная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

t_{np} – температура входящего в помещение воздуха, $^\circ\text{C}$;

Q_k – конвективный тепловой поток от внутренних источников, Вт.

Решение системы уравнений, состоящей из тепловых балансов поверхностей, обращенных в помещение, и теплового баланса воздуха выявит температуры поверхностей ограждений и температуру воздуха.

5.3.2. Температура помещения

Для характеристики температурной обстановки в помещении наиболее общей является температура помещения t_n :

$$t_n = \frac{t_{\theta} + t_R}{2}. \quad (5.49)$$

Применив температуру помещения можно сложный (лучисто-конвективный) теплообмен на поверхности в помещении описать с помощью общего коэффициента теплоотдачи на поверхности α_n :

$$q_1 = \alpha_k (\tau_1 - t_{\theta}) + \alpha_l (\tau_1 - t_R) = \alpha_n (\tau_1 - t_n), \quad (5.50)$$

тогда коэффициент

$$\alpha_n = \alpha_k \frac{(\tau_1 - t_{\theta})}{\tau_1 - t_n} + \alpha_l \frac{(\tau_1 - t_R)}{\tau_1 - t_n} \quad (5.51)$$

Если $t_{\theta} = t_R = t_n$, то $\alpha_n = \alpha_k + \alpha_l$.

5.3.3. Упрощения полной системы уравнений

На практике применяется два основных шага упрощения:

– упрощение Киссина-Листова [4], когда поверхности в помещении делятся на 3 группы: охлаждаемые, нагреваемые, нейтральные и воздух основного объема. Всего 4 уравнения;

– упрощение, сводящее весь теплообмен в помещении к одному уравнению общего теплообмена в помещении.

Примером использования одного уравнения может служить задача о восполнении теплопотерь помещения потолочной панелью отопления. Нас интересует теплообмен между нагретой поверхностью панели и охлажденной поверхностью наружного ограждения. Уравнение теплообмена панели с помещением выглядит следующим образом:

$$Q_{пан} = \alpha_{пан.л.} (\tau_{пан} - \tau_{н.о.}) A_{пан} + \alpha_{пан.к.} (\tau_{пан} - t_{\theta}) A_{пан} = Q_l + Q_k \quad (5.52)$$

Расчетная схема общего теплообмена в помещении состоит в том, что панель отдает теплоту конвекцией в воздух помещения и лучистым путем непосредственным теплообменом с наружным ограждением, а также косвенным путем, нагрев сначала внутренние ограждения, а через них наружное ограждение:

$$Q_l = Q_1 + \Delta Q_2, \quad (5.53)$$

где Q_1 – тепловой поток прямого лучистого теплообмена панели с наружным ограждением, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

ΔQ_2 – косвенный тепловой поток от панели к внутренним, а затем к наружному ограждению, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Лучистый теплообмен панели описываем через вводимый коэффициент полной облученности с панели на наружное ограждение Φ :

$$\Phi = \varphi_{пан-н.о.} + \Delta\varphi_{косв.обл.н.о.} = \frac{\frac{A_{н.о.} - \varphi^2}{A_{пан}}}{\frac{A_{н.о.}}{A_{пан}} + 2\varphi - 1}. \quad (5.53)$$

Тогда коэффициент лучистого теплообмена в формуле (5.52) равен

$$\alpha_{пан.л.} = \varepsilon_{пан-н.о.} \cdot C_0 \cdot \Phi \cdot b_{пан-н.о.} \quad (5.54)$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое температура помещения?
2. Какие три температуры характеризуют общее тепловое состояние помещения?
3. Напишите уравнение сложного (лучисто-конвективного) теплообмена поверхности в помещении.

4. Чему равен коэффициент общего (лучистого и конвективного) теплообмена на поверхности помещения при $t_o = t_r$?

5. Напишите уравнение теплового баланса поверхности помещения.

6. Что такое неполный коэффициент теплопередачи?

7. Что такое струйный теплообмен?

8. Напишите уравнения теплового и массового балансов для элементарного объема настилающейся на поверхность струи.

9. Напишите уравнение теплового баланса основного объема воздуха в помещении.

10. Перечислите уравнения полной системы, описывающей теплообмен в помещении.

11. Какие упрощения вносят в полную систему уравнений теплообмена в помещении?

12. Что такое коэффициент полной облученности?

6. ВЛИЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА КОМФОРТНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ПОМЕЩЕНИИ

Комфортность тепловой обстановки помещения играет огромную роль в поддержании хорошего самочувствия, работоспособности и здоровья человека, так как большинство людей проводит в помещениях более 85% своей жизни. Температура внутренней поверхности ограждающих конструкций играет большую роль в формировании микроклимата помещения. Микроклиматические условия проживания и пребывания людей в зданиях и сооружениях признана Федеральным законом «О безопасности зданий и сооружений» [40] одним из важнейших факторов для защиты жизни и здоровья граждан.

6.1. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЧЕЛОВЕКА

В организме человека протекают метаболические процессы в ходе которых энергия освобождается в виде теплоты и полезной работы мышц. **Метаболизм** (обмен веществ) - совокупность процессов, связанных с поглощением, превращением, хранением и выделением продуктов жизнедеятельности организма [3]. Метаболическая тепловая энергия – **теплопродукция** человеческого тела – в основном зависит от рода деятельности, в некоторой степени связана с возрастом и полом человека. Тепловой баланс организма [3] человека можно записать следующим образом:

$$Q_q = Q_q^{изл} + Q_q^{кон} + Q_q^{исп} + Q_q^{раб} + Q_q^{физ} \pm \Delta Q_q, \quad (6.1)$$

где Q_q – теплопродукция человека, Вт;

$Q_q^{изл}$ – теплоотдача излучением, Вт;

$Q_q^{кон}$ – теплоотдача конвекцией, Вт;

$Q_q^{исп}$ – теплоотдача испарением с кожи человека, Вт;

$Q_q^{раб}$ – тепловой эквивалент выполняемой человеком работы, Вт;

$Q_q^{физ}$ – теплота, идущая на физиологические процессы организма человека, Вт;

ΔQ_q – дисбаланс теплоты, определяющий адаптацию системы терморегуляции человека к тепловой обстановке.

Энергетический коэффициент полезного действия обмена веществ человека по данным гигиенистов составляет не более 20%. Физиологические процессы требуют еще меньших затрат теплоты. Поэтому человек нуждается в постоянной отдаче теплоты в окружающую среду. Теплоотдача человеческого тела значительно зависит от одежды и тепловых факторов окружающей среды. Если условия среды таковы, что человек отдает не больше и не меньше теплоты, чтобы сохранить тепловой баланс без ощутимого дисбаланса, то такие условия человек оценивает как комфортные. Наличие дисбаланса теплоты вызывает нагрузку на систему терморегуляции человека. Система терморегуляции человека действует в результате 2-х факторов: потоотделения и изменения температуры поверхности кожи человека. Задача определения комфортности тепловой обстановки в помещении состоит в создании условий для теплоотдачи человеком в окружающую среду излучением, конвекцией и потоотделением необходимого количества энергии:

$$Q_{\text{ч}}^{\text{изл}} + Q_{\text{ч}}^{\text{кон}} + Q_{\text{ч}}^{\text{исп}} = f(t_{\text{в}}, t_{\text{р}}, v_{\text{в}}, \varphi_{\text{в}}), \quad (6.2)$$

где $t_{\text{в}}$ — температура воздуха помещения, °C;

$t_{\text{р}}$ — радиационная температура относительно человека, °C;

$v_{\text{в}}$ — скорость (подвижность) воздуха в помещении, м/с;

$\varphi_{\text{в}}$ — относительная влажность воздуха помещения.

Таким образом, организм человека является саморегулирующейся системой, физиологический механизм которой направлен на сохранение постоянства внутренней температуры путем обеспечения соответствия вырабатываемой теплоты количеству теплоты, отдаваемому во внешнюю среду. Механизмы терморегуляции активизируются раздражением кожных терморесепторов под влиянием тепловых воздействий среды и непосредственным раздражением центров терморегуляции в мозге за счет изменения температуры крови [15].

Температура внутренней поверхности ограждающих конструкций прямо влияет на радиационный теплообмен человека, а косвенно участвует в формировании температуры воздуха, а следовательно, и в конвективном теплообмене и в теплообмене за счет испарения. Следует отметить специфику радиационного теплообмена человека. Она заключается в глубоком проникновении

в ткани тела человека длинноволновых тепловых волн, испускаемых охлажденной или нагретой поверхностью [18]. Поэтому радиационное переохлаждение или перегрев могут привести не только к дискомфорту, но и к болезни человека.

Так как теплопродукция человека зависит от вида деятельности, на основе интенсивности энергозатрат людей, занятых на производстве, выделены *категории работ*. К категории Ia относятся работы с интенсивностью энергозатрат до 139 Вт, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением (ряд профессий на предприятиях точного приборостроения и машиностроения, на часовом, швейном производствах, в сфере управления и т.п.). К категории Ib относятся работы с интенсивностью энергозатрат 140-174 Вт, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением (ряд профессий в полиграфической промышленности, на предприятиях связи, контролеры, мастера в различных видах производства и т.п.). К категории IIa относятся работы с интенсивностью энергозатрат 175-232 Вт, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения (ряд профессий в механо-сборочных цехах машиностроительных предприятий, в прядильно-ткацком производстве и т.п.). К категории IIб относятся работы с интенсивностью энергозатрат 233-290 Вт, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением (ряд профессий в механизированных литейных, прокатных, кузнечных, термических, сварочных цехах машиностроительных и металлургических предприятий и т.п.). К категории III относятся работы с интенсивностью энергозатрат более 290 Вт, связанные с постоянным передвижением, перемещением и переноской значительных (свыше 10 кг) тяжестей и требующие больших физических усилий (ряд профессий в кузнечных цехах с ручной ковкой, литейных цехах с ручной набивкой и заливкой опок, машиностроительных и металлургических предприятий и т.п.).

6.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К МИКРОКЛИМАТУ ПОМЕЩЕНИЯ

В соответствии с [40] **микроклимат помещения** – метеорологические условия внутренней среды помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха.

Внутренние **тепловые условия в помещении** могут быть заданы исходя из 3-х задач:

- поддержание комфортности для человека;
- создание требуемых условий для технологического процесса;
- удовлетворение комфортно-технологических требований.

Система кондиционирования микроклимата должна обеспечить расчетные условия в пределах **обслуживаемой зоны помещения** (рабочей зоны, зоны обитания) [13]. Это пространство в помещении, ограниченное плоскостями, параллельными полу и стенам: на высоте 0,1 и 2,0 м над уровнем пола (но не ближе, чем 1 м от потолка при потолочном отоплении), на расстоянии 0,5 м от внутренних поверхностей наружных и внутренних стен, окон и отопительных приборов.

Расчетные тепловые внутренние условия в помещении состоят в основном:

- из температурных условий – температуры воздуха t_v , радиационной температуры t_r и температуры помещения (результатирующей температуры) t_n ;
- аэродинамических условий - подвижности воздуха v_a ;
- влажностных условий ϕ_v , d_v , e_v .

При этом **радиационная температура помещения** понимается как усредненная по площадям температура внутренних поверхностей ограждений помещения и отопительных приборов.

Более точно радиационная температура относительно человека, стоящего посредине обслуживаемой зоны рассчитывается по выражению (5.17). Ее можно переписать в виде

$$t_r = \sum \varphi_{\text{ч-}i} \cdot t_i \quad (6.3)$$

где $\varphi_{\text{ч-}i}$ – коэффициенты облученности с поверхности человека (ч) в сторону окружающих его поверхностей, имеющих температуру t_i .

Коэффициенты облученности можно определить по графикам рис. 40, построенным И.И. Шаркаукасасом с помощью светового

моделирования [4], при котором тело человека было заменено цилиндром высотой 1,8 м и диаметром 0,28 м.

Результирующая температура помещения t_n – комплексный показатель радиационной температуры t_r и температуры воздуха t_v помещения, определяемый по [13] при скорости движения воздуха до 0,2 м/с как их среднеарифметическое значение:

$$t_n = \frac{t_r + t_v}{2}, \quad (6.4)$$

а при скорости движения воздуха от 0,2 до 0,6 м/с t_n по формуле:

$$t_n = 0,4t_r + 0,6t_v, \quad (6.5)$$

учитывающей преимущественное влияние на ощущение человека температуры воздуха, так как при большей подвижности воздуха конвективный теплообмен усиливается.

В натуральных условиях результирующую температуру можно определить по измеренным температурам всех внутренних поверхностей ограждающих конструкций, отопительных приборов и воздуха, либо по данным измерений шаровым термометром.

Шаровой термометр для определения результирующей температуры представляет собой зачерненную снаружи (степень черноты поверхности не ниже 0,95) полую сферу, изготовленную из меди или другого теплопроводного материала, внутри которой помещен либо стеклянный термометр, либо термоэлектрический преобразователь. Рекомендуемый [13] диаметр сферы 150 мм. Толщина стенок сферы должна быть минимальной. Например, из меди – 0,4 мм. Время нахождения шарового термометра в точке замера перед измерением не менее 20 мин.

Измеренная в центре шара температура шарового термометра является равновесной температурой от радиационного и конвективного теплообмена между шаром и окружающей средой.

По замерам шаровым термометром может быть вычислена радиационная температура помещения, °С, по формуле:

$$t_r = t_n + m\sqrt{V(t_n - t_v)}, \quad (6.6)$$

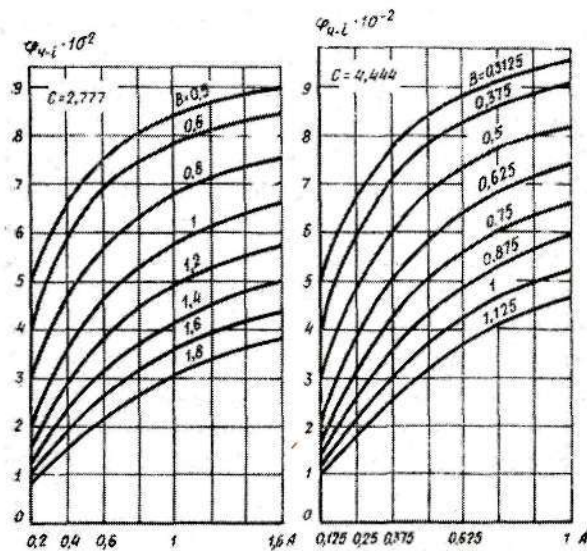
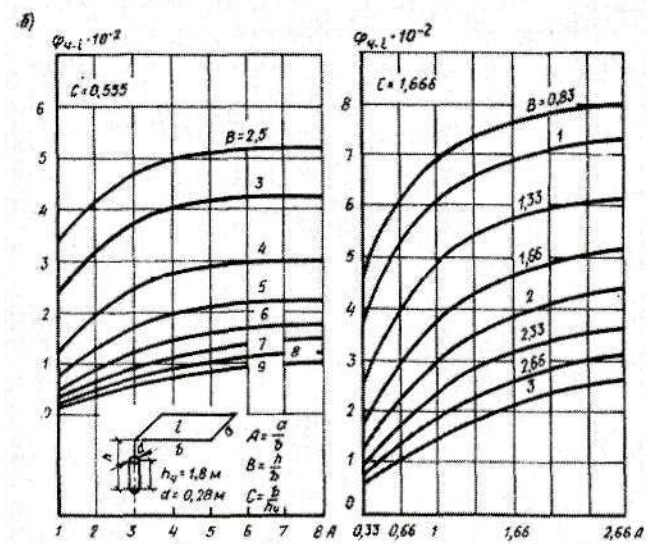
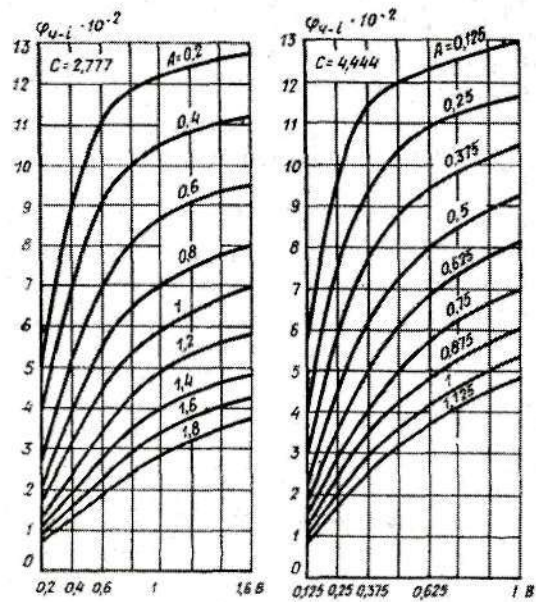
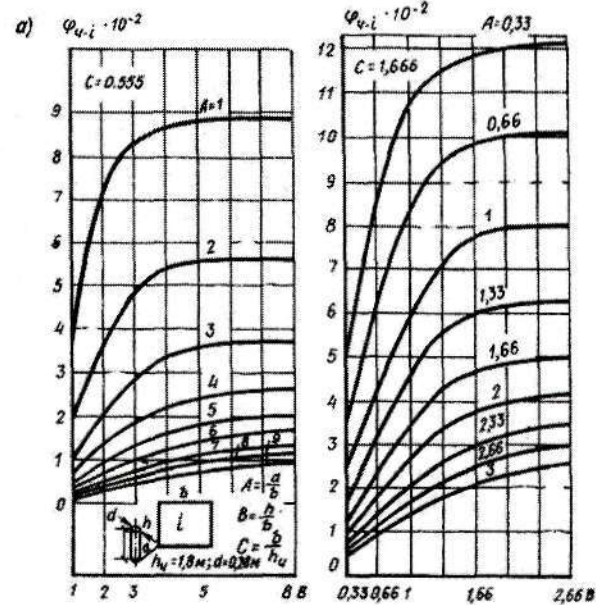
где t_n – результирующая температура по шаровому термометру, °С;

V – скорость движения воздуха, м/с;

m – константа, равная 2,2 при диаметре сферы до 150 мм, при большем диаметре рассчитывается по формуле:

$$m = 2,2(0,15/d)^{0,4}, \quad (6.7)$$

здесь d – диаметр сферы, м.



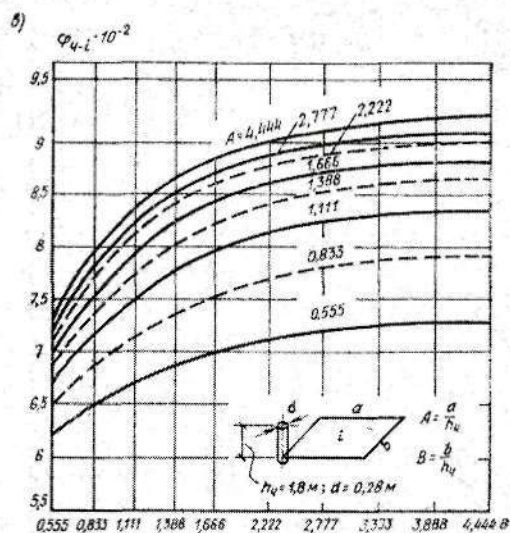


Рис. 40. Коэффициенты облученности с человека на поверхности помещения: а – на стены; б – на потолок; в – на пол

Еще одним важным параметром внутренней среды помещения, на который оказывает влияние температура внутренних поверхностей ограждающих конструкций, является **локальная асимметрия результирующей температуры** в помещении – разность результирующих температур в точке помещения, определенных шаровым термометром для двух противоположных направлений. Локальная асимметрия результирующей температуры важна в холодный период года для людей, находящихся на границе обслуживаемой зоны у витражей, или у холодных стеновых панелей лучистого охлаждения помещения в теплый период года.

Шаровой термометр для определения локальной асимметрии результирующей температуры представляет собой полую сферу, у которой одна половина шара имеет зеркальную поверхность (степень черноты поверхности не выше 0,05), а другая – зачерненную поверхность (степень черноты поверхности не ниже 0,95). Зеркальную поверхность образуют гальваническим методом путем нанесения хромового покрытия. Допускается наклеивание полированной фольги.

Разные люди на одни и те же условия могут реагировать по-разному. Поэтому сочетания параметров, выделяемые нормами как комфортные для людей, ориентированы на большинство. В зависимости от требований норм [13] или заказчика показатели микроклимата делятся на оптимальные и допустимые. **Оптимальные параметры микроклимата** [13] – сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80% людей, находящихся в помещении. **Допустимые параметры микроклимата** при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать общее и локальное ощущение дискомфорта, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности при усиленном напряжении механизмов терморегуляции и не вызывают повреждений или ухудшения состояния здоровья.

Шаровой термометр для определения локальной асимметрии результирующей температуры представляет собой полую сферу, у которой одна половина шара имеет зеркальную поверхность (степень черноты поверхности не выше 0,05), а другая – зачерненную поверхность (степень черноты поверхности не ниже 0,95). Зеркальную поверхность образуют гальваническим методом путем нанесения хромового покрытия. Допускается наклеивание полированной фольги.

Разные люди на одни и те же условия могут реагировать по-разному. Поэтому сочетания параметров, выделяемые нормами как комфортные для людей, ориентированы на большинство. В зависимости от требований норм [13] или заказчика показатели микроклимата делятся на оптимальные и допустимые. **Оптимальные параметры микроклимата** [13] – сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80% людей, находящихся в помещении. **Допустимые параметры микроклимата** при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать общее и локальное ощущение дискомфорта, ухудшение самочувствия и понижение работоспо-

Таблица 5

Запись второго условия комфортности для различных условий [4]

	Зима	Лето
Нагретая поверхность	$\tau_{\text{нагр.}}^{\text{доп}} = 19,2 + \frac{8,7}{\varphi_{\text{ч-п}}}$	$\tau_{\text{нагр.}}^{\text{доп}} = 29 + \frac{4,7}{\varphi_{\text{ч-п}}}$
Охлажденная поверхность	$\tau_{\text{охл.}}^{\text{доп}} = 23 - \frac{5}{\varphi_{\text{ч-п}}}$	$\tau_{\text{охл.}}^{\text{доп}} = 25 - \frac{5}{\varphi_{\text{ч-п}}}$
Для окна	$\tau_{\text{ок.}}^{\text{доп}} = 14 - \frac{4,4}{\varphi_{\text{ч-ок}}}$	

Из опытов известно, что элементарная площадка на голове человека должна отдавать в окружающую среду излучением тепловой поток в диапазоне $11,6 < q_{\text{дф}} < 69,6 \text{ Вт/м}^2$, допускаются менее жесткие условия $0 < q_{\text{дф}} < 93 \text{ Вт/м}^2$. В табл. 5 приведены уравнения для второго условия комфортности.

Приведенные условия комфортности используются при определении допустимых значений температуры на потолочных и стеновых панелях охлаждения и отопления. Кроме того, они могут быть использованы для выяснения, достаточно ли сопротивление теплопередачи витража.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Из чего складывается тепловой баланс человека?
2. Что такое обслуживаемая (рабочая) зона помещения?
3. Какие метеорологические параметры определяют тепловую обстановку в помещении?
4. Что такое комфортная тепловая обстановка?
5. Чем определяется степень дискомфорта в помещении?
6. Сформулируйте первое условие комфортности тепловой обстановки в помещении.
7. Сформулируйте второе условие комфортности тепловой обстановки в помещении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. АВОК. Справочное пособие-1-2004. Влажный воздух.- М.:АВОК_ПРЕСС, 2004.
2. Ананьев А.И., Иванов Л.В., Комов В.М.. Исследование наружных кирпичных стен жилых зданий и нормирование теплозащитных качеств. Сб. докладов пятой научно-практической конференции 26-28 апреля 2000 г. (Академические чтения) под ред. В.Г.Гагарина и И.В.Бессонова «Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях». – М.: НИИСФ, 2000.
3. Банхиди Л. Тепловой микроклимат помещений: Расчет комфортных параметров по теплоощущениям человека / Пер. с венг. В.М.Белова; Под ред. В.И. Прохорова и А.Л. Наумова. – М.: Стройиздат. 1981.- 248 с.
4. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. – 3-е изд. – С-Пб.: изд-во «АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД», 2006. – 400 с.
5. Брилинг Р.Е.. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Госстройиздат, 1948.
6. Варпаев В.Н., Китайцева Е.Х. Математическое моделирование задач внутренней аэродинамики теплообмена зданий. М.: Изд-во СТА, 2008. 338 с.
7. Власов О.Е.. Основы строительной теплотехники. – М.: ВИА РККА, 1938.
8. Власов О.Е.. Плоские тепловые волны.//Известия теплотехнического института. 1927, вып.3 (26).
9. Гагарин В.Г. Сорбция и десорбция водяного пара материалами ограждающей конструкции. // В кн. "Российская архитектурно-строительная энциклопедия" т.2, М., Минстрой РФ, 1995, с. 425-427.
10. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А.В., Мехнецов И.А. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях. Метод оценки теплозащиты стены здания с вентилируемым фасадом с учетом продольной фильтрации воздуха.// Журнал АВОК. 2005, №8, стр. 60-70.
11. Гагарин В. Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий // АВОК. – 2009. – №№ 1–3.

12. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»

13. ГОСТ 23166-99. Межгосударственный стандарт. Блоки оконные. Общие технические условия. – М.: ГУП ЦПП, 2000.-46 с.

14. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.- М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999.

15. Губернский Ю.Д., Корневская Е.И. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий.- М., «Медицина», 1978, 192 с.

16. Дмитриев А.Н., Ковалев И.Н., Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005.-120 с.

17. Ильинский В.М.. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий): учеб. пособие для инж.-строит. вузов.- М.: «Высш. школа», 1974, с. 319.

18. Кувшинов Ю.Я. Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения. / Научное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 184 с.

19. Малявина Е.Г., Маркевич А.С. Теплотехнический расчет наружных ограждений и расчет теплового режима здания / Учебное пособие. – М.: МГСУ, 2009. - 72 с.

20. Е.Г.Малявина. Теплопотери здания.: справочное пособие/Е.Г.Малявина.-М.:АВОК- ПРЕСС, 2007.-144 с.

21. Михеев М.А.. Основы теплопередачи.- М.: Госэнергоиздат, 1956

22. Муромов С.И. . Расчетные температуры наружного воздуха и теплоустойчивость зданий. – М.: Стройиздат Наркомстроя, 1939.

23. Поляк Г.Л. «Алгебра однородных потоков» Известия энергетического института Академии наук. 1935 г.

24. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. - М., 1958. - 64 с.

25. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность / Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 296 с.

26. СанПиН 2.2.4548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора, 1996. - 21 с.

27. Селиверстов Г.А. Теплоустойчивость зданий. - М.: Госстройиздат, 1934.

28. Семенов Л.А. Теплоустойчивость и печное отопление жилых и общественных зданий. – М.: Машстройиздат, 1950.

29. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. - М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.

30. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий/ Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.

31. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Госстрой РФ. – М.: ГУП ЦПП, 1993. – 58с.

32. СП 23-101-2004. "Проектирование тепловой защиты зданий".

33. Строительная климатология/НИИ строит. физики- М.: Стройиздат, 1990, 86 с.: ил.- (Справочное пособие к СНиП).

34. Табунщиков Ю.А., Бродяч М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. - М.: АВОК_ПРЕСС, 2002.-194 с.

35. Титов В.П.. Воздушный режим промышленных зданий.//Водоснабжение и санитарная техника.1976, №3.

36. Титов В.П., Рымаров А.Г., Самарин О.Д. "Расчет мощности системы отопления и воздухообмена в помещениях здания"; методические указания по курсовой работе (курс Основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха); специальность "Теплогазоснабжение и вентиляция". – М.: МГСУ, 1999.

37. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. – М.: Стройиздат, 1969. – с.

38. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Табунщикова Ю.А. и Гагарина В.Г.- 5-е изд, пересмотр.- М.:АВОК-ПРЕСС, 2006, с. 287

39. Фокин К.Ф. Расчетные температуры наружного воздуха. -М.: Стандартгиз, 1946.

40. ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»

41. Швидковский Е.Г. К теории плоских температурных волн. // ЖТФ. 1940, т.Х, вып.2.

42. Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях.- М – Л.:Госэнергоиздат, 1961.

43. Шкловер А.М., Васильев Б.Ф., Ушков Ф.В.. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий.- М.: Госстройиздат, 1956. 350 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Теплопередача через наружные ограждения	7
1.1. Основы теплопередачи в здании	7
1.2. Влажностный режим ограждающих конструкций	25
1.3. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций	41
2. Защитные свойства наружных ограждающих конструкций ...	51
2.1. Расчетные параметры наружной среды для теплотехнических расчетов	51
2.2. Расчетные значения параметров внутреннего микроклимата.....	55
2.3. Требуемое сопротивление теплопередаче наружного ограждения	58
2.4. Влияние влажностного режима наружного ограждения на его теплозащитные качества	63
2.5. Влияние воздухопроницаемости наружного ограждения на его теплозащитные качества	70
3. Стационарная теплопередача через сложное ограждение ...	78
3.1. Основное дифференциальное уравнение и методы его решения	78
3.2. Метод конечных разностей	81
3.3. Приближенные инженерные методы	84
3.4. Электротепловая аналогия	89
4. Нестационарный тепловой режим ограждения и помещения ..	94
4.1. Основное дифференциальное уравнение теплопроводности.....	94
4.2. Методы решения задач нестационарной теплопередачи. Метод конечных разностей	95
4.3. Теплоустойчивость ограждения	96

4.4. Теплоустойчивость помещения	103
5. Теплообмен в помещении	108
5.1. Лучистый теплообмен в помещении	108
5.2. Конвективный теплообмен в помещении	120
5.3. Общий теплообмен в помещении	129
6. Влияние ограждающих конструкций на комфортность тепловой обстановки в помещении.	133
6.1. Тепловой баланс человека	133
6.2. Основные понятия, относящиеся к микроклимату помещения	136
6.3. Условия комфортности температурной обстановки в помещении	142
Библиографический список	145

Малявина Елена Георгиевна

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Учебное пособие

Редактор *О.А. Гладкова*

Компьютерная правка и верстка *О.В. Суховой*

Лицензия ЛР №020675 от 09.12.97 г.

Подписано в печать 05.03.2011 г.	Формат 60×84 1/16	Печать офсетная
И-269	Объем 9,5 п.л.	Т. 300
		Заказ 86

ГОУ ВПО Московский государственный строительный университет.
Ред.-изд. отдел. Тел. (499) 183-97-95, e-mail rio@mgsu.ru.
Типография МГСУ. Тел. (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44.
E-mail: info@mgsuprint.ru