

Конспект лекций для студентов специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Содержание

1. Введение.....	6
1.1. Цель и задачи курса.....	6
1.2. Предмет курса.....	6
1.3 Здание как единая энергетическая система.....	7
Вопросы для самоконтроля.....	7
2. Тепловлагодпередача через наружные ограждения.....	8
2.1. Основы теплопередачи в здании.....	8
2.1.1. Теплопроводность.....	8
2.1.2. Конвекция.....	11
2.1.3. Излучение.....	12
2.1.4. Термическое сопротивление воздушной прослойки.....	13
Вопросы для самоконтроля.....	14
2.1.5. Коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях.....	15
2.1.6. Теплопередача через многослойную стенку.....	15
2.1.7. Приведенное сопротивление теплопередаче.....	17
2.1.8. Распределение температуры по сечению ограждения.....	18
Вопросы для самоконтроля.....	19
2.2. Влажностный режим ограждающих конструкций.....	19..
2.2.1. Причины появления влаги в ограждениях.....	20
2.2.2. Отрицательные последствия увлажнения наружных ограждений	21
2.2.3. Связь влаги со строительными материалами.....	22
2.2.4. Влажный воздух.....	22.
2.2.5. Влажность материала.....	24
2.2.6. Сорбция и десорбция.....	25.
2.2.7. Паропроницаемость ограждений.....	25
Вопросы для самоконтроля.....	28
3. Защитные свойства наружных ограждений.....	29
3.1. Расчетные параметры наружной среды для теплотехнических расчетов.....	29
3.1.1. Холодный период года и отопительный период.....	29
3.1.2. Расчетная температура наружного воздуха.....	30
3.1.3. Средние температура и продолжительность отопительного периода	31
3.1.4. Расчетный и среднесезонный ветер.....	31
3.1.5. Влажностные условия района строительства.....	32
3.2. Расчетные значения параметров внутреннего микроклимата.....	32
Вопросы для самоконтроля.....	33
3.3. Требуемое сопротивление теплопередаче наружного ограждения	33
3.3.1. Показатели теплозащиты здания.....	33
3.3.2. Предписывающий подход к выбору сопротивления теплопередаче наружных ограждений.....	34
3.3.3. Понятие об экономически целесообразном сопротивлении теплопередаче ограждения.....	35
3.4. Влияние влажности на теплозащитные качества наружного	

ограждения.....	36
3.4.1. Конструирование ограждающей конструкции с теплотехнической точки зрения.....	36
3.4.2. Плоскость возможной конденсации. Требуемые сопротивления паропрооницанию ограждения.....	37
3.4.3. Тепловлажностные условия эксплуатации ограждающих конструкций здания.....	38
Вопросы для самоконтроля.....	39
3.5. Воздухопроницаемость наружных ограждений.....	39
3.5.1.. Основные положения.....	39
3.5.2. Разность давлений на наружной и внутренней поверхности ограждений.....	40
3.5.3. Воздухопроницаемость строительных материалов.....	43
3.5.4. Фильтрация воздуха через ограждения.....	44
3.5.5. Требуемое сопротивление воздухопроницанию окон, балконных дверей, витражей и световых фонарей.....	44
3.5.6. Приведенное сопротивление воздухопроницанию окон, балконных дверей, витражей и световых фонарей жилых, общественных и производственных зданий.....	46
3.5.7. Потребность в теплоте на нагревание инфильтрационного воздуха	47
Вопросы для самоконтроля.....	48
4. Стационарная теплопередача через сложное наружное ограждение.....	49
4.1. Основное дифференциальное уравнение и методы его решения.....	49
4.2. 4.2. Метод конечных разностей.....	50
4.3. Приближенные инженерные методы.....	53
4.3.1. Коэффициент теплотехнической однородности.....	53
4.3.2. Метод сложения проводимостей.....	53
4.3.3. Фактор формы.....	54
4.4. Электротепловая аналогия.....	55
Вопросы для самоконтроля.....	58
5. Нестационарный тепловой режим помещения и ограждения.....	59
5.1. Основное дифференциальное уравнение теплопроводности.....	59
5.2. Методы решения задач нестационарной теплопередачи. Метод конечных разностей.....	59
5.3. Теплоустойчивость ограждения и помещения.....	60
5.3.1. Коэффициент теплоусвоения материала.....	61
5.3.2. Слой резких колебаний. Показатель тепловой инерция слоя D...61	61
5.3.3. Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения.....	62
5.3.4. Коэффициент теплопоглощения ограждения.....	64
5.3.5. Теплоустойчивость наружного ограждения по отношению к внешним воздействиям.....	64
5.4. Теплоустойчивость помещения.....	65
Вопросы для самоконтроля.....	67
6. Теплообмен в помещении.....	68.
6.1. Лучистый теплообмен в помещении.....	68
6.1.1. Основные законы излучения абсолютно черного тела.....	68
6.1.2. Излучение поверхности серого тела.....	70
6.1.3. Лучистый теплообмен между двумя поверхностями серого тела	71
6.1.4. Радиационная температура помещения	72

Вопросы для самоконтроля.....	73
6.2. Конвективный теплообмен в помещении.....	74
6.2.1. Движение воздуха у внутренней поверхности ограждения.....	74
6.2.2. Коэффициент конвективного теплообмена на внутренней поверхности ограждения при естественной конвекции.....	75
6.2.3. Особенности конвективного теплообмена на поверхности в помещении.....	76
6.2.4. Коэффициент конвективного теплообмена на внутренней поверхности ограждения при смешанной или вынужденной конвекции.....	77
6.3. Общий теплообмен в помещении.....	77
Вопросы для самоконтроля.....	77
6.3.1. Система уравнений теплообмена в помещении.....	78
6.3.2. Температура помещения.....	79
6.3.3. Упрощения полной системы уравнений.....	79
Вопросы для самоконтроля.....	80
7. Комфортность тепловой обстановки в помещении.....	80
7.1. Тепловой баланс человека.....	80
7.2. Условия комфортности температурной обстановки в помещении.....	81
Вопросы для самоконтроля.....	82
Список литературы.....	82

1. Введение

1.1. Цель и задачи курса

Конспект лекций дисциплины «Строительная теплофизика» предназначен 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 изучения 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 процессе проектирования и эксплуатации систем обеспечения микроклимата здания.

В результате освоения дисциплины студент должен знать понятия, определяющие тепловой, воздушный и влажностный режим 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; нормативы теплозащиты наружных ограждений, 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.

1.2. Предмет курса

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

Не смотря 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, во-первых, от теплотехнических качеств наружных ограждений зависят теплопотери здания, влияющих на мощность отопительных систем и расход теплоты ими за отопительный период. Во-вторых, что влажностный режим наружных ограждений влияет на их теплозащиту, а, следовательно, на мощность систем, обеспечивающих заданный микроклимат здания. В-третьих, что 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, что «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, что от воздушного режима здания зависит не только наличие или отсутствие инфильтрации, но и работа систем вентиляции, особенно естественных. В-шестых, что радиационная

температура внутренних поверхностей наружных и внутренних ограждений, важнейшая составляющая оценки микроклимата помещений, в основном является производной от теплозащиты здания. В-седьмых, что теплоустойчивость ограждений и помещений влияет на постоянство температуры 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 [1] 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.

1.3. 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 ней 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. Чем важна строительная теплофизика для специалиста по отоплению и вентиляции?
3. В чем специфика теплотехнического расчета современных зданий?
4. Что такое тепловой режим здания?
5. Какую роль играют ограждающие конструкции в тепловом режиме здания?
6. Какие параметры внутренней среды поддерживаются системами отопления и вентиляции?
7. Что такое система кондиционирования микроклимата здания?

2. Тепловлагопередача через наружные ограждения

2.1. 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**.

2.1.1. Теплопроводность

Теплопроводность – вид передачи теплоты между неподвижными частицами твердого, жидкого или газообразными 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, то есть 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 температур 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**, то есть 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:

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

где

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

λ – **теплопроводность материала**, Вт/м·°С;

t – температура, изменяющаяся вдоль оси x , °С;

Отношение $\frac{dt}{dx}$, носит название **градиента температуры**, °С/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 (2.1), показывает, что увеличение теплового потока не совпадает с увеличением температуры.

Теплопроводность λ является одной из основных тепловых характеристик материала. Как следует из уравнения (2.1) теплопроводность материала – это мера проводимости теплоты материалом, численно равная тепловому потоку, проходящему сквозь 1 м^2 площади, перпендикулярной направлению потока, при градиенте температуры, равном $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$ (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 $0,3 \text{ Вт}/\text{м}^\circ\text{C}$.

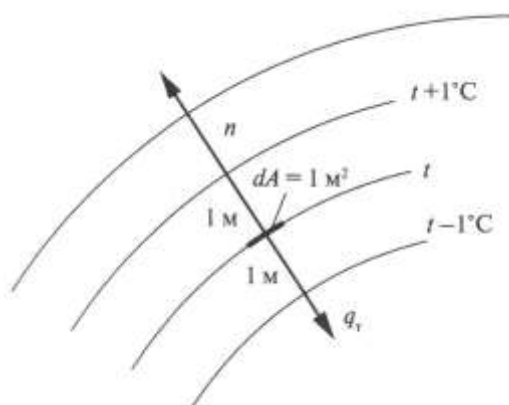


Рис.1 Направления теплового потока и градиента температуры.

_____ - изотермы; ----- - линии тока теплоты.

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

Различия в пористости и в теплопроводности скелета приводит к различию в теплопроводности материалов, даже при одинаковой их плотности. Например, следующие материалы (табл.1) при одной и той же плотности, $\rho_0=1800 \text{ кг}/\text{м}^3$, имеют различные значения теплопроводности [2]:

Таблица 1.
Теплопроводность материалов с одинаковой плотностью $1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ [2].

Материал	Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$
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. То есть существует некоторое значение плотности, при котором теплопроводность имеет минимальное значение. Существуют оценки того, что при 20°C в порах диаметром 1мм 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]:

$$\lambda_0 = \lambda_t / (1 + \beta \cdot t), \quad (2.2)$$

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, передаваемый теплопроводностью через однородную стенку, может быть выражен уравнением:

$$q_T = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\frac{\delta}{\lambda}}, \quad (2.3)$$

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

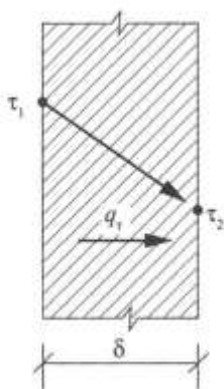


Рис. 2. Распределение температуры в плоской однородной стенке

Из выражения (2.3) следует, что распределение температуры по толщине стенки линейное. Величина $\frac{\delta}{\lambda}$ названа **термическим сопротивлением материального слоя** и обозначена R_T , м²·°C/Вт:

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2.4)$$

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

$$q_T = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R_T}, \quad (2.5)$$

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.

2.1.2. 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, зависит 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:

$$q_k = \alpha_k (t_a - \tau), \quad (2.6)$$

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

t_a – температура воздуха, омывающего поверхность стенки, °С;

τ – температура поверхности стенки, °С;

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

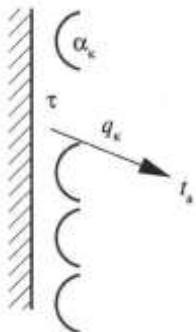


Рис. 3 Конвективный теплообмен
стенки с воздухом

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 (2.5) удобно переписать в виде:

$$q_k = \frac{t_a - \tau}{R_k}, \quad (2.7)$$

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

Сопротивление R_k является величиной обратной коэффициенту конвективной теплоотдачи α_k :

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k}, \quad (2.8)$$

2.1.3. Излучение

Излучение (лучистый теплообмен) – перенос теплоты с поверхности на поверхность через лучепрозрачную среду электромагнитными волнами, трансформирующимися в теплоту (рис.4).

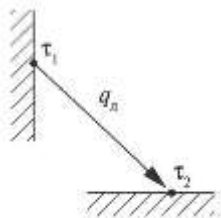


Рис. 4 Лучистый теплообмен
между двумя поверхностями

Любое физическое тело, имеющее температуру отличную от абсолютного нуля, излучает в окружающее пространство энергию в виде электромагнитных волн. Свойства электромагнитного излучения характеризуются длиной волны.

Излучение, которое воспринимается как тепловое и имеющее длины волн в диапазоне 0,76 – 50 мкм, называется инфракрасным.

Например, лучистый теплообмен происходит между поверхностями, обращенными в помещение, между наружными поверхностями различных зданий, поверхностями земли и неба. Важен лучистый теплообмен между внутренними поверхностями ограждений помещения и поверхностью отопительного прибора. Во всех этих случаях лучепрозрачной средой, пропускающей тепловые волны, является воздух.

В практике расчетов теплового потока при лучистом теплообмене используют упрощенную формулу. Интенсивность передачи теплоты излучением q_l , Вт/м², определяется разностью температуры поверхностей, участвующих в лучистом теплообмене:

$$q_l = \alpha_l (\tau_1 - \tau_2), \quad (2.9)$$

где τ_1 и τ_2 – значения температуры поверхностей, обменивающихся лучистой теплотой, °С;

α_l – коэффициент лучистой теплоотдачи на поверхности стенки, Вт/м²·°С.

Коэффициент теплоотдачи излучением, α_l – физическая величина, численно равная количеству теплоты, передаваемой от одной поверхности к другой путем излучения при разности между температурой поверхностей, равной 1°С.

Введем понятие **сопротивления лучистой теплоотдаче** R_l на поверхности ограждающей конструкции, м²·°С/Вт, равное разности температуры на поверхностях ограждений, обменивающихся лучистой теплотой, при прохождении с поверхности на поверхность теплового потока с поверхностной плотностью 1 Вт/м².

Тогда уравнение (2.8) можно переписать в виде:

$$q_l = \frac{\tau_1 - \tau_2}{R_l}, \quad (2.10)$$

Сопротивление R_l является величиной обратной коэффициенту лучистой теплоотдачи α_l :

$$R_l = \frac{1}{\alpha_l}. \quad (2.11)$$

2.1.4. Термическое сопротивление воздушной прослойки

Для внесения единообразия сопротивление теплопередаче **замкнутых воздушных прослоек**, расположенных между слоями ограждающей конструкции, называют **термическим сопротивлением** $R_{в.п}$, м²·°С/Вт.

Схема передачи теплоты через воздушную прослойку представлена на рис.5.

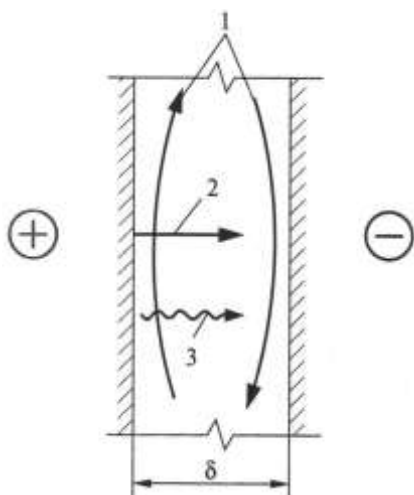


Рис. 5. Теплообмен в воздушной прослойке

Тепловой поток, проходящий через воздушную прослойку $q_{в.п}$, Вт/м², складывается из потоков, передаваемых теплопроводностью (2) q_m , Вт/м², конвекцией (1) q_k , Вт/м², и излучением (3) q_l , Вт/м².

$$q_{в.п} = q_m + q_k + q_l. \quad (2.12)$$

При этом доля потока, передаваемого излучением самая большая. Рассмотрим замкнутую

вертикальную воздушную прослойку, на поверхностях которой разность температуры составляет 5°C . С увеличением толщины прослойки от 10 мм до 200 мм доля теплового потока за счет излучения возрастает с 60% до 80%. При этом доля теплоты, передаваемой путем теплопроводности, падает от 38% до 2%, а доля конвективного теплового потока возрастает с 2% до 20% [2].

Прямой расчет этих составляющих достаточно громоздок. Поэтому в нормативных документах [4] приводятся данные о термических сопротивлениях замкнутых воздушных прослоек, которые в 50-х годах XX века была составлена К.Ф.Фокиным [2] по результатам экспериментов М.А.Михеева [5]. При наличии на одной или обеих поверхностях воздушной прослойки теплоотражающей алюминиевой фольги, затрудняющей лучистый теплообмен между поверхностями, обрамляющими воздушную прослойку, термическое сопротивление следует увеличить в два раза. Для увеличения термического сопротивления замкнутыми воздушными прослойками в [2] рекомендуется иметь в виду следующие выводы из исследований:

- 1) эффективными в теплотехническом отношении являются прослойки небольшой толщины;
- 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 $\epsilon=0,05$. Покрытие фольгой обеих поверхностей воздушной прослойки практически не уменьшает передачу теплоты.

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 $t_{\text{в}}$ и наружной $t_{\text{н}}$ 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. Из тепловых потоков какой природы состоит общий тепловой поток через воздушную прослойку?

16. Какой природы тепловой поток превалирует в тепловом потоке через воздушную прослойку?
17. Как влияет толщина воздушной прослойки на распределение потоков в ней.
18. Как уменьшить тепловой поток через воздушную прослойку?

2.1.5. Коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях

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

$$q = \alpha_{\text{к.в}}(t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}) + \alpha_{\text{л.в}}(t_{\text{окр.в}} - \tau_{\text{в}}); \quad q = \alpha_{\text{к.н}}(t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}) + \alpha_{\text{л.н}}(t_{\text{окр.н}} - \tau_{\text{н}}), \quad (2.13)$$

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

$\alpha_{\text{к.в}}$, $\alpha_{\text{к.н}}$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки, м²·°С/Вт;

$\alpha_{\text{л.в}}$, $\alpha_{\text{л.н}}$ – коэффициенты лучистой теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки, м²·°С/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 $\alpha_{\text{в}}$, Вт/(м²·°С), а на наружной поверхности – теплоотдача, интенсивность которой определяется коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{\text{н}}$, Вт/(м²·°С).

Кроме того, принято считать, что температура воздуха и окружающих поверхностей равны друг другу, то есть $t_{\text{окр.в}} = t_{\text{в}}$, а $t_{\text{окр.н}} = t_{\text{н}}$. То есть

$$q = \alpha_{\text{в}}(t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}); \quad q = \alpha_{\text{н}}(t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}), \quad (2.14)$$

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

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{к.в}} + \alpha_{\text{л.в}}; \quad \alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{к.н}} + \alpha_{\text{л.н}}. \quad (2.15)$$

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

Величины, обратные коэффициентам теплоотдачи, принято называть **сопротивлениями теплообмену на внутренней $R_{\text{в}}$, м²·°С/Вт, и наружной $R_{\text{н}}$, м²·°С/Вт, поверхностях ограждения:**

$$R_{\text{в}} = 1/\alpha_{\text{в}}; \quad R_{\text{н}} = 1/\alpha_{\text{н}}. \quad (2.16)$$

2.1.6. Теплопередача через многослойную стенку

Если с одной стороны многослойной стенки, состоящей из n слоев, поддерживается температура $t_{\text{в}}$, а с другой стороны $t_{\text{н}} < t_{\text{в}}$, то возникает тепловой поток q , Вт/м² (рис. 6).

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

$$q = (1/R_{\text{с}})(t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}), \quad (2.17)$$

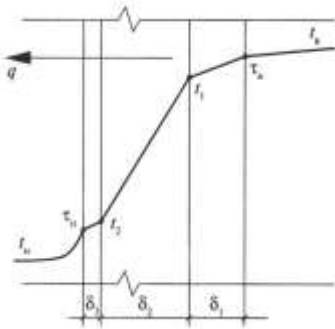


Рис.6. Распределение температуры при теплопередаче через многослойную стену

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

$$q = (1/R_{T,1}) \cdot (t_e - t_1), \quad (2.18)$$

после этого через все остальные слои

$$q = (1/R_{T,i}) \cdot (t_{i-1} - t_i), \quad (2.19)$$

и, наконец, от наружной поверхности с температурой t_n к наружной среде с температурой t_h :

$$q = (1/R_H) \cdot (t_h - t_n), \quad (2.20)$$

где $R_{T,i}$ – термическое сопротивление слоя с номером i , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

R_e , R_H – сопротивления теплообмену на внутренней и наружной поверхностях, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

t_{i-1} – температура, $^\circ\text{C}$, на стыке слоев с номерами $i-1$ и i ;

t_i – температура, $^\circ\text{C}$, на стыке слоев с номерами i и $i+1$.

Переписав (2.16) – (2.19) относительно разностей температуры и сложив их, получим равенство:

$$t_e - t_h = q \cdot (R_e + R_{T,1} + R_{T,2} + \dots + R_{T,i} + \dots + R_{T,n} + R_H) \quad (2.21)$$

Выражение в скобках – сумма термических сопротивлений плоскопараллельных последовательно расположенных по ходу теплового потока слоев ограждения и сопротивлений теплообмену на его поверхностях называется **общим сопротивлением теплопередаче ограждения** R_o , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$:

$$R_o = R_e + \sum R_{T,i} + R_H, \quad (2.22)$$

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

$$R_T = R_{T,1} + R_{T,2} + \dots + R_{e,n} + \dots + R_{T,n}, \quad (2.23)$$

где $R_{T,1}$, $R_{T,2}$, ..., $R_{T,n}$ – термические сопротивления отдельных плоскопараллельных последовательно расположенных по ходу теплового потока слоев слоев ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, определяемые по формуле (2.4);

$R_{e,n}$ – термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, по п. 2.1.4.

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 $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$, в то время как **термическое сопротивление многослойной конструкции** – разность температуры наружной и внутренней поверхностей ограждения, которая формирует проходящий через него тепловой поток плотностью $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$,

Из (2.22) следует, что тепловой поток q , $\text{Вт}/\text{м}^2$, проходящий через ограждение, пропорционален разности температуры сред по разные стороны ограждения $(t_e - t_h)$ и обратно пропорционален общему сопротивлению теплопередаче R_o

$$q = (1/R_o) \cdot (t_e - t_h), \quad (2.24)$$

2.1.7. Приведенное сопротивление теплопередаче

При выводе общего сопротивления теплопередаче рассматривалось плоско-параллельное ограждение. А поверхности большинства современных ограждающих конструкций не являются изотермическими, то есть температура на различных участках наружной и внутренней поверхностей конструкции не являются одинаковыми 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:

$$R_o^{np} = \frac{t_s - t_n}{\frac{Q}{A}} \quad (2.25)$$

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, то есть можно записать:

$$q^{np} = \frac{Q}{A} \quad (2.26)$$

Из (2.24) и (2.25) следует:

$$q^{np} = \frac{t_s - t_n}{R_o^{np}} \quad (2.27)$$

Ограждающие конструкции с применением эффективных теплоизоляционных материалов выполняются таким образом, что слой теплоизоляционного материала закрывает, насколько возможно, большую площадь конструкции. Сечения теплопроводных включений выполняют насколько возможно 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 (2.22). Отношение значения приведенного сопротивления теплопередаче конструкции к значению условного сопротивления теплопередаче рассмотренного участка называется **коэффициентом теплотехнической однородности**:

$$r = \frac{R_o^{np}}{R_o^{ycl}} \quad (2.28)$$

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.

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

$$K = \frac{1}{R_o^{np}}. \quad (2.29)$$

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:

$$q = K(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}). \quad (2.30)$$

2.1.8. Распределение температуры по сечению ограждения

Важной практической задачей является расчет распределения температуры по сечению ограждения (рис.7). Из дифференциального уравнения (2.1) следует, что оно линейно относительно сопротивления теплопередаче, поэтому можно записать температуру t_x в любом сечении ограждения:

$$t_x = t_{\text{в}} - \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{R_o} \cdot R_{x-\text{в}} = t_{\text{н}} + \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{R_o} \cdot R_{x-\text{н}}, \quad (2.31)$$

где $R_{x-\text{в}}$ и $R_{x-\text{н}}$ – сопротивления теплопередаче соответственно от внутреннего воздуха до точки x и от наружного воздуха до точки x , м²·°C/Вт.

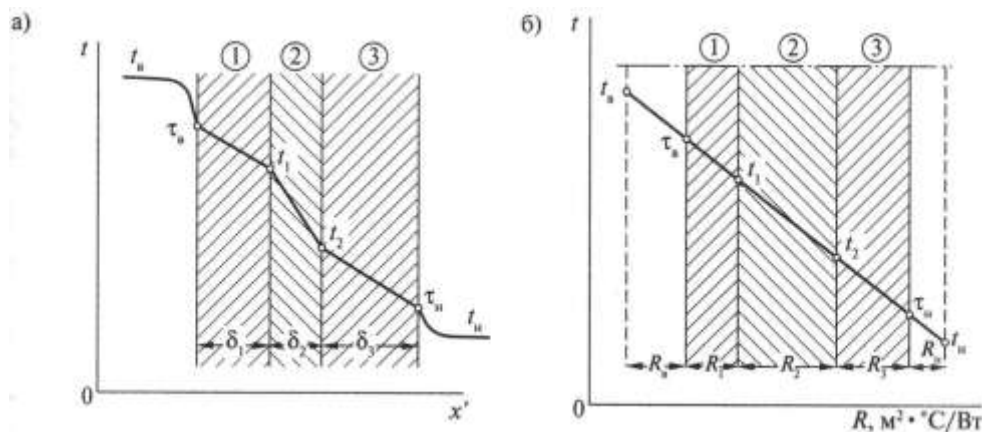


Рис. 7. распределение температуры в многослойной стенке. а) в масштабе толщин слоев, б) в масштабе термических сопротивлений

Однако выражение (2.30) относится к ограждению без возмущающих одномерность теплового потока. Для реального ограждения, характеризуемого приведенным сопротивлением теплопередаче при расчете распределения температуры по сечению ограждения надо учитывать уменьшение сопротивлений

теплопередаче $R_{x-в}$ и $R_{x-н}$ с помощью коэффициента теплотехнической однородности:

$$t_x = t_в - \frac{(t_в - t_n)}{R_o^{np}} \cdot R_{x-в} \cdot r = t_n + \frac{(t_в - t_n)}{R_o^{np}} \cdot R_{x-н} \cdot r. \quad (2.32)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое (физический смысл) коэффициент теплоотдачи на поверхности?
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 плоскпараллельными 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 $t_в$ к наружной с температурой t_n через многослойную стенку.
13. Начертите качественную картинку распределения температуры в двухслойной стенке при известных температурах окружающих сред $t_в$ и t_n , если $\lambda_1 > \lambda_2$.
14. Начертите качественную картинку распределения температуры в двухслойной стенке при известных температурах окружающих сред $t_в$ и t_n , если $\lambda_1 < \lambda_2$.
15. Напишите формулу для определения температуры внутренней поверхности двухслойной стенки в при известных температурах сред $t_в$ 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 в при известных температурах сред $t_в$ и t_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , коэффициентах теплопроводности λ_1 и λ_2 .
17. Напишите формулу для определения температуры между слоями двухслойной стенки t при известных температурах сред $t_в$ 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 $t_в$ и t_n , толщинах слоев, коэффициентах теплопроводности.

2.2. 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.

2.2.1. 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**, то есть 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 по высоте 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 уменьшить 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, исключающим понижение температуры, как на глади поверхности ограждения, так и в местах теплопроводных включений.

2.2.2. 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 теплотерь 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/м°C, 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/м°C, 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. Увлажнение строительных конструкций приводит к снижению их теплозащитных качеств, приводя к увеличению коэффициента теплопроводности влажного материала.

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.

2.2.3. Связь влаги со строительными материалами

По характеру своего взаимодействия с водой твердые тела делятся на **смачиваемые (гидрофильные)** и **несмачиваемые (гидрофобные)**. К гидрофильным строительным материалам относятся 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 [6]. 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-механической 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 прочностью обладает связь воды с микрокапиллярами.

2.2.4. 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**. С достаточной для технических расчетов точностью можно считать, что влажный воздух подчиняется всем законам смеси идеальных газов. Каждый газ, в том числе и пар, входящий в состав смеси, занимает тот же объем,

что и вся смесь. Пар находится под своим **парциальным давлением**, которое определяют по уравнению Клайперона:

$$e_i = \frac{M_i RT}{V \mu_i}, \quad (2.33)$$

где M_i – масса i -го газа, в данном случае водяного пара, кг;

R – универсальная газовая постоянная, равная 8 314,41 Дж/(кмоль·К);

T – температура смеси в абсолютной шкале, К;

V – объем, занимаемый смесью газов, м³;

μ_i – молекулярный вес газа, кг/моль. Для водяного пара $\mu_p = 18,01528$ кг/кмоль.

По закону Дальтона сумма парциальных давлений газовых компонентов смеси равна **полному давлению смеси**. Влажный воздух принято рассматривать как **бинарную смесь**, состоящую из **водяного пара и сухой части атмосферного воздуха**, эффективный молекулярный вес которого равен $\mu_v \approx 29$ кг/моль. **Барометрическое давление влажного воздуха** P_6 , Па, складывается из парциального давления сухого воздуха e_n , Па, и парциального давления пара e_p , Па:

$$P_6 = e_n + e_p. \quad (2.34)$$

Парциальное давление водяных паров называют также **упругостью водяного пара**.

Для характеристики меры увлажнения воздуха пользуются понятием **относительной влажности воздуха** φ_v , которая показывает степень насыщенности воздуха водяным паром в % или долях единицы полного насыщения при одинаковых температуре и давлении.

При относительной влажности 100% воздух полностью насыщен водяным паром и называется **насыщенным**. Парциальное давление насыщенного водяного пара называют также **давлением насыщения** воздуха водяным паром или **максимальной упругостью водяных паров** и обозначают E . Величина относительной влажности φ_v равна отношению парциального давления водяного пара e_n во влажном воздухе при определенных атмосферном давлении и температуре к давлению насыщения E при тех же условиях:

$$\varphi = \frac{e_n}{E}, \quad (2.35)$$

или φ , %

$$\varphi = \frac{e_n}{E} 100. \quad (2.36)$$

Парциальное давление насыщенного водяного пара – максимальная упругость водяных паров – при заданном барометрическом давлении является функцией только температуры t :

$$E = f(t). \quad (2.37)$$

Его значения определяют экспериментальным путем и приводят в специальных таблицах [2]. Кроме того, имеется ряд формул, аппроксимирующих зависимость E от температуры. Например, формулы, приводимые в [7]:

- над поверхностью льда при температуре от -60 °С до 0 °С

$$E = \exp \frac{18,74t - 115,72}{233,77 + 0,881t}, \quad (2.38)$$

- над поверхностью чистой воды при температуре от 0 °С до 83 °С

$$E = \exp \frac{16,57t - 115,72}{233,77 + 0,997t}, \quad (2.39)$$

Нормальным для пребывания человека гигиенистами считается диапазон относительной влажности от 30% до 60%. При относительной влажности воздуха выше 60% испарение влаги с кожи человека затруднено и его самочувствие ухудшается. При более низкой относительной влажности воздуха, чем 30% испарение с поверхности кожи и слизистых оболочек человека усиливается, что вызывает сухость кожи, першение в горле, способствующие простудным заболеваниям.

При повышении температуры воздуха заданной абсолютной влажности его относительная влажность понижается, так как в соответствии с формулой (2.36) величина парциального давления водяного пара останется без изменения, а давление насыщения возрастет из-за увеличения температуры. Наоборот, при охлаждении воздуха относительная влажность возрастет вследствие 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%, то есть 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_b 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.

2.2.5. 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. **Весовая влажность материала** ω_b , %, определяется отношением массы влаги, содержащейся в образце, к массе образца в сухом состоянии:

$$\omega_b = \frac{M_1 - M_2}{M_2} 100, \quad (2.40)$$

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:

$$\omega_o = \frac{V_1}{V_2} 100, \quad (2.41)$$

где V_1 – объем влаги в образце, м³,

V_2 – объем самого образца, м^3 .

Между весовой ω_v и объемной влажностью ω_o материала существует соотношение:

$$\omega_o = \frac{\omega_v \rho}{1000} 100, \quad (2.42)$$

где ρ – плотность материала в сухом состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В расчетах чаще используется весовая влажность.

2.2.6. 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 изотермы сорбции и десорбции водяного пара для пеносиликата. по [2]. Из рис.8 видно, что, например, для $\phi = 40\%$ при сорбции пеносиликат имеет весовую влажность $\omega_v = 1,75\%$, а при десорбции $\omega_v = 4\%$, следовательно, сорбционный гистерезис равен $4 - 1,75 = 3,25\%$.

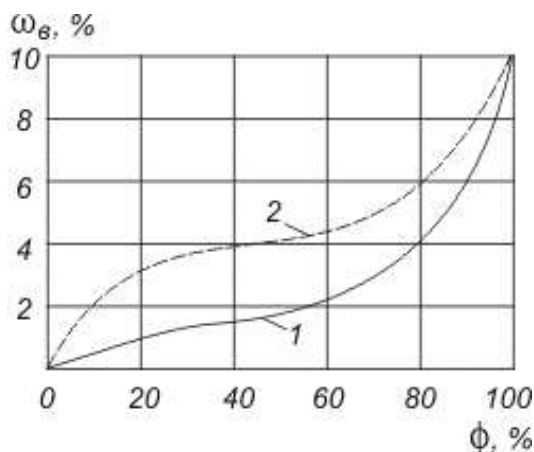


Рис. 8. Весовая влажность пеносиликата при сорбции (1) и десорбции (2)

Значения сорбционных влажностей строительных материалов приведены в различных литературных источниках, например, в [8].

2.2.7. Паропроницаемость ограждений

Исключение конденсации водяных паров 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. В климатических условиях России наиболее актуальна задача движения водяного пара в зимний период. Из экспериментальных исследований известно, что **потенциалом переноса пара** – его движущей силой – служит парциальное давление водяных паров в воздухе e . Внутри строительных материалов ограждения влажный воздух находится в порах материала. Пар перемещается от большего парциального давления к меньшему.

В холодный период года в помещении температура воздуха значительно выше, чем на улице. Более высокой температуре соответствует более высокое давление насыщения водяным паром E . Не смотря на то, что относительная влажность внутреннего воздуха меньше относительной влажности наружного, парциальное давление водяных паров во внутреннем воздухе e_e значительно превышает парциальное давление водяных паров в наружном воздухе e_n . Поэтому поток пара направлен из помещения наружу. Процесс проникновения пара 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**.

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

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. 3 представлены прямые аналоги в этих процессах.

Таблица 3

**Аналогия между процессами теплопередачи и влагопередачи
при диффузии пара**

<u>Тепловое поле</u>	<u>Влажностное поле</u>
Температура - внутреннего воздуха t_a, °C; - внутренней поверхности t_s, °C ; - на стыках слоев t_i, °C ; - наружной поверхности t_n, °C ; - наружного воздуха t_n, °C .	Парциальное давление водяных паров - во внутреннем воздухе e_a, Па; - на внутренней поверхности $e_{вп}$, Па; - на стыках слоев e_i, Па; - наружной поверхности $e_{нп}$, Па; - в наружном воздухе e_n, Па.
Теплопроводность материала λ, Вт/(м·°C)	Паропроницаемость материала μ, мг/(ч·м·Па)
Термическое сопротивление слоя толщиной δ, м, $R_T = \delta / \lambda$, м²·°C/Вт	Сопротивление паропроницанию слоя толщиной δ, м, $R_n = \delta / \mu$, м²·ч·Па /мг (2.43)
Коэффициенты теплоотдачи - на внутренней поверхности $\alpha_{в}$, Вт/(м²·°C); - на наружной поверхности $\alpha_{н}$, Вт/(м²·°C).	Коэффициенты влагоотдачи - на внутренней поверхности $\beta_{в}$, мг/(ч·м²·Па); - на наружной поверхности $\beta_{н}$, мг/(ч·м²·Па).
Сопротивление теплоотдаче на поверхностях ограждения - на внутренней $R_{в} = 1/\alpha_{в}$, м²·°C/Вт; - на наружной $R_{н} = 1/\alpha_{н}$, м²·°C/Вт;	Сопротивление влагоотдаче на поверхностях ограждения - на внутренней $R_{п.в} = 1/\beta_{в}$, м²·ч·Па/мг; (2.44) - на наружной $R_{п.н} = 1/\beta_{н}$, м²·ч·Па/мг. (2.45)

Общее сопротивление теплопередаче ограждения $R_0 = R_{\text{в}} + \sum \delta / \lambda + R_{\text{н}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	Общее сопротивление паропрооницанию ограждения $R_{0,\text{п}} = R_{\text{п.в}} + \sum \delta / \lambda + R_{\text{п.н}}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ (2.46)
Плотность теплового потока через ограждение $q = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) / R_0, \text{ Вт} / \text{м}^2$	Плотность диффузионного потока влаги через ограждение $g = (e_{\text{в}} - e_{\text{н}}) / R_{0,\text{п}}, \text{ мг} / (\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ (2.47)

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 м^2 площади, перпендикулярной потоку, при градиенте парциального давления водяного пара вдоль потока, равному 1 Па/м.

Расчетные значения μ приведены в справочных таблицах [4]. 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 $\rho = 50 \text{ кг/м}^3$ коэффициент паропроницаемости равен $\mu = 0,60 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{м} \cdot \text{Па})$. Материалам большей плотности соответствует меньшее значение коэффициента паропроницаемости, например, тяжелый бетон на плотных заполнителях имеет $\mu = 0,03 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{м} \cdot \text{Па})$. Вместе с тем бывают исключения. Экструдированный пенополистирол, утеплитель с закрытыми порами, при плотности $\rho = 25 - 45 \text{ кг/м}^3$ имеет $\mu = 0,003 - 0,018 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{м} \cdot \text{Па})$ и практически не пропускает через себя пар.

Материалы с минимальной паропроницаемостью используются в качестве **пароизоляционных слоев**. Для листовых материалов и тонких слоев **пароизоляции** ввиду очень малого значения μ в справочных таблицах [4] приводятся сопротивления паропрооницанию и толщины этих слоев.

Паропроницаемость воздуха равна $\mu = 0,0062 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ при отсутствии конвекции и $\mu = 0,01 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ при конвекции [2]. Поэтому в расчетах сопротивления паропрооницанию 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.

По своему физическому смыслу **сопротивление паропрооницанию слоя** ограждения – это разность упругостей водяного пара, которую нужно создать на поверхностях слоя, чтобы через 1 м^2 его площади диффундировал поток пара, равный 1 мг/ч.

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 (2.41).

Коэффициент теплоотдачи, как правило, в инженерных расчетах общего сопротивления паропрооницанию не применяется, в расчетах используют непосредственно сопротивления теплоотдаче на поверхностях, принимая их значения равными $R_{\text{п.в}} = 0,0267 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, $R_{\text{п.н}} = 0,0052 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$.

Упругость водяного пара, диффундирующего через ограждение, по мере прохождения через его толщу будет изменяться между значениями e_v и e_n . Для нахождения парциального давления водяного пара e_x в любом сечении ограждения (рис. 9) пользуются формулой, аналогичной формуле (2.30) для определения распределения температуры по сечению ограждения:

$$e_x = e_v - \frac{R_{п.в-x} \cdot x}{R_{о.п}} \cdot (e_v - e_n) = e_n + \frac{R_{п.н-x} \cdot x}{R_{о.п}} \cdot (e_v - e_n), \quad (2.48)$$

где $R_{п.в-x}$, $R_{п.н-x}$ – сопротивления паропропонианию, от точки x до соответственно внутреннего и наружного воздуха, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$.

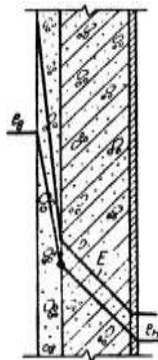


Рис. 9. Распределение парциального давления и давления насыщения водяных паров по сечению ограждения.

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 водяных паров 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 весовая влажность материала?
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 паропропониание?
21. Что такое паропроницаемость?
22. Чему количественно равна паропроницаемость материала μ ?
23. Что такое пароизоляция?
24. Физический смысл сопротивления паропропонианию слоя?
25. Что такое общее сопротивление паропропонианию ограждающей конструкции?

26. Напишите формулу общего сопротивления паропрооницанию ограждения.
27. Как определить парциальное давление водяных паров в воздухе при известных его температуре t_v и относительной влажности φ_v ?
28. Чем определяется давление насыщенных водяных паров?
29. Начертите качественную картинку распределения парциального давления водяных паров в двухслойной стенке при известных давлениях в окружающих средах e_v и e_n , если $\mu_1 > \mu_2$.
30. Начертите качественную картинку распределения парциального давления водяных паров в двухслойной стенке при известных давлениях в окружающих средах e_v и e_n , если $\mu_1 < \mu_2$.
31. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров на внутренней поверхности двухслойной стенки $e_{вн. пов}$ при известных давлениях в средах e_v и e_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , паропрооницаемостях μ_1 и μ_2 .
32. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров на наружной поверхности двухслойной стенки $e_{н. пов}$ при известных давлениях в средах e_v и e_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , паропрооницаемостях μ_1 и μ_2 .
33. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров между слоями двухслойной стенки e при известных давлениях в средах e_v и e_n , толщинах слоев δ_1 и δ_2 , паропрооницаемостях μ_1 и μ_2 .
34. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров e_x в любом сечении многослойной стенки при известных давлениях в средах e_v и e_n , толщинах слоев δ_i , паропрооницаемостях μ_i .

3. Защитные свойства наружных ограждений

3.1. Расчетные параметры наружной среды для теплотехнических расчетов

3.1.1. 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 [9] считается отрезок времени со среднесуточной температурой наружного воздуха, равной 8°C и ниже. По [1] 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 обычно 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" [9], где в алфавитном порядке расположены областные и краевые центры, все остальные пункты даны внутри области или края.

3.1.2. 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 температуры наружного воздуха, в 1946 году была предложена К.Ф.Фокиным [10]. 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 [11] 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:

$$K_{об} = (1 - m/n). \quad (3.1)$$

3.1.3. Средние температура и продолжительность отопительного периода

Для характеристики отопительного периода служат **средняя температура** $t_{о.п.}$, °С, и **продолжительность** $z_{о.п.}$, 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°С или 10°С, не учитываются. Эти данные приведены в СНиП 23-01-99* «Строительная климатология» [9].

Средняя температура $t_{о.п.}$ и продолжительность $z_{о.п.}$ 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 10). 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°С или 10°С. По разнице между этими датами определяется продолжительность отопительного периода.

3.1.4. 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 которого составляет 16% и более. В случае, когда средняя скорость ветра по румбу повторяемостью 12-15% превышает на 1 м/с и более наибольшую из

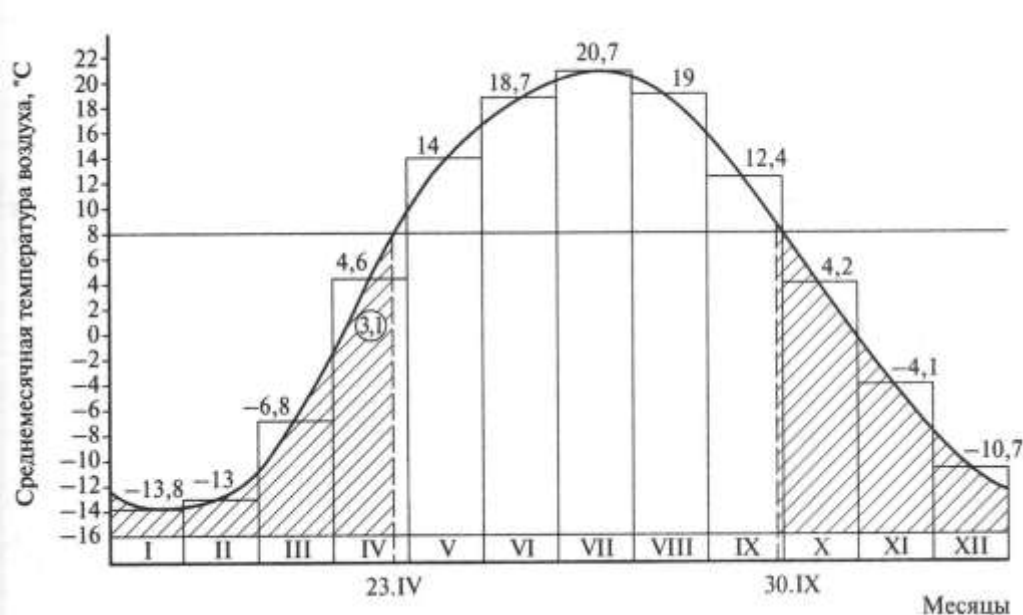


Рис. 10. Расчет продолжительности и средней температуры воздуха периода со среднесуточной температурой воздуха +8 °С: цифра в кружке – средняя температура воздуха за неполный месяц; 30.IX, 23.IV – даты начала и конца периода со среднесуточной температурой воздуха, равной и ниже +8 °С (отопительный период)

средних скоростей ветра по румбу повторяемостью 16%, максимальная скорость ветра принимается по румбу повторяемостью 12-15%.

Ветровой режим отопительного периода характеризуется средней скоростью $v_{0.п.}$, м/с, за этот период.

3.1.5. Влажностные условия района строительства

Для описания влажностных условий района строительства СНиП «Тепловая защита зданий» [1] выделяет три климатических зоны влажности: 1 – влажная, 2 – нормальная, 3 – сухая, которые обозначены на географической карте России. Она составлена В.М.Ильинским [12] 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.

3.2. Расчетные значения параметров внутреннего микроклимата

В ГОСТ 30494-96 [13] приведены расчетные значения параметров внутреннего микроклимата жилых и общественных зданий в оптимальных для пребывания человека и в допустимых 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 [1] 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% [1].

В зависимости от сочетания расчетной температуры и расчетной относительной влажности внутреннего воздуха, принимаемых для теплотехнических расчетов, внутренний режим по влажностным условиям делят [1] на сухой, нормальный, влажный и мокрый. Например, при температуре внутреннего воздуха от 12 °С до 24 °С, то есть 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 расчетной влажности для теплотехнических расчетов 67% в них поддерживается температура воздуха выше 24 °С.

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?

3.3. Требуемое сопротивление теплопередаче наружного ограждения

3.3.1 Показатели теплозащиты здания

СНиП [1] 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 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 [1]:

- 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.

3.3.2. 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 [1].

Сопротивления теплопередаче наружных ограждений, в соответствии с действующими нормами выбираются **по условиям необходимости энергосбережения** за отопительный период. Эти нормы, представленные в табл. 4 [1], отражают уровень второго этапа повышения требований к теплозащите, введенного с 2000 года Госстроем России. В таблице величины требуемых сопротивлений теплопередаче R_o^{mp} , 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:

$$D_d = (t_{\text{в}} - t_{\text{о.п.}}) \cdot Z_{\text{о.п.}}, \quad (3.2)$$

где $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха для основных помещений здания, °C, по п. 3.2;

$t_{\text{о.п.}}$, $Z_{\text{о.п.}}$ – средняя температура, °C, и продолжительность, сут, отопительного периода в районе строительства, принимаемые по [9] в соответствии с п. 3.1.3.

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^{mp} , 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:

$$R_o^{mp} = \frac{(t_{\text{в}} - t_n) \cdot n}{\Delta t_n \cdot \alpha_{\text{в}}}, \quad (3.3)$$

где n – коэффициент положения ограждения относительно наружного воздуха, уменьшающий разность температуры для ограждений, не

соприкасающихся с наружным воздухом. Значения коэффициента принимаются по [1];

t_e - расчетная температура внутреннего воздуха для теплотехнического расчета наружных ограждений для основных помещений зданий, °С,

t_n - расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °С, равная средней температуры наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92;

Δt_n - нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха t_n и температурой внутренней поверхности t_b ограждения. Значения нормируемого перепада Δt_n приведены в [1] в зависимости от функционального назначения здания и назначения ограждения;

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

В настоящее время формула (3.3) 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°С и ниже. Формула (3.2) определяет норму сопротивления теплопередаче внутренних ограждений здания, если разность температуры разделяемых помещений равна 6°С и более. При этом за температуру наружного t_n и внутреннего воздуха t_b принимаются расчетные значения температуры помещений, разделенных ограждением, а коэффициент n приравнивается к 1. Формула (3.2) определяет минимально допустимое сопротивление теплопередаче для ограждающих конструкций реконструируемых зданий, являющихся памятниками архитектуры, так как для сохранения архитектурного облика в таких зданиях нельзя делать утепление фасадов снаружи.

3.3.3. Понятие об экономически целесообразном сопротивлении теплопередаче ограждения

Постоянный 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:

$$P=K+T\cdot\dot{Q} \quad (3.4.)$$

Задача заключается в минимизации величины P 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 (3.4) и, приравняв нулю производную, найти искомую величину сопротивления теплопередаче.

Графической интерпретацией этого расчета может служить рис. 11.

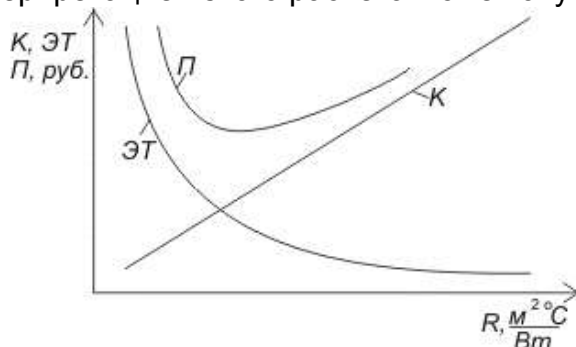


Рис. 11. К расчету приведенных затрат

3.4. Влияние влажности на теплозащитные качества наружного ограждения

3.4.1. Конструирование ограждающей конструкции с теплотехнической точки зрения

В общем случае ограждение состоит из конструктивного слоя, теплоизоляционного слоя и внутреннего и наружного фактурных слоев. Фактурные слои несут защитную функцию от непосредственного воздействия 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 конструктивного 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_b и парциальное давление водяных паров e_b внутреннего воздуха одинаковы для обоих ограждений.

Построим распределения температуры по сечению каждой стены (рис.12), и по полученным значениям температур определим давления насыщения E . Построим также линию изменения парциального давления водяных паров e по сечению стен. Из рис. 12 видно, что значения потенциала переноса влаги – парциального давления водяных паров – выше внутри помещения, чем снаружи, что говорит о потенциальном движении 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 рисунка 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.

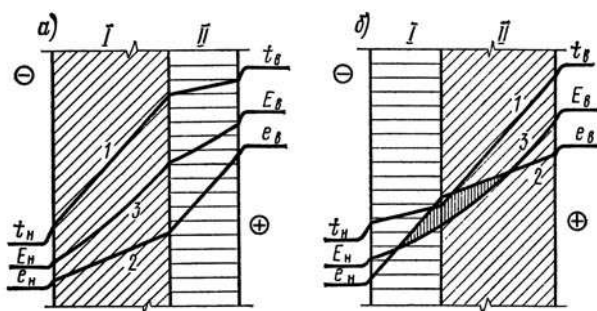


Рис.12. Кривые распределения температуры t (1), парциального давления водяных паров e (2) и давления насыщения E (3) по толщине двухслойного ограждения с наружной (а) и внутренней (б) теплоизоляцией (вертикальными линиями заштрихована область, где из построения E оказалось меньше e , что говорит о зоне возможной конденсации в толще заштрихованной области)

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.

3.4.2. Плоскость возможной конденсации.

Требуемые сопротивления паропрооницанию ограждения

Требуемые сопротивления паропрооницанию ограждения между внутренней средой и плоскостью возможной конденсации, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, выполняется в соответствии с [1]. **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 паропрооницанию нормируются исходя из:

- из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации по формуле:

$$R_{\text{нп}}^{\text{тп}} = \frac{(e_{\text{в}} - E) R_{\text{п,нар}}}{E - e_{\text{н}}} \text{ Па}, \quad (3.5.)$$

где: e_b – парциальное давление водяных паров в воздухе помещения, Па, по п. 5.1.3;

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

$$E = (E_1 \cdot z_1 + E_2 \cdot z_2 + E_3 \cdot z_3) / 12; \quad (3.6.)$$

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 °С;

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

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

$R_{п,нар}$ – сопротивление паропрооницанию, м²·чПа/мг, части ограждающей конструкции, расположенной между наружной средой и плоскостью возможной конденсации.

- из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха по формуле:

$$R_{П2}^{TP} = \frac{0,0024z_o(e_b - E_o)}{\rho_{ув} \delta_{ув} \Delta w_{ув} + 0,0024z_o(E_o - e_{H1}) / R_{П,нар}}, \quad (3.7.)$$

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

z_o – продолжительность, сут, периода влагонакопления, принимаемая равной периоду с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха по [9];

$\rho_{ув}$ – 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 [1]: e_{H1} – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, определяемое по [9].

3.4.3. 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. 3.2) с сухой зоной района строительства (по п. 3.1.5), 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 [4].

Рекомендуемые [СП] 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 [9]. 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. Из каких условий нормируются требуемые сопротивления паропрооницанию ограждающей конструкции в пределах от внутренней среды до плоскости возможной конденсации.
2. Где располагается плоскость возможной конденсации водяных паров в однослойной и многослойной стенке?
3. Какой период года считается периодом влагонакопления?
4. Какой слой в многослойной ограждающей конструкции предполагается увлажняемым?
5. Какие части года в расчете влажностного режима ограждения отнесены к зимнему, весенне-осеннему и летнему периодам?
6. Что такое предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, %, за период влагонакопления.
7. Какие две градации тепловлажностных условий эксплуатации зданий выделяются теплотехническими нормами?

3.5. Воздухопроницаемость наружных ограждений

3.5.1. Основные положения

Воздухопроницаемостью называется свойство строительных материалов и ограждающих конструкций пропускать сквозь себя поток воздуха, **воздухопроницаемостью** считают также расход воздуха в кг, который проходит через 1 м² ограждения за час G, кг/(м²·ч).

Воздухопроницанием через ограждения 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 [14], еще два вида фильтрации – **продольная и внутренняя**.

Вообще говоря, воздухопроницаемостью обладают все наружные ограждения, но в расчете теплотерь обычно учитывается только инфильтрация

через окна, балконные двери и витражи. Нормы плотности остальных ограждений исключают возможность сквозной воздухопроницаемости, ощутимо влияющей на тепловой баланс помещения.

Однако, у современных наружных стен в слоях из минеральной ваты, пенополистирола или других вспененных материалов может наблюдаться продольная фильтрация [15], которая местно снижает приведенное сопротивление этих конструкций за счет выноса фильтрующимся воздухом теплоты в атмосферу.

Инфильтрация и эксфильтрация и, вообще, любая фильтрация воздуха возникают под воздействием **перепадов полных давлений воздуха** ΔP , Па, с разных сторон ограждения. Разность давлений воздуха изнутри здания и снаружи 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**.

3.5.2. Разность давлений на наружной и внутренней поверхности ограждений

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

$$P_{грав} = P_{атм} - \rho_n gh \quad (3.9.)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление на уровне условного ноля 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* [16]. Коэффициент $k_{дин}$, учитывающий изменение ветрового давления по высоте h , там представлен в зависимости от типа местности. 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

$$P_{ветр} = \frac{\rho_n v^2}{2} c k_{дин} \quad (3.10)$$

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 [16].

В соответствии со СНиП 2.01.07-85* [16] для большинства зданий величина аэродинамического коэффициента на наветренной стороне равна $c_n=0,8$, а на подветренной – $c_z = -0,6$.

Так как гравитационное и ветровое давления независимы друг от друга, для нахождения полного давления наружного воздуха $P_{нар}$ на здание, их складывают:

$$P_{нар} = P_{грав} + P_{ветр} = P_{атм} - \rho_n g h + \frac{\rho_n v^2}{2} c k_{дин} \quad (3.11)$$

За условный ноль давления $P_{усл}$, Па, по предложению В.П.Титова [17] принимается абсолютное давление на подветренной стороне здания на уровне наиболее удаленного от поверхности земли элемента здания, через который возможно движение воздуха (верхнее окно подветренного фасада, вытяжную шахту на кровле).

$$P_{усл} = P_{атм} - \rho_n g h + \frac{\rho_n v^2}{2} c_z k_{дин}, \quad (3.12)$$

где c_z - аэродинамический коэффициент, соответствующий подветренной стороне здания;

H - высота здания или высота над землей верхнего элемента, через который возможно движение воздуха, м.

Тогда полное избыточное давление P_n , Па, формирующееся в наружном воздухе в точке на высоте h здания, определяется по формуле:

$$P_n = P_{нар} - P_{усл} = \rho_n g (H - h) + \frac{\rho_n v^2}{2} (c - c_z) k_{дин} \quad (3.13)$$

В каждом помещении создается свое полное избыточное внутреннее давление, которое складывается из давления, сформированного различным давлением на фасадах здания P_v , Па, и гравитационного давления $P_{грав,в}$, Па. Так как в здании температура воздуха всех помещений приблизительно одинакова, внутреннее гравитационное давление зависит только от высоты центра помещения h :

$$P_{грав,в} = \rho_v g (H - h) \quad (3.14)$$

где ρ_v – плотность внутреннего воздуха, кг/м³.

Для простоты расчетов внутреннее гравитационное давление принято относить к наружному давлению со знаком минус

$$\begin{aligned} P_n &= \rho_n g (H - h) + \frac{\rho_n v^2}{2} (c - c_z) k_{дин} - \rho_v g (H - h) = \\ &= g (H - h) (\rho_n - \rho_v) + \frac{\rho_n v^2}{2} (c - c_z) k_{дин} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Этим за пределы здания выносятся переменная гравитационная составляющая, и поэтому полное давление в каждом помещении становится постоянным по его высоте.

Плотность воздуха ρ , кг/м³, может быть определена по эмпирической формуле:

$$\rho = \frac{353}{273 + t}, \quad (3.16)$$

где t – температура воздуха.

Величина внутреннего давления P_v может быть различной для одинаково ориентированных помещений одного этажа в силу того, что для каждого помещения формируется свое значение внутреннего давления. Определение внутренних давлений в помещениях является задачей полного расчета воздушного режима здания, который довольно трудоемок. Но для упрощения расчета внутреннее давление P_v принято приравнять 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 гравитационного давления по выражению

$$P_v = \frac{H}{2}(\rho_n - \rho_v)g + \frac{\rho_n v^2}{2} \cdot \frac{(c - c_3)k_{\text{дин}}}{2} \quad (3.17)$$

Второй, более громоздкий способ расчета величины P_v , Па, 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:

$$P_v = \frac{H}{2}(\rho_n - \rho_v)g + \frac{\rho_n v^2}{2} \cdot k_{\text{дин}} \left[\frac{c_n - c_3}{2} A_n + \frac{c_b - c_3}{2} A_b \right] / (A_n + A_b + A_3), \quad (3.18)$$

где c_n , c_b , c_3 - аэродинамические коэффициенты на наветренном, боковом и подветренном фасадах;

A_n , A_b , A_3 - площади окон и витражей на наветренном, боковых и подветренном фасадах, м^2 .

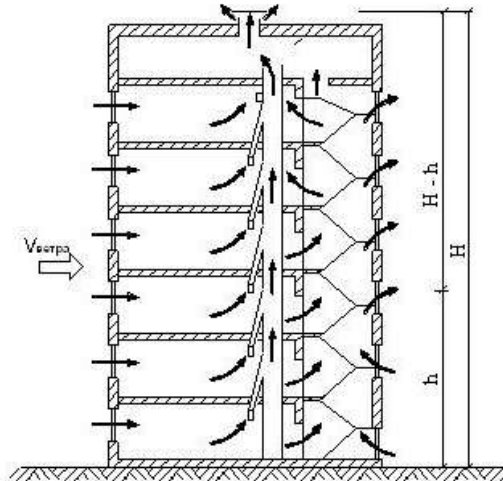


Рис. 13. Формирование воздушных потоков в многоэтажном здании со сбалансированной механической вентиляцией

В расчетах теплотерь учитывается, что каждый фасад может быть наветренным. Следует обратить внимание на то, что величина внутреннего давления P_v , принимаемая по (10), 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_v , приближается к получаемой по (9). Таким образом, использование формулы (10) 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 или 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 (3.15) равна:

$$\Delta P = (H - h)(\rho_n - \rho_e)g + \frac{\rho_n v^2}{2} \cdot (c - c_3)k_{\text{дин}} - P_e \quad (3.19)$$

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. 13 показана картина распределения потоков в здании со сбалансированной вентиляцией

3.5.3. 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. 14 показана качественная картина зависимости воздухопроницаемости G от разности давлений ΔP для строительных материалов, приведенная К.Ф.Фокиным [2].

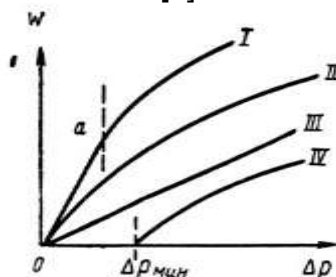


Рис.14: Влияние пористости материала на его воздухопроницаемость 1 – материалы с равномерной пористостью (типа пенобетона); 2 – материалы с порами различных размеров (типа засыпок); 3 – маловоздухопроницаемые материалы (типа древесины, цементных растворов), 4 – влажные материалы.

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. 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 $\Delta P_{\text{мин}}$, 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 $\Delta P_{\text{мин}}$.

При ламинарном движении воздуха в порах материала справедлива зависимость

$$G = i \frac{\Delta P}{\delta}, \quad (3.20)$$

где 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 (12) следует заменить ΔP на ΔP^n . При этом показатель степени n изменяется в пределах 0,5 – 1. Однако на практике формула (3.20) применяется и для турбулентного режима течения воздуха в порах материала.

3.5.4. Фильтрация воздуха через ограждения

Следует иметь в виду влияние на воздухопроницаемость конструкции, имеющиеся в ней какие-либо включения. Например, в кладке из кирпича или ячеистобетонных блоков необходимо оценивать воздухопроницаемость швов, а в дощатой обшивке, воздухопроницаемость щелей между отдельными досками. Кроме того экспериментально доказано

В [4] приведены значения **сопротивления воздухопроницанию** для слоев некоторых материалов и конструкций.

Фильтрация холодного наружного воздуха в ограждение вызывает увеличение потерь теплоты и снижение температуры в толще ограждения за счет того, что часть тепла, проходящего 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:

$$\frac{d^2 t}{dR^2} - Gc \frac{dt}{dR} = 0, \quad (3.21)$$

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

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

R – термическое сопротивление

3.5.5. Требуемое сопротивление воздухопроницанию окон, балконных дверей, витражей и световых фонарей жилых, общественных и производственных зданий в соответствии с [2] должно быть не менее **нормируемого сопротивления воздухопроницанию** $R_{\text{инф}}^{\text{тр}}$, м²·ч/кг:

$$R_{\text{инф}}^{\text{тр}} = \frac{1}{G_n} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{2/3} \quad (3.22)$$

где

G_n – нормируемая воздухопроницаемость ограждающих конструкций, кг/(м²·ч);

ΔP_0 – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях светопрозрачных ограждений, при которой определяется сопротивление воздухопроницанию, $\Delta P_0 = 10$ 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 [1]. 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 [1] заложена преобразованная формула (3.19). 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 (3.17) в (3.19) при условии, что h , расчетная высота, м, от уровня земли до центра рассматриваемого окна, близка к 0. Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (H-h) \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g + (\rho_n \cdot v^2 / 2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3) - P_v \approx \\ &\approx H \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g + (\rho_n \cdot v^2 / 2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3) - 0,5 \cdot H \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g - 0,5 \cdot (\rho_n \cdot v^2 / 2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3) = \\ &= 0,5 \cdot H \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g + 0,25 \cdot (\rho_n \cdot v^2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3) \end{aligned}$$

В [2], 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 $(c_n - c_3) \cdot K_{\text{дин}}$ приближается к 1, в-третьих, величину ρ_{ext} заменили на γ_{ext}/g , и, в-четвертых, для некоторого запаса коэффициенты увеличили, и формула для расчета разности давлений при определении требуемого сопротивления воздухопроницанию приняла вид:

$$\Delta P = 0,55 \cdot H \cdot (\gamma_n - \gamma_v) + 0,03 \gamma_n v^2, \quad (3.23)$$

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, $\text{Н}/\text{м}^3$, $\gamma_n = \rho_n \cdot g$; $\gamma_v = \rho_v \cdot g$.

Объемный вес воздуха γ можно определить по эмпирической формуле

$$\gamma = (3463) / (273 + t), \quad (3.24)$$

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 .

Требуемое сопротивление воздухопроницанию окон в своей размерности не содержит размерности потенциала переноса воздуха – давления. Такое положение возникло из-за того, что в формуле (3.22) делением фактической разности давлений ΔP на нормативное значение давлений $\Delta P_0 = 10 \text{ Па}$, требуемое сопротивление воздухопроницанию приводится к разности давлений $\Delta P_0 = 10 \text{ Па}$. На рис. 15 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 $v = 4,9 \text{ м/с}$.

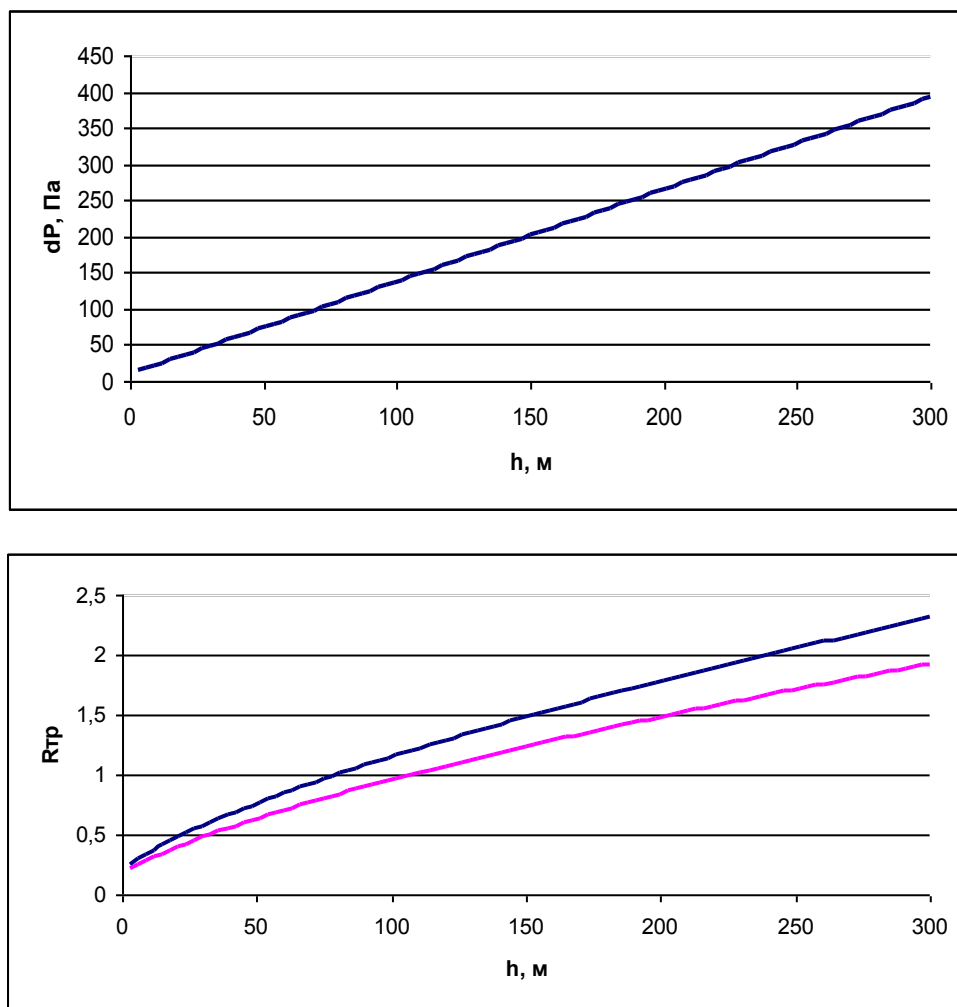


Рис.15. Зависимость характеристик воздухопроницания заполнения светопроемов от высоты здания на примере г. Москвы а) расчетные разности давлений ΔP , Па, по разные стороны окна; б) требуемые сопротивления воздухопроницанию $R_{инф}^{req}$, $m^2 \cdot ч/кг$ при $\Delta P = 10$ Па: верхняя кривая для окон в пластиковых или металлических переплетах, нижняя кривая для окон в деревянных переплетах.

3.5.6. 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 $R_{инф}$, $m^2 \cdot ч/кг$ при $\Delta P = 10$ Па, должна по сертификату на заполнение проема быть больше $R_{инф}^{тр}$.

По показателям воздухопроницаемости ГОСТ 23166-99 [18] 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. 25 максимально допустимые воздухопроницаемости для выделенных классов по [18] пересчитаны в массовые воздухопроницаемости при $\Delta P = 10$ Па по СНиП [2], а также в соответствующие им сопротивления воздухопроницанию при разности давлений $\Delta P = 10$ Па.

Таблица 4

Классификация заполнений световых проемов по воздухопроницаемости

Клас	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, $\text{м}^2\cdot\text{ч}/\text{кг}$ 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

3.5.7. 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 , $\text{кг}/\text{ч}$, 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 теплопотерям 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 (3.19) 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 (3.17). Тогда разность давлений по разные стороны воздухопроницаемого элемента здания принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (H-h) \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g + (\rho_n \cdot v^2 / 2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3) - P_v \approx \\ &= (H-h) \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g + (\rho_{\text{ext}} \cdot v^2 / 2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3) - 0,5 \cdot H \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g - 0,5 \cdot (\rho_n \cdot v^2 / 2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3) = \\ &= 0,5H \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g - h \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g + 0,25(\rho_n \cdot v^2 / 2) \cdot K_{\text{дин}} \cdot (c_n - c_3), \end{aligned} \quad (3.25)$$

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, $\text{кг}/\text{м}^3$, наружного и внутреннего воздуха, определяемые по формуле (3.16);

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

$K_{\text{дин}}$ – коэффициент, с помощью которого учитывают изменение динамических свойств ветра в застройке в зависимости от высоты h , принимается по [16].;

c_n, c_z – аэродинамические коэффициенты на наветренном и подветренном фасадах, принимаемые в соответствии с п. 3.5.2.

Из формулы (3.25) 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 $G_{\text{инф}}$, кг/(ч·м²), при этой разности давлений составит:

- через окна

$$G_{\text{инф}} = (1/R_{\text{инф,ок}}^{\text{тр}}) \cdot (\Delta P / \Delta P_0)^{2/3}, \quad (3.26)$$

- через двери и ворота

$$G_{\text{инф}} = (1/R_{\text{инф,дв}}^{\text{тр}}) \cdot (\Delta P / \Delta P_0)^{1/2}, \quad (3.27)$$

где

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

$R_{\text{инф,дв}}^{\text{тр}}$ – 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 $Q_{\text{инф}}$, Вт, определяется по формуле:

$$Q_{\text{инф}} = 0,28 \cdot G_{\text{инф}} \cdot c \cdot A \cdot (t_v - t_n) \cdot k, \quad (3.28)$$

где

c – теплоемкость воздуха, $c = 1,006$ кДж/(кг·°С);

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, 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. 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 существует, по терминологии Р.Е.Брилинга?
8. Что является потенциалом воздухопроницания?
9. Какие две природы формируют разность давлений на противоположных сторонах ограждения?
10. Что такое коэффициент воздухопроницаемости материала?
11. Что такое нормативная воздухопроницаемость ограждения G^H ?
12. Что такое нормируемое сопротивление воздухопроницанию?

13. Напишите формулу расчета требуемого сопротивления воздухопроницанию $R_{\text{инф}}^{\text{тр}}$ окна.
14. Напишите формулу для определения фактической воздухопроницаемости окна.
15. Напишите формулу расчета разности давлений по обе стороны окна при выборе его уплотнения.
16. От чего зависит фактическая воздухопроницаемость окна?
17. Почему через окна разных этажей инфильтрация различна?
18. Напишите формулу расчета разности давлений по обе стороны окна при определении инфильтрации в здании со сбалансированной вентиляцией.
19. Что определяет внутреннее давление в здании со сбалансированной вентиляции?
20. Напишите формулу расчета разности давлений по обе стороны окна при определении инфильтрации в здании с естественной вытяжной вентиляцией и неорганизованным притоком.
21. Что определяет внутреннее давление в здании с естественной вытяжной вентиляцией и неорганизованным притоком.
22. От чего зависит гравитационная часть разности давлений по обе стороны окна?
23. От чего зависит ветровая часть разности давлений по обе стороны окна?
24. Физический смысл аэродинамических коэффициентов c_n и c_z здания при определении ветрового давления.
25. Физический смысл коэффициента $K_{\text{дин}}$ при определении ветрового давления.

4. Стационарная теплопередача через сложное наружное ограждение

4.1. 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.16). То есть, наличие углов, которые образуют наружные стены, примыкание перекрытий и перегородок к ним, нарушение гладкости 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.

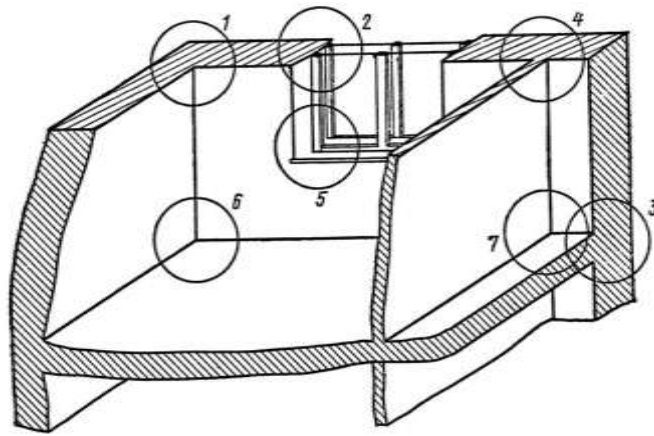


Рис. 16. Элементы формирования двумерных (1, 2, 3, 4) и трехмерных (5, 6, 7) температурных полей в наружных ограждениях здания

При рассмотрении конструкции с двумерным температурным полем 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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial t}{\partial y} \right] = 0, \quad (4.1)$$

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

Решение этого уравнения для различных условий может выполняться различными методами. **Аналитические методы** применимы только для простейших случаев, но они бывают полезны, так как позволяют приближенно рассчитать температурное поле и определить наиболее значимые факторы, влияющие на процесс теплопередачи. **Численные сеточные методы**, обычно реализуемые 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**, связанные во-первых, с экспертной оценкой процесса, а во-вторых, основанные на обобщении результатов подробных и трудоемких расчетов. **Методы физической аналогии**. Наиболее реально в настоящее время применить метод электротепловой аналогии.

4.2. Метод конечных разностей

Как сказано выше, метод конечных разностей относится к методам сеток. Сущность метода сеток [19] состоит в замене температурного поля с распределенными параметрами полем с сосредоточенными параметрами, путем разбивки области двумерного сечения конструкции на элементарные площадки (рис.17 а и б), центры которых соединяют сосредоточенными термическими сопротивлениями. Уравнение стационарной двумерной теплопроводности в случае однородного материала для такой сетки записывают в конечных разностях:

$$\frac{\Delta_x^2 t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta_y^2 t}{\Delta y^2} = 0. \quad (4..2)$$

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

$$\Delta_x^2 t = (t_1 - t_0) - (t_0 - t_2) = t_1 + t_2 - 2t_0;$$

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

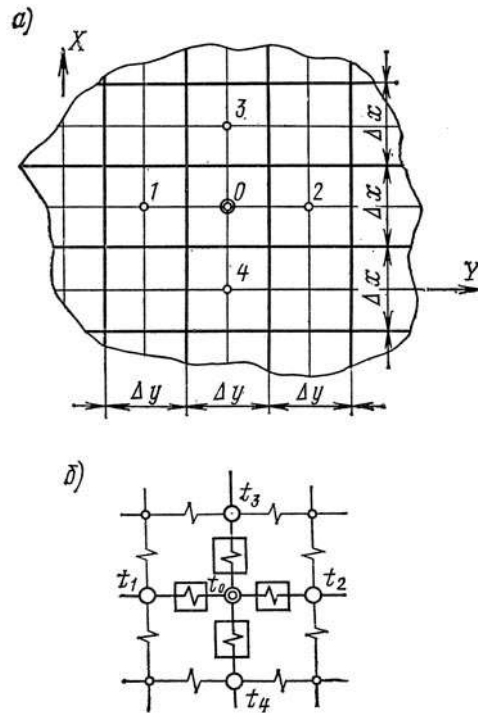


Рис. 17. Сетка, разбивающая непрерывное температурное поле на элементарные площадки (а) и схема термических сопротивлений, связывающая сосредоточенные центры блоков (б)

Решение уравнения (4.2) относительно температуры в произвольном узле сетки t_0 (рис. 17), если шаг сетки Δx в направлении x и Δy в направлении y одинаковый, может быть получено в виде.

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}. \quad (4.3)$$

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

$$t_0 = \frac{k_{0-1}t_1 + k_{0-2}t_2 + k_{0-3}t_3 + k_{0-4}t_4}{k_{0-1} + k_{0-2} + k_{0-3} + k_{0-4}}, \quad (4.4)$$

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. 18 и 19)

Из уравнения 4.4. 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. 18) и в узлах на стыках материальных слоев (рис.19).

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

$$R=l/(\lambda F), \quad (4.5)$$

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

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

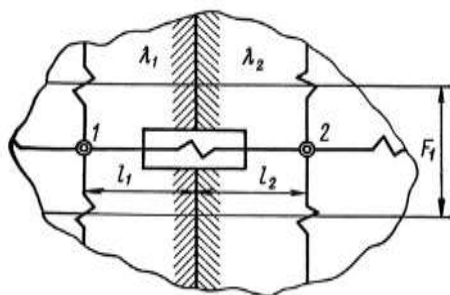


Рис. 18. К определению проводимостей проводимостей
теплоты между центрами элементарных
средой
площадок для неоднородного поля

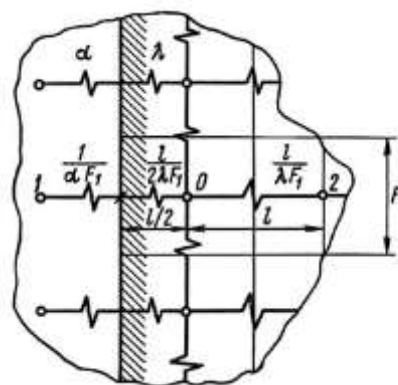


Рис. 19 К определению
теплоты на границе тела со

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

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

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

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

$$R=l/(\alpha F), \quad (4.6)$$

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

F – длина элемента, м.

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

$$R_{0-1} = \frac{1}{\alpha F_1} + \frac{l}{2\lambda F_1} = \frac{1}{\alpha \Delta y} + \frac{\Delta x}{2\lambda \Delta y}. \quad (4.7)$$

$$R_{0-2} = \frac{l}{\lambda F_1} = \frac{\Delta x}{\lambda \Delta y}. \quad (4.8)$$

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.

4.3. Приближенные инженерные методы

4.3.1. Коэффициент теплотехнической однородности

Уже упоминавшийся в п. 2.1.7 **коэффициент теплотехнической однородности g** является оценкой влияния различных случаев нарушения одномерности теплового потока сквозь наружное ограждение. Это могут быть регулярные внутренние связи, притягивающие 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, на сколько близко выполненный расчет отражает расчетный 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.

4.3.2. 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:

$$R = \frac{A}{\sum_{i=1}^I (A_i / R_i)}, \quad (4.9)$$

где A_i, R_i – соответственно площадь, м^2 , и термическое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$, i – го параллельного участка в выделенном регулярном элементе;

A – общая площадь регулярного элемента конструкции, равная сумме площадей всех параллельных участков, м^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 (2.23), в которой термическое сопротивление каждого слоя рассчитывается по (2.4).

2. Плоскостями, перпендикулярными тепловому 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 (2.4). Другие слои могут состоять из двух или более параллельных участков. Эквивалентное термическое сопротивление таких слоев находится по формуле (4.9). Термическое сопротивление конструкции рассчитывается по формуле (2.23).

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

$$R = \frac{R_{||} + 2R_{\perp}}{3}. \quad (4.10)$$

Если величина $R_{||}$ превышает величину $R_{\perp}$ более чем на 25% или ограждение не является плоским (имеет выступы на поверхности), то эквивалентное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции следует определять подробным расчетом двумерного или трехмерного температурного поля.

4.3.3. Фактор формы

Еще одним методом инженерного расчета приведенного сопротивления теплопередаче, основанного на обобщении результатов подробных прямых расчетов трехмерного температурного поля, является метод **фактора формы**. 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 равна:

$$a_f = 2 \lambda R. \quad (4.11)$$

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 ограждения. 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:

$$Q_{н.с} = \frac{A}{R_{o,пр}} (t_{в} - t_{н}), \quad (4.12)$$

где A – площадь стены, m^2 ;

$t_{в}$, $t_{н}$ – температура соответственно внутреннего и наружного воздуха, $^\circ C$.

Площадь A_f , на которой проявляется двумерное температурное поле, то есть 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 площади равно R_o , $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, то теплопотери через стену с учетом всех примыканий будут равны

$$Q_{н.с} = \frac{A}{R_o} (t_{в} - t_{н}) + \sum_{i=1}^I (f_i - 1) \frac{a_f \cdot l_i}{R_o} (t_{в} - t_{н}). \quad (4.13)$$

Так как выражения (4.12) и (4.13) можно приравнять друг другу, то из этого равенства найдется выражение для приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции:

$$R_{o,пр} = R_o \frac{1}{1 + \frac{1}{A} \sum_{i=1}^I (f_i - 1) a_f \cdot l_i}. \quad (4.14)$$

Таким образом, вывод формулы (4.14) через фактор формы полностью согласуется с определением приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, данным в п. 2.1.7.

4.4. 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, подтверждающейся одинаковым

математическим описанием обоих процессов дифференциальными уравнениями [19], которые для однородных конструкций записываются следующем виде:

- в тепловом поле
$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0;$$

- в электрическом поле
$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0,$$

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. 5.

Таблица 5

Прямые аналоги в тепловом и электрическом полях

<u>Тепловое поле</u>	<u>Электрическое поле</u>
Температура, потенциал переноса тепло-ты, $t, ^\circ\text{C}$	Напряжение, электрический потенциал U , В .
Количество теплоты, Q , Дж	Количество электричества, Кул
Теплопроводность материала λ , Вт/(м $^\circ\text{C}$) = Дж/(с·м $^\circ\text{C}$)	Электрическая проводимость $1/\rho$, Кул/(с·м·В), где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.
Термическое сопротивление однородного ограждения площадью A , м 2 , и толщиной Δ_T , м, $R_T = \Delta_T / (A \cdot \lambda)$, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Электрическое сопротивление проводника сечением S , м 2 , и длиной Δ_3 , м, $R_3 = \Delta_3 \cdot \rho / S$, Ом
Тепловой поток, $q = \Delta t / R_T$, Дж/с=Вт	Сила электрического тока $I = \Delta U / R_3$, А

Часто приходится решать задачи теплопередачи, а не только теплопроводности. Но в электрическом поле нет аналогов коэффициентам теплоотдачи на внутренней α_v , Вт/(м $^2\cdot^\circ\text{C}$), и на наружной α_n , Вт/(м $^2\cdot^\circ\text{C}$), 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 [19]. 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. 20 слева изображено сечение глади 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.20 слева рассмотрено однородное ограждение с

одномерным распределением температуры. Изотермы в сечении такой стены горизонтальны. Справа представлена электроаналогия - геометрический аналог той же стены.

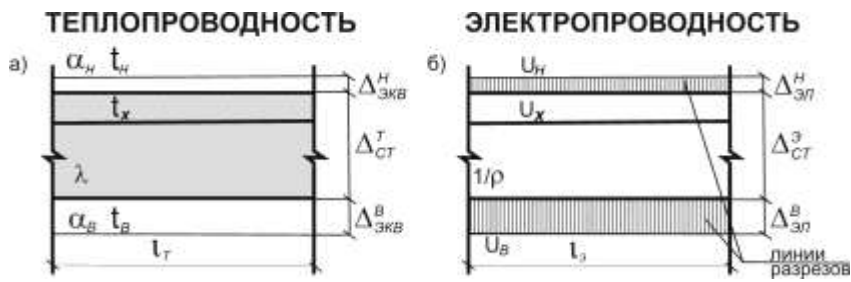


Рис. 20. Электротепловая аналогия: а) сечение наружной стены; б) электроаналогия стены

В модели толщине стены $\Delta_{ст}^T$, м, 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 теплоотдачи $\Delta_{экв}^B$, м, и $\Delta_{экв}^H$, м. Толщины эквивалентных слоев на внутренней и наружной поверхностях стены, м, равны:

$$\Delta_{экв}^B = \frac{\lambda}{\alpha_v}, \quad \Delta_{экв}^H = \frac{\lambda}{\alpha_n}, \quad (4.15)$$

где

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

α_v, α_n – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, Вт/(м²·К);

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. 1б.

Если на поверхности эквивалентных слоев ограждения заданы значения температуры внутреннего t_v и наружного t_n воздуха, то распределение температуры по сечению ограждения в общем случае определяется величинами $1/\lambda, \Delta_{экв}^B, \Delta_{ст}^T, \Delta_{экв}^H, l_T$. Аналогичное распределению температуры в сечении стены распределение электрического потенциала на электроаналогии зависит от значений $\rho, \Delta_{эл}^B, \Delta_{ст}^э, \Delta_{эл}^H, l_э$,

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:

$$m_t = \frac{t_v - t_n}{U_v - U_n}, \quad (4.16)$$

- масштаб длин:

$$m_l = \frac{l_T}{l_\Theta} = \frac{\Delta_{cm}^T}{\Delta_{cm}^\Theta} = \frac{\Delta_{экв}^B}{\Delta_{эл}^B} = \frac{\Delta_{экв}^H}{\Delta_{эл}^H}. \quad (4.17)$$

- масштаб сопротивлений:

$$m_{\frac{1}{\lambda}} = \frac{1}{\rho}. \quad (4.18)$$

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 в лабораторной работе №1?
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?

5. Нестационарный тепловой режим ограждения и помещения

5.1. Основное дифференциальное уравнение теплопроводности

В естественных условиях режим теплопередачи через ограждения всегда является **нестационарным**, то есть 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:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (5.1)$$

где z – время.

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

$$\Delta_z t = \frac{\Delta z}{c\rho} \lambda \frac{\Delta_x^2 t}{\Delta x^2}. \quad (5.2)$$

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

$$Fo_{\Delta} = \frac{\Delta z}{c\rho \Delta x} \cdot \frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{\Delta z \cdot a}{\Delta x^2}, \quad (5.3)$$

уравнение примет вид

$$\Delta_z t = Fo_{\Delta} \cdot \Delta_x^2 t. \quad (5.4)$$

5.2. 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** – электро-тепловой, тепло-гидравлической; требуют специального оборудования;
- **численные методы** решения на ЭВМ. Одним из таких методов является **метод конечных разностей**.

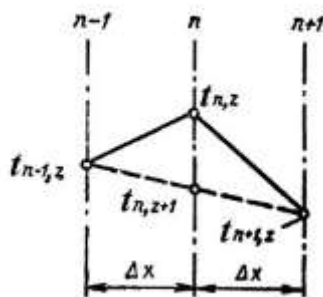


Рис. 21.

Рассмотрим явную схему конечно-разностного решения. Разобьем стену на элементарные отрезки Δx . (рис.21). 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 (5.4), получим:

$$t_{n,z+1} = t_{n,z} + Fo_{\Delta} (t_{n-1,z} + t_{n+1,z} - 2t_{n,z}). \quad (5.5)$$

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

$$t_{n,z+1} = \frac{t_{n-1,z} + t_{n+1,z}}{2}. \quad (5.6)$$

Написав уравнения (5.6) 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.

5.3. 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 [20], Г.А.Селиверстов [21], Е.Г.Швидковский [22], С.И.Муромов [23], А.М.Шкловер [24], Л.А.Семенов [25].

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 гармонике 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.

5.3.1. Коэффициент теплоусвоения материала.

Если представить себе полуограниченный 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 :

$$s = \frac{A_Q}{A_T}. \quad (5.7)$$

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·°С). Величина коэффициента теплоусвоения зависит от его теплофизических свойств и периода T , с которым происходят колебания воздействующего теплового потока:

$$s = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\rho}{T}}. \quad (5.8)$$

Значения большого числа строительных материалов приведено в [4] для суточного периода колебаний. При суточном периоде коэффициент теплоусвоения материала равен $s = 0,00852\sqrt{\lambda c\rho}$ Вт/(м²·°С). Формула (5.8) 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 (5.7) получим, что $A_T=0$, то есть колебания температуры на внутренней поверхности полуограниченного массива будут отсутствовать, что относится к стационарному режиму.

5.3.2. 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, другими словами, 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:

$$D = R \cdot s. \quad (4.27)$$

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

$$D = \sum_{i=1}^I R_i \cdot s_i. \quad (5.9)$$

Показатель тепловой инерции D является безразмерной величиной. С уменьшением периода колебаний теплового потока увеличивается 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. $D_{p.k.} = R_{p.k.} \cdot s = 1$, где $R_{p.k.}$ - термическое сопротивление слоя резких колебаний. Толщина δ слоя резких колебаний равна:

$$\delta = \frac{\lambda}{s}. \quad (5.10)$$

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

5.3.3. Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения

Отношение амплитуды колебания теплового потока A_Q , действующего на внутреннюю поверхность ограждения, к амплитуде колебаний температуры на этой поверхности A_t называется **коэффициентом теплоусвоения внутренней поверхности ограждения**:

$$Y_{в.п} = \frac{A_Q}{A_t}. \quad (5.11)$$

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения имеет размерность $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$. 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 $Y_{в.п}$ 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

$$D_1 \geq 1, \text{ то } Y_{в.п} = S_1. \quad (5.12)$$

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

$$Y_{в.п} = \frac{R_1 S_1 + y_2}{1 + R_1 Y_2}. \quad (5.13)$$

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

$$Y_{n-1} = \frac{R_{n-1} S_{n-1} + y_n}{1 + R_{n-1} Y_n}. \quad (5.14)$$

Затем последовательно определяются по рекуррентной формуле (5.14) 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 (5.14)

$$Y_{в.п} = R_1 S_1^2. \quad (5.15)$$

Для безынерционного ограждения, например, для окна $Y_2 = \alpha_n$ и $S_1 = 0$. По формуле (5.13)

$$Y_{в.п} = \frac{y_2}{1 + R_1 Y_2} = \frac{\alpha_n}{1 + R_1 \alpha_n} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + R_1} = \frac{1}{R_{ок} - R_{\epsilon}} = K'_{ок}. \quad (5.16)$$

где R_1 – термическое сопротивление окна, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

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

$$K'_{ок} = \frac{1}{R_{ок} - R_{\epsilon}}. \quad (5.17)$$

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

Как было сказано в предыдущем параграфе 5.3.2. 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 быстрее и экономичнее будет прерывистое отопление.

5.3.4. Коэффициент теплопоглощения ограждения

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

$$B_{\epsilon,n} = \frac{A_Q}{A_{t\epsilon}}. \quad (5.18)$$

Если пренебречь сдвигом колебаний во времени, то $A_Q = \alpha_B(A_{t\epsilon} - A_T)$. Это дает нам право написать:

$$\frac{1}{\alpha_\epsilon} = \frac{A_{t\epsilon}}{A_Q} - \frac{A_T}{A_Q}. \quad \text{или} \quad \frac{1}{B_{\epsilon,n}} = \frac{1}{\alpha_\epsilon} + \frac{1}{Y_{\epsilon,n}}. \quad \text{Откуда} \quad B_{\epsilon,n} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\epsilon} + \frac{1}{Y_{\epsilon,n}}}. \quad (5.19)$$

5.3.5. Теплоустойчивость наружного ограждения по отношению к внешним воздействиям

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

$$t_n(z) = t_{н.о} + A_{тн} \cos \frac{2\pi}{T} z. \quad (5.20)$$

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

$$\tau(z) = \tau_o + A_\tau \cos \frac{2\pi}{T} (z - \epsilon). \quad (5.21)$$

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 :

$$A_\tau = \frac{A_{тн}}{\nu}. \quad (5.22)$$

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

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_\epsilon)(s_2 + Y_1) \dots (s_n + Y_{n-1})(\alpha_n + Y_n)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_n + Y_n)\alpha_n}. \quad (5.23)$$

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

D – показатель тепловой инерции ограждающей конструкции по п. 5.3.2.;

$s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ – коэффициенты теплоусвоения материалов слоев, 1, 2, 3...n, отсчитанных от внутренней поверхности, Вт/(м²·°C), по п. 5.3.1;

$Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_n$ – коэффициенты теплоусвоения наружных поверхностей отдельных слоев ограждения, определяемые, начиная с первого слоя от внутренней поверхности, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$, по п. 5.3.3.;

$\alpha_{в}, \alpha_{н}$ – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$.

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

$$\epsilon = 2,7 D - 0,4. \quad (5.24)$$

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 $\alpha_{н}$ в подавляющем большинстве случаев больше $\alpha_{в}$, то теплоустойчивый слой надо делать изнутри, что кстати хорошо согласуется с необходимостью делать утепление с наружной стороны ограждения.

Затухание тепловой волны v 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 $R_0 \cdot \alpha_{в}$. Если затухание равно или близко к предельному, любые изменения температуры наружной среды передается без запаздывания на внутреннюю поверхность стенки с уменьшением в $R_0 \cdot \alpha_{в}$ раз, т.е. как процесс стационарной теплопередачи.

5.4. 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 температуры 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 теплопоступлений** в помещение.

Показателем теплоусвоения помещения Y_n , $Вт/^\circ C$, принимается сумма произведений коэффициентов теплоусвоения внутренних поверхностей каждого из I ограждения Y_i , обращенных в помещение, и площади A_i этой поверхности:

$$Y_n = \sum_{i=1}^I Y_i \cdot A_i. \quad (5.25)$$

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

$$Y_n = \frac{A_Q}{A_{tr}}. \quad (5.26)$$

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:

$$P_{огр} = \sum_{i=1}^I P_i \cdot A_i \approx \frac{1}{1/Y_n + 1/\alpha_B \sum A_i}. \quad (5.27)$$

Кроме того, показатель теплопоглощения 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:

$$P_{вент} = 0,28Lc\rho. \quad (5.28)$$

где: L – расход вентиляционного воздуха в помещение, м³/ч;
 c – теплоемкость воздуха, $c=1,005$ кДж/(кг·°С);
 ρ – плотность воздуха, по формуле (3.16), кг/м³.

Таким образом, принимается, что показатель теплопоглощения помещения равен:

$$P_n = P_{огр} + P_{вент}. \quad (5.29)$$

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

$$P_n = \frac{A_Q}{A_{та}}. \quad (5.30)$$

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

$$A_{та} = \frac{0,9 \cdot A_Q}{\frac{1}{1/Y_n + 1/\alpha_B \sum A_i} + P_{вент}} \quad (5.31)$$

где A_Q – амплитуда возмущающего теплового потока, Вт;
 α_B – средний коэффициент теплообмена на внутренних поверхностях наружных и внутренних ограждений, принимается равным 6,25 Вт/(м²·°С).
 Коэффициент 0,9 учитывает несовпадение по фазе колебаний температуры воздуха и поверхности отдельных ограждений.

Прерывистыми теплоступлениями считаются периодические теплоступления (рис.22), которые постоянны и равны Q_n в течение части m , ч, периода T , ч, и отсутствуют в течение остального времени периода n , ч.

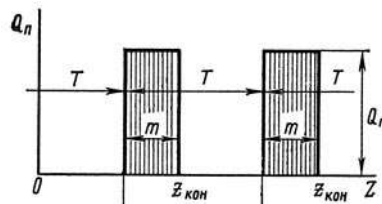


рис. 22. Прерывистые поступления теплоты

Показатель теплопоглощения помещения при прерывистых тепlopоступлениях корректируется с учетом измененной формы кривой изменения во времени тепlopоступлений:

$$P_{n,\Pi} = P_{огр,\Pi} + P_{вент} = \frac{1}{\frac{\Omega_{\max}}{Y_n} + \frac{1}{\alpha_e \sum A_i}} + P_{вент}. \quad (5.32)$$

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

Амплитуда колебаний температуры воздуха в случае прерывистых тепловых воздействий равна:

$$A_t = \frac{0,9 \cdot Q_{\Pi}}{\frac{1}{\frac{\Omega_{\max}}{Y_n} + 1/\alpha_B \sum A_i} + P_{вент}} \quad (5.33)$$

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?

- ## 6. Теплообмен в помещении

The diagram shows a mechanical system. A horizontal bar is supported by two vertical springs, each labeled K . The left end of the bar is attached to a fixed wall. The right end of the bar is attached to a vertical rod that can move horizontally. The vertical rod is also connected to a spring labeled K and a point labeled t_H . The system is shown in a state of equilibrium.

6.1. Лучистый теплообмен в помещении

6.1.1. Основные законы излучения абсолютно черного тела

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

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**.

68

Планка (рис.24) устанавливает зависимость интенсивности излучения от температуры и длины волны.

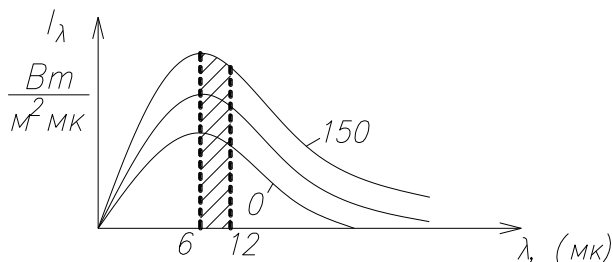


Рис. 24. Спектральная интенсивность излучения поверхности абсолютно черного тела

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 **монохроматического, спектрального** или **однородного** излучения. На основании законов Планка и Вина излучение в помещении считается монохроматическим.

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

$$E_0 = \int I_\lambda \cdot d\lambda = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (6.1)$$

где C_0 – постоянная Больцмана и равна 5,67 Вт/(м²·К⁴).

Интенсивность излучения в общем случае зависит от направления и является величиной, пропорциональной косинусу β_1 (рис. 25) между направлением излучения и нормалью к поверхности тела (**закон Ламберта**).

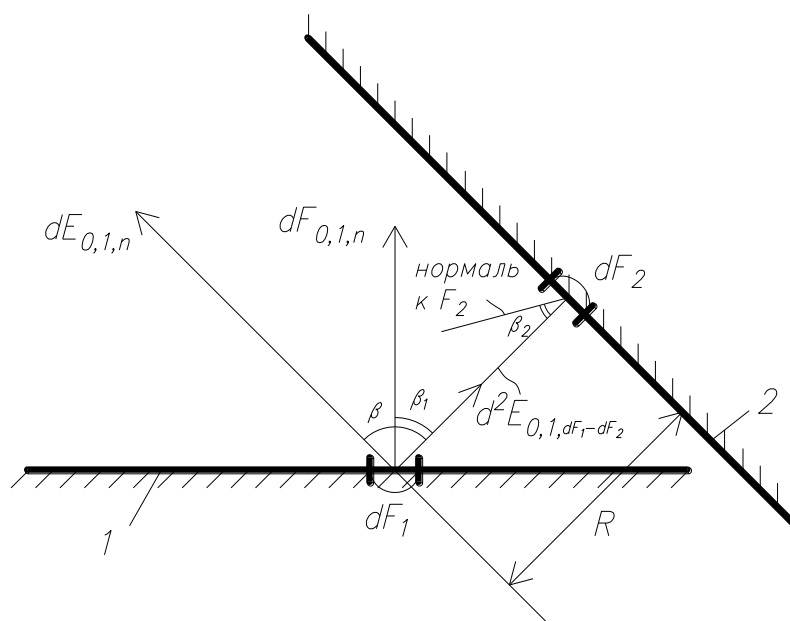


Рис. 25. Теплообмен излучением между двумя поверхностями

Тепловой поток, Вт, передаваемый излучением между двумя произвольно расположенными поверхностями, определяется как разность потоков лучистой теплоты, 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:

$$E_{0,1-2} - E_{0,2-1} = \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2 \cdot dF_2 \cdot dF_1 \cdot (E_{0,1} - E_{0,2}) = \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot (E_{0,1} - E_{0,2}),$$

(6.2)

где: $E_{0,1}$, $E_{0,2}$ – интегральная интенсивность излучения 1-й и 2-й поверхностей абсолютно черного тела, Вт/м²;

$E_{0,1-2}$, $E_{0,2-1}$ – интегральная интенсивность излучения 1-й на 2-ю и со 2-й на 1-ю поверхности, Вт/м²;

A_1 – площадь поверхности 1, м².

φ_{1-2} – это геометрический параметр, названный **коэффициентом облученности** с одной поверхности на другую.

Коэффициент облученности показывает долю от всего излучаемого поверхностью 1 потока, которая подается на поверхность 2. Физический смысл коэффициента облученности определяется формулой:

$$\varphi_{1-2} = \frac{E_{0,1-2}}{E_{0,1}}. \quad (6.3)$$

Коэффициенты облученности подчиняются трем законам геометрии лучистых потоков:

Закон взаимности определяется формулой:

$$\varphi_{1-2} \cdot A_1 = \varphi_{2-1} \cdot A_2. \quad (6.4)$$

Закон замкнутости лучистых потоков заключается в том, что сумма коэффициентов облученности с поверхности 1 в сторону всех окружающих поверхностей i равна единице:

$$\sum_i \varphi_{1-i} = 1. \quad (6.5)$$

Закон распределительности лучистых потоков состоит в том, что поток от поверхности 1 к поверхности 2 может быть представлен в виде суммы потоков между отдельными частями m (1) и n (2):

$$A_1 \varphi_{1-2} = \sum_m \sum_n A_m \varphi_{m-n} \quad (6.6)$$

6.1.2. 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 $E_{\text{собств}} = \varepsilon \cdot E_0$. Если на поверхность тела падает лучистый поток $E_{\text{пад}}$, то поглощенная энергия будет равна $E_{\text{погл}} = \varepsilon \cdot E_{\text{пад}}$, тогда отраженная лучистая энергия равна $E_{\text{отр}} = (1 - \varepsilon) \cdot E_{\text{пад}}$ (рис.26). Но так как коэффициент излучения в помещениях $\varepsilon \approx 0,9$, то можно считать, что отраженная энергия близка к 0.

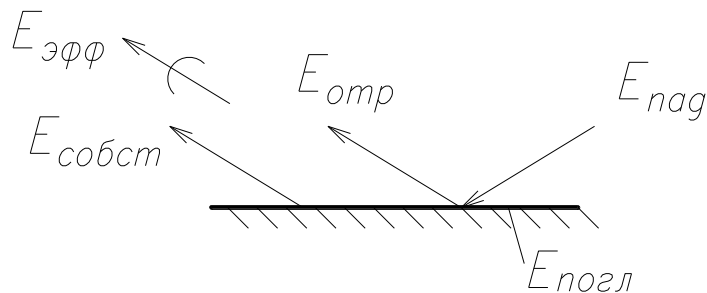


Рис. 26. Структура лучистых потоков на поверхности

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

$$E_{\text{эфф}} \approx E_{\text{собств}} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (6.7)$$

6.1.3. Лучистый теплообмен между двумя поверхностями серого тела

Тепловой поток между двумя поверхностями серого тела равен

$$\begin{aligned} Q_{\text{л},1-2} &= E_{0,1-2} - E_{0,2-1} = \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot C_0 \cdot \left[\frac{T_1}{100} \right]^4 - \varphi_{2-1} \cdot A_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot C_0 \cdot \left[\frac{T_2}{100} \right]^4 \\ &= \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (6.8)$$

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

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \quad (6.9)$$

- поверхность 2 полностью перекрывает поверхность 1

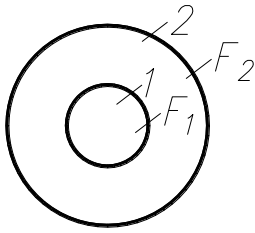


Рис.27. Одна поверхность окружена другой

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (6.10)$$

- поверхности малы или далеко расположены друг от друга

$$\varepsilon_{1-2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \quad (6.11)$$

В инженерных расчетах не удобно использовать разность четвертых степеней температуры. Поэтому был введен коэффициент линеаризации b , позволяющий заменить эту разность на разность в первой степени:

$$b_{1-2} = \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{(t_1 - t_2)} \quad (6.12)$$

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:

$$b_{1-2} = 0,81 + 0,01 \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (6.13)$$

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:

$$Q_{л,1-2} = \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot b_{1-2} \cdot (t_1 - t_2), \quad (6.14)$$

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

Для большей простоты расчетов принято произведение коэффициентов в формуле (6.14) заменять одним коэффициентом лучистого теплообмена $\alpha_{л,1-2}$, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$, с поверхности 1 на поверхность 2:

$$\alpha_{л,1-2} = \varphi_{1-2} \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot b_{1-2} \quad (6.15)$$

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

$$Q_{л,1-2} = A_1 \cdot \alpha_{л,1-2} \cdot (t_1 - t_2). \quad (6.16)$$

6.1.4. 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.

$$t_{R,1} = \frac{\sum \varphi_{1-i} \cdot t_i}{\sum \varphi_{1-i}} \quad (6.17)$$

где $t_{R,1}$ – осредненная по коэффициентам облученности температура всех поверхностей, окружающих поверхность 1, °С.

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 этой t_R часто ее рассчитывают как среднюю по площадям A_i всех поверхностей, обращенных в помещение:

$$t_R = \frac{\sum A_i \cdot t_i}{\sum A_i} \quad (6.17)$$

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 $\alpha_{л,1}$, Вт/(м²·°С),

$$\alpha_{л,1} = \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot b_{1-R} \cdot \quad (6.18)$$

Если принять, что средний коэффициент излучения поверхностей в помещении равен $\varepsilon_{1-2} = 0,9$, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴), $b \approx 1$, то величина коэффициента лучистого теплообмена поверхности в помещении приблизительно равна $\alpha_{л,1} \approx 5$ Вт/(м²·°С).

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

$$Q_{л,1} = A_1 \cdot \alpha_{л,1} \cdot (t_1 - t_R). \quad (6.19)$$

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?

6.2. Конвективный теплообмен в помещении

6.2.1. Движение воздуха у внутренней поверхности ограждения

Специфика конвективного теплообмена в помещении заключается в том, что

1. Воздух помещения имеет температуру близкую к $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. В помещении формируются небольшие разности температуры Δt ($130\dots 1\text{ }^{\circ}\text{C}$).
3. Помещение представляет собой определенный ограниченный объем определенной геометрии.

Конвективный теплообмен в помещении естественный – возникающий за счет естественных 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. 28) 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.

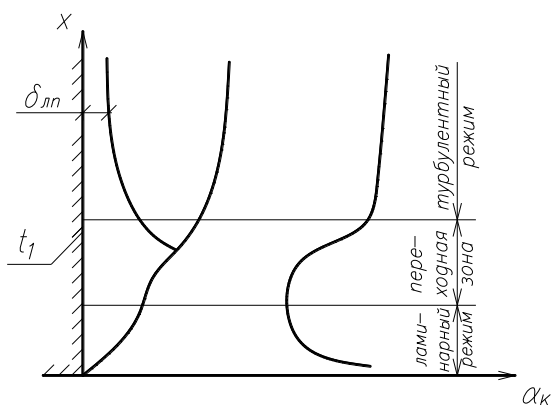


Рис. 28. Пограничные слои у нагретой стенки и коэффициент конвективного теплообмена

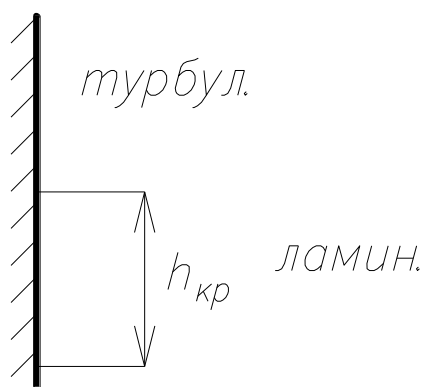


Рис. 29. Критический размер перехода от ламинарного режима к турбулентному

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

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 $\delta_{л,п}$ 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 [19], равно $Gr \cdot Pr = [(1/293)/9,81 \cdot l^2 \cdot \Delta t / (15,06/10^{-6})^2] \cdot 0,709 = 0,148 \cdot 0,709 \cdot 10^8 \cdot l^3 \cdot \Delta t \approx 10^8 \cdot l^3 \cdot \Delta t$, (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. 29). По данным Михеева М.А. [5] для воздуха этот переход происходит при критическом значении произведения критериев Грасгофа и Прандтля $Gr \cdot Pr = 2 \cdot 10^7$. Тогда $10^8 \cdot l^3 \cdot \Delta t = 2 \cdot 10^7$, и критическое расстояние, на котором происходит переход от ламинарного к турбулентному режиму, равно $h_{кр} \approx 0,2 \cdot \Delta t^{-1/3}$, и, как видно, зависит от перепада между значениями температуры воздуха и поверхности. Значения $h_{кр}$ по этому выражению приведены на рис. 30.

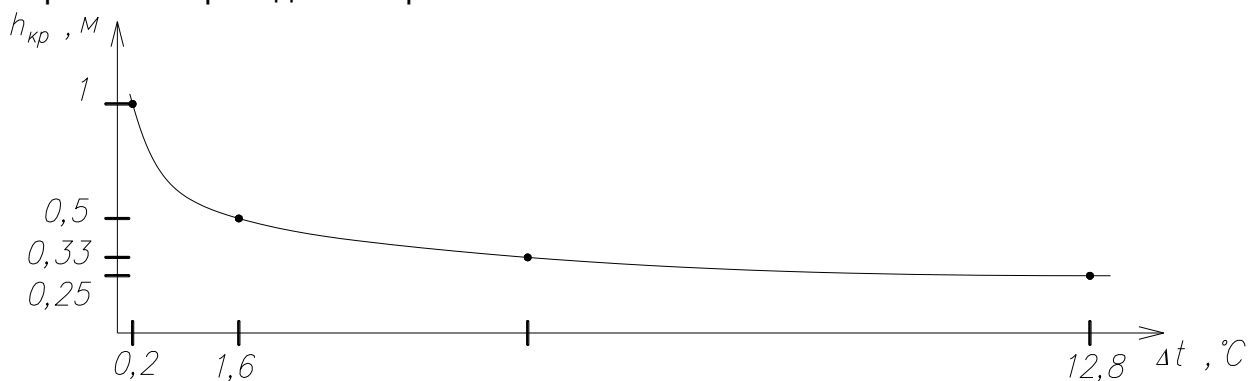


Рис. 30. критический размер перехода от ламинарного к турбулентному режиму на поверхности в помещении в зависимости от разности температур Δt воздуха и поверхности

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

Для расчета коэффициента конвективного теплообмена сначала А.М.Шкловером [24], а затем В.Н.Богословским [19], были предложены формулы для расчета коэффициента конвективного теплообмена исходя из преимущественно турбулентного течения воздуха у внутренних поверхностей ограждения, для которого М.А.Михеевым [5] на основе экспериментальных данных приводится зависимость

$$Nu = 0,135 \sqrt[3]{Gr \cdot Pr} = 0,135 \sqrt[3]{1,05 \cdot 10^8 \cdot \Delta t} . \quad (6.20)$$

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

$$\alpha_k = A \cdot \Delta t^{1/3}, \quad (6.21)$$

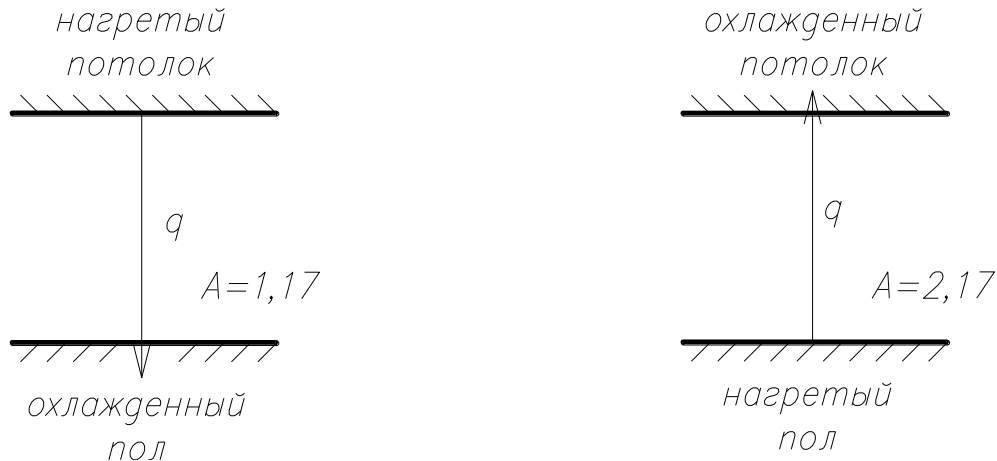


Рис. 31. Коэффициент A для нагретых и охлажденных поверхностей в помещении
Для вертикальных поверхностей $\alpha_k = 1,67 \cdot \Delta t^{1/3}$, для горизонтальной нагретой поверхности, обращенной вверх, или охлажденной, обращенной вниз, $\alpha_k = 2,27 \cdot \Delta t^{1/3}$, для горизонтальной нагретой поверхности, обращенной вниз, или охлажденной, обращенной вверх, $\alpha_k = 1,17 \cdot \Delta t^{1/3}$ (рис. 31).

Следует отметить, что, если температура воздуха отличается от 20°C, при которой были получены коэффициенты в формулах (6.20) – (6.23), то эти коэффициенты будут уменьшаться на 1% при увеличении температуры воздуха на 10°C, и, наоборот, возрастать при падении температуры воздуха на 10°C [19]. Из формул (6.20)-(6.23) видно, что величина конвективного теплообмена в турбулентной области зависит только от разности между температурой воздуха и внутренней поверхности ограждения.

6.2.3. Особенности конвективного теплообмена на поверхности в помещении

Экспериментально доказано [19], что стесненность условий для конвекции в реальном помещении приводит к некоторым особенностям формирования коэффициентов конвективного теплообмена на его поверхностях :

1. Образуется зона торможения.
2. В турбулентной области $\alpha_{k,x}$ больше, чем при свободной конвекции.
3. Интенсивность конвективного теплообмена в помещении намного выше, чем при свободной конвекции.

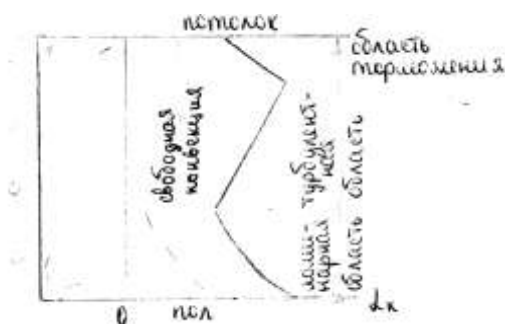


Рис. 32. Качественное сопоставление локальных значений коэффициентов конвективной теплоотдачи вертикальной нагретой поверхности, расположенной 1 – свободно, 2- в ограниченном объеме помещения

6.2.4. Коэффициент конвективного теплообмена 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 [19] предложил энергетический подход, при котором, зная вынужденную подвижность v_B 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, $\beta = 1/273 \text{ 1/K}$), а кинетическая энергия движущегося воздуха со скоростью v_B в вынужденном потоке составит $W_k = (v_B)^2 / 2g$. Считая потери на трение пренебрежимо малыми, получим

$$(v_B)^2 / 2g = l \beta \Delta t_v. \quad (6.22)$$

Принимая во внимание положение [19] 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_B , получаем

$$\Delta t_v = (v_B)^2 / (2g \cdot l \beta) = (2v_e)^2 / (2g \cdot l \beta) = 293 \cdot (2v_e)^2 / (2 \cdot 9,81 \cdot l) \approx 60 (v_e)^2 / l. \quad (6.23)$$

Формула (4.18) позволяет принять условную разность температур Δt_{ysl} , как сумму разностей температуры при свободной конвекции Δt и при вынужденной Δt_v :

$$\Delta t_{ysl} = \Delta t + \Delta t_v. \quad (6.24)$$

В качестве определяющего размера l принимается для стен высота помещения, а для полов и потолков их длина.

$$\alpha_k = A \sqrt[3]{\Delta t_{ysl}}. \quad (6.25)$$

Вопросы для самоконтроля

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.
184. Какой режим конвективного теплообмена (ламинарный или турбулентный) является преобладающим и почему?
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?

6.3. Общий теплообмен в помещении

6.3.1. 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. 33) лучистый теплообмен со всеми другими ограждениями с общей радиационной температурой t_R , конвективный теплообмен с воздухом, имеющим температуру t_B , тепловой поток, идущий вглубь ограждения за счет теплопередачи к наружной среде с температурой t_H , 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 t_1 можно записать в виде:

$$\alpha_K(t_B - t_1) + \alpha_L(t_R - t_1) + k'(t_H - t_1) + q = 0,$$

где q – интенсивность падающего на внутреннюю поверхность ограждения лучистого теплового потока, Вт/м²;

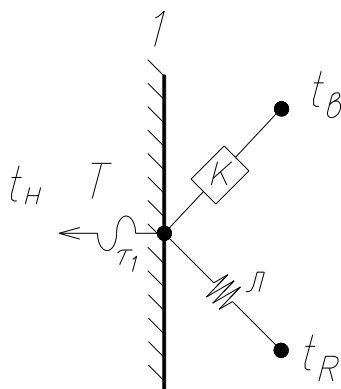


Рис. 33. Схема теплообмена поверхности в помещении

k' – неполный коэффициент теплопередаче наружного ограждения 1, Вт/(м²·°C)

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (6.26)$$

Тепловой баланс воздуха в помещении включает в себя конвективный теплообмен воздуха с каждой поверхностью помещения и конвективную теплоту, которую могут внести вентиляционные или инфильтрационные потоки входящего в помещение воздуха и конвективные тепловыделения от внутренних источников:

$$\Sigma \alpha_k (\tau_i - t_e) + Lc\rho(t_{np} - t_e) + Q_k = 0, \quad (6.27)$$

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.

6.3.2. Температура помещения

Для характеристики температурной обстановки в помещении наиболее общей является температура помещения t_n :

$$t_n = \frac{t_e + t_r}{2}. \quad (6.28)$$

Применив температуру помещения можно сложный (лучисто-конвективный) теплообмен на поверхности в помещении описать с помощью общего коэффициента теплоотдачи на поверхности α_b :

$$q_1 = \alpha_k (\tau_1 - t_e) + \alpha_l (\tau_1 - t_R) = \alpha_b (\tau_1 - t_n), \quad (6.29)$$

тогда коэффициент

$$\alpha_b = \alpha_k \frac{(\tau_1 - t_e)}{\tau_1 - t_n} + \alpha_l \frac{(\tau_1 - t_R)}{\tau_1 - t_n} \quad (6.30)$$

Если $t_e = t_r = t_n$, то $\alpha_b = \alpha_k + \alpha_l$

6.3.3. Упрощения полной системы уравнений

На практике применяется два основных шага упрощения:

– упрощение Киссина-Листова [19], 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:

$$Q_{пан} = \alpha_{пан.л.} \cdot (\tau_{пан} - \tau_{н.о.}) A_{пан} + \alpha_{пан.к.} \cdot (\tau_{пан} - t_e) A_{пан} = Q_l + Q_k \quad (6.31)$$

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:

$$Q_l = Q_1 + \Delta Q_2,$$

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 лучистый поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Лучистый теплообмен панели описываем через вводимый коэффициент полной облученности с панели на наружное ограждение, Φ :

$$\Phi = \varphi_{\text{пан-н.о.}} + \Delta\varphi_{\text{косв.обл.н.о.}} = \frac{\frac{A_{\text{н.о.}} - \varphi^2}{A_{\text{пан}}}}{\frac{A_{\text{н.о.}}}{A_{\text{пан}}} + 2\varphi - 1}. \quad (6.32)$$

Тогда коэффициент лучистого теплообмена в формуле (6.31) равен

$$\alpha_{\text{пан.л}} = \varepsilon_{\text{пан-н.о.}} \cdot C_0 \cdot \Phi \cdot b_{\text{пан-н.о.}}$$

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 $t_b = t_r$?
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?

7. Комфортность тепловой обстановки в помещении

Внутренние **тепловые условия в помещении (микроклимат)** могут быть заданы с 3-х позиций:

- Комфортность для человека
- Оптимальность для технологического процесса
- Комфортно-технологические требования

7.1. Тепловой баланс человека

В организме человека протекают **метаболические процессы** в ходе которых энергия освобождается в виде теплоты и полезной работы мышц. **Теплопродукция** человеческого тела в основном зависит от рода деятельности. в некоторой степени связана с возрастом и полом человека. Теплоотдача человеческого тела в большой степени зависит от одежды и тепловых факторов окружающей среды. Тепловой баланс организма [26] человека можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{ч}} = Q_{\text{ч}}^{\text{изл}} + Q_{\text{ч}}^{\text{кон}} + Q_{\text{ч}}^{\text{исп}} + Q_{\text{ч}}^{\text{раб}} + Q_{\text{ч}}^{\text{физ}} \pm \Delta Q_{\text{ч}},$$

где $Q_{\text{ч}}$ – теплопродукция человека, Вт;

$Q_{\text{ч}}^{\text{изл}}$ – теплоотдача излучением, Вт;

$Q_{\text{ч}}^{\text{кон}}$ – теплоотдача конвекцией, Вт;

$Q_{\text{ч}}^{\text{исп}}$ – теплоотдача испарением, Вт;

$Q_{\text{ч}}^{\text{раб}}$ – тепловой эквивалент выполняемой человеком работы, Вт;

$Q_{\text{ч}}^{\text{физ}}$ – теплота, идущая на физиологические процессы организма человека, Вт;

$\Delta Q_{\text{ч}}$ – дисбаланс теплоты (определяет адаптацию система терморегуляции человека к тепловой обстановке).

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:

$$Q_{\text{ч}}^{\text{изл}} + Q_{\text{ч}}^{\text{кон}} + Q_{\text{ч}}^{\text{исп}} = f(t_{\text{в}}, t_{\text{р}}, v_{\text{в}}, \varphi_{\text{в}})$$

Обслуживаемая зона помещения [13] - та часть объема помещения, где система кондиционирования микроклимата должна обеспечить расчетные условия. Расчетные тепловые внутренние условия в помещении состоят в основном:

- из температурных условий – температуры воздуха $t_{\text{в}}$, радиационной температуры $t_{\text{р}}$ и температур в помещении (результатирующей температуры $t_{\text{п}}$;
- аэродинамических условия - подвижности воздуха $v_{\text{в}}$;
- влажностные условия $\varphi_{\text{в}}$, $d_{\text{в}}$, $e_{\text{в}}$.

Сочетание параметров могут быть **оптимальными, допустимыми**.

Температурные условия определяются 2-мя условиями комфортности [19].

7.2. Условия комфортности температурной обстановки в помещении

I условие комфортности касается общей температурной обстановки в помещении. Оно устанавливает связь между температурой воздуха и радиационной температурой помещения, при которых человек в центре обслуживаемой зоны испытывает комфорт

$$Q_{\text{ч}}^{\text{к+л+у}} = f(t_{\text{в}}, t_{\text{р}} \rightarrow t_{\text{п}})$$

Для зимы: $t_{\text{р}} = 1,57t_{\text{п}}(H) - 0,5t_{\text{в}} \pm 1,5$ (здесь H - интенсивность работы).

Для лета: $t_{\text{р}} = 1,5t_{\text{п}}(H) - 0,5t_{\text{в}} \pm 1,5$ ($t_{\text{п}}(H)$ - функция тяжести работы).

II условие комфортности Локальная составляющая на границе обслуживаемой зоны в непосредственной близости от нагретой и охлажденной поверхности. Баланс должен быть такой, чтобы тепловой поток с элементарной площадки на теле человека $q_{\text{дф}}$ был направлен от человека. Из опытов: более жесткие условия состоят в том, чтобы $12 < q_{\text{дф}} < 70$ Вт/м², менее жесткие $0 < q_{\text{дф}} < 93$ Вт/м². В табл. 6 приведены уравнения для II условия комфортности.

Таблица 6

Запись II условия комфортности для различных условий [19]		
	Зима	Лето
Нагретая поверхность	$\tau_{\text{п.нагр.}}^{\text{доп}} = 19,2 + \frac{8,7}{\varphi_{\text{ч-п}}}$	$\tau_{\text{п.нагр.}}^{\text{доп}} = 29 + \frac{4,7}{\varphi_{\text{ч-п}}}$
Охлажденная поверхность	$\tau_{\text{п.охл.}}^{\text{доп}} = 23 - \frac{5}{\varphi_{\text{ч-п}}}$	$\tau_{\text{п.охл.}}^{\text{доп}} = 25 - \frac{5}{\varphi_{\text{ч-п}}}$
Для окна	$\tau_{\text{п.ок.}}^{\text{доп}} = 14 - \frac{4,4}{\varphi_{\text{ч-ок}}}$	

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.
7. Сформулируйте второе условие комфортности тепловой обстановки

Список литературы

1. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий/ Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.
2. К.Ф.Фокин. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А.Табкнщикова и В.Г.Гагарина.- 5-е изд, пересмотр.- М.:АВОК-ПРЕСС, 2006, с. 287
3. О.Е.Власов. Основы строительной теплотехники. – М.: ВИА РККА, 1938.
4. СП 23-101-2004. "Проектирование тепловой защиты зданий".
5. М.А.Михеев. Основы теплопередачи.- М.: Госэнергоиздат, 1956
6. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. - М., 1958. - 64с.
7. АВОК Справочное пособие-1-2004. Влажный воздух.-М.:АВОК_ПРЕСС, 2004.
8. 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.
9. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. - М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.
10. К.Ф.Фокин. Расчетные температуры наружного воздуха. -М.: Стандартгиз, 1946.
11. Строительная климатология/НИИ строит. физики- М.: Стройиздат, 1990, 86 с.: ил.- (Справочное пособие к СНиП).
12. В.М.Ильинский. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий): учеб. пособие для инж.-строит. вузов.- М.: «Высш. школа», 1974, с. 319.
13. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.- М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999.
14. Р.Е.Брилинг. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Госстройиздат, 1948.
15. 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.
16. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Госстрой РФ. – М.: ГУП ЦПП, 1993. – 58с.
17. В.П.Титов. Воздушный режим промышленных зданий.//Водоснабжение и санитарная техника.1976, №3.
18. ГОСТ 23166-99. Межгосударственный стандарт. Блоки оконные. Общие технические условия. – М.: ГУП ЦПП, 2000.-46 с.
19. В.Н.Богословский.Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). учеб. для вузов.- 2-е изд., перераб. и доп. -М.:Стройиздат, 1982.-415с., ил.
20. О.Е.Власов. Плоские тепловые волны.//Известия теплотехнического института. 1927, вып.3 (26).
21. Г.А.Селивенрстов. Теплоустойчивость зданий.-М.:Госстройиздат, 1934.
22. Е.Г.Швидковский. К теории плоских температурных волн. // ЖТФ. 1940, т.Х, вып.2.
23. С.И.Муромов. Расчетные температуры наружного воздуха и теплоустойчивость зданий. – М.: Стройиздат Наркомстроя, 1939.
24. А.М.Шкловер. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях.- М – Л.:Госэнергоиздат, 1961.
25. Л.А.Семенов. Теплоустойчивость и печное отопление жилых и общественных зданий. – М.: Машстройиздат, 1950.
26. Л.Банхиди. 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.