Содержание

1. Введение

1.1 Цель и задачи курса

1.2 Предмет курса

1.3 Здание как единая энергетическая система

2. Тепловлагопередача через наружные ограждения

2.1 Основы теплопередачи в здании

2.1.1 Теплопроводность

2.1.2 Конвекция

2.1.3 Излучение

2.1.4 Термическое сопротивление воздушной прослойки

2.1.5 Коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях

2.1.6 Теплопередача через многослойную стенку

2.1.7 Приведенное сопротивление теплопередаче

2.1.8 Распределение температуры по сечению ограждения

2.2 Влажностный режим ограждающих конструкций

2.2.1 Причины появления влаги в ограждениях

2.2.2 Отрицательные последствия увлажнения наружных ограждений

2.2.3 Связь влаги со строительными материалами

2.2.4 Влажный воздух

2.2.5 Влажность материала

2.2.6 Сорбция и десорбция

2.2.7 Паропроницаемость ограждений

2.3 Воздухопроницаемость наружных ограждений

2.3.1 Основные положения

2.3.2 Разность давлений на наружной и внутренней поверхности ограждений

2.3.3 Воздухопроницаемость строительных материалов

## 1. Введение

## 1.1 Цель и задачи курса

Учебное пособие "Лекции по строительной теплофизику" предназначено для студентов, изучающих в рамках специальности "Теплогазоснабжение и вентиляция" одноименную дисциплину. Содержание пособия соответствует программе дисциплины и в значительной мере ориентировано на курс лекций, читаемый в МГСУ. Цель курса - с помощью системного изложения сформировать подход к физической сущности тепло-воздушного и влажностного режимов здания как к основе 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 дальнейшей профессиональной работе, то есть при проектировании и эксплуатации систем обеспечения микроклимата здания. В результате освоения дисциплины студент должен знать понятия, определяющие тепловой, воздушный и влажностный режимы здания, включая климатологическую и микроклиматическую терминологию; законы передачи теплоты, влаги, воздуха в материалах, конструкциях и элементах систем здания и величины, определяющие тепловые и влажностные процессы; нормативы теплозащиты наружных ограждающих конструкций, нормирование параметров наружной и внутренней среды здания. Студент должен уметь формулировать и решать задачи передачи теплоты и массы во всех элементах здания и демонстрировать способность и готовность вести поверочный расчет защитных свойств наружных ограждений, и расчет коэффициентов лучистого и конвективного теплообмена на поверхностях, обращенных в помещение.

## 1.2 Предмет курса

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

В основном строительная теплофизика изучает процессы, происходящие на поверхностях и в толще ограждающих конструкций здания. Причем, по установившейся традиции и для краткости, часто *ограждающие конструкции здания* называются просто *ограждениями*. Причем, значительное место в строительной теплофизике отведено *наружным ограждениям*, которые отделяют отапливаемые помещения от наружной среды или от неотапливаемых помещений (неотапливаемых техподполий, подвалов, чердаков, тамбуров и т.п.)

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, влияющие на мощность отопительных систем и расход теплоты ими за отопительный период. Во-вторых, влажностный режим наружных ограждений влияет на их теплозащиту, а, следовательно, на мощность систем, обеспечивающих заданный микроклимат здания. В-третьих, коэффициенты теплообмена на внутренней поверхности наружных ограждений играют роль не только в оценке общего приведенного сопротивления теплопередаче конструкции, но и в оценке температуры на внутренней поверхности этого ограждения. В-четвертых, "плотные" окна имеют вполне определенное сопротивление воздухопроницанию. И при "плотных" окнах в малоэтажных зданиях до 5 этажей инфильтрацией в расчете теплопотерь можно пренебречь, а в более высоких на нижних этажах она уже будет ощутимой. В-пятых, от воздушного режима здания зависит не только наличие или отсутствие инфильтрации, но и работа систем вентиляции, особенно естественных. В-шестых, радиационная температура внутренних поверхностей наружных и внутренних ограждений, важнейшая составляющая оценки микроклимата помещений, в основном является производной от теплозащиты здания. В-седьмых, теплоустойчивость ограждений и помещений влияет на постоянство 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 [31] связана:

во-первых, с повысившимися требованиями к теплозащите зданий;

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

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

## 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 ним теплотой и влагой, пропускают воздух сквозь себя как внутрь, так и наружу. Задача поддержания заданного теплового режима помещений здания (поддержания на необходимом уровне температуры и влажности воздуха, его подвижности, радиационной температуры помещения) возлагается на инженерные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Однако определение тепловой мощности и режима работы этих систем невозможно без учета влияния тепловлагозащитных и теплоинерционных свойств ограждений. Поэтому система кондиционирования микроклимата помещений включает в себя все инженерные средства, обеспечивающие заданный микроклимат обслуживаемых помещений: ограждающие конструкции здания и инженерные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Таким образом, современное здание - сложная взаимосвязанная система тепломассообмена - единая энергетическая система.

Вопросы для самоконтроля

1 Что изучается в строительной теплофизике?

2. Что такое ограждение?

3. Что такое наружное ограждение?

4. Чем важна строительная теплофизика для специалиста по отоплению и вентиляции?

5. В чем специфика теплотехнического расчета современных зданий?

6. Что такое тепловой режим здания?

7. Какую роль играют ограждающие конструкции в тепловом режиме здания?

8. Какие параметры внутренней среды поддерживаются системами отопления и вентиляции?

9. Что такое система кондиционирования микроклимата здания?

10. Почему здание считается единой энергетической системой?

## 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 температуры*.

## 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 температуры на ее стенках. При рассмотрении теплопроводности характеристики этого процесса относят к общей массе вещества: скелету и порам совместно.

Ограждающие конструкции здания, как правило, является *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:

, (2.1)

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

*λ* - *теплопроводность материала*, Вт/м. оС;

*t* - температура, изменяющаяся вдоль оси x, оС;

Отношение , носит название *градиента температуры*, оС/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 м2 площади, перпендикулярной направлению потока, при градиенте температуры вдоль потока, равном 1 оС/м (рис.1). Чем больше значение λ, тем интенсивнее в таком материале процесс теплопроводности, больше тепловой поток. Поэтому теплоизоляционными материалами принято считать материалы с теплопроводностью менее 0,3 Вт/м. оС.

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 [38] для примера приводит такие данные: теплопроводность абсолютно плотного веществе (без пор) в зависимости от природы имеет теплопроводность от 0,1 Вт/моС (у пластмассы) до 14 Вт/моС (у кристаллических веществ при потоке теплоты вдоль кристаллической поверхности), в то время как воздух имеет теплопроводность около 0,026 Вт/моС. 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, ρ*0*=1800 кг/м3, имеют различные значения теплопроводности [38]:

Таблица 1.

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

|  |  |
| --- | --- |
| Материал | Теплопроводность, Вт/ (м оС)  |
| 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 20оС в порах диаметром 1мм теплопроводность излучением составляет 0,0007 Вт/ (м°С), диаметром 2 мм - 0,0014 Вт/ (м°С) 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.д.ля пересчета значений теплопроводности материалов, полученных при температуре до 100оС, на значения их при 0оС служит эмпирическая формула О.Е. Власова [3]:

λо= λt/ (1+β. t), (2.2)

где λо - теплопроводность материала при 0 оС;

λt - теплопроводность материала при t оС;

β - температурный коэффициент изменения теплопроводности, 1/оС, для различных материалов, равный около 0,0025 1/оС;

t - температура материала, при которой его коэффициент теплопроводности равен λt.

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

, (2.3)

где *τ1,τ2*- значения температуры на поверхностях стенки, оС.

Из выражения (2.3) следует, что распределение температуры по толщине стенки линейное. Величина δ/λ названа *термическим сопротивлением материального слоя* и обозначена *RТ*, м2. оС/Вт:

, (2.4)

Рис.2. Распределение температуры в плоской однородной стенке

Следовательно, тепловой поток *qТ*, Вт/м2, через однородную плоскопараллельную стенку толщиной *δ*, м, из материала с теплопроводностью λ, Вт/м. оС, можно записать в виде

, (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:

, (2.6)

где *qк* - тепловой поток, Вт, передаваемый конвекцией от движущейся среды к поверхности или наоборот;

*ta* - температура воздуха, омывающего поверхность стенки, оС;

*τ* - температура поверхности стенки, оС;

*αк* - коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности стенки, Вт/м2. оС.

Рис.3 Конвективный теплообмен стенки с воздухом

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, *αк* - 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 1оС.

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

Уравнение (2.5) удобно переписать в виде:

, (2.7)

где *Rк* - *сопротивление конвективной теплоотдаче* на поверхности ограждающей конструкции, м2. оС/Вт, равное разности температуры на поверхности ограждения и температуры воздуха при прохождении теплового потока с поверхностной плотностью 1 Вт/м2 от поверхности к воздуху или наоборот. Сопротивление *Rк* является величиной обратной коэффициенту конвективной теплоотдачи *αк*:

, (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 qл, Вт/м2, определяется разностью температуры поверхностей, участвующих в лучистом теплообмене:

, (2.9)

где τ1и τ2 - значения температуры поверхностей, обменивающихся лучистой теплотой, оС;

αл - коэффициент лучистой теплоотдачи на поверхности стенки, Вт/м2. оС.

Коэффициент теплоотдачи излучением, *αл* - физическая величина, численно равная количеству теплоты, передаваемой от одной поверхности к другой путем излучения при разности между температурой поверхностей, равной 1оС.

Введем понятие *сопротивления лучистой теплоотдаче* *Rл* на поверхности ограждающей конструкции, м2. оС/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:

, (2.10)

Сопротивление *Rл* является величиной обратной коэффициенту лучистой теплоотдачи *αл*:

. (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* Rв. п, м2. оС/Вт.

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

Рис.5. Теплообмен в воздушной прослойке

Тепловой поток, проходящий через воздушную прослойку *qв. п*, Вт/м2, складывается из потоков, передаваемых теплопроводностью (2) *qт*, Вт/м2, конвекцией (1) *qк*, Вт/м2, и излучением (3) qл, Вт/м2.

*qв. п=qт+qк+qл*. (2.12)

При этом доля потока, передаваемого излучением самая большая. Рассмотрим замкнутую вертикальную воздушную прослойку, на поверхностях которой разность температуры составляет 5оС. 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% [38].

Прямой расчет этих составляющих достаточно громоздок. Поэтому в нормативных документах [32] приводятся данные о термических сопротивлениях замкнутых воздушных прослоек, которые в 50-х годах ХХ века была составлена К.Ф. Фокиным [38] по результатам экспериментов М.А. Михеева [21]. 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 [38] 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 ε=0,05. Покрытие фольгой обеих поверхностей воздушной прослойки практически не уменьшает передачу теплоты по сравнению с покрытием одной поверхности.

Вопросы для самоконтроля

1. Что является потенциалом переноса теплоты?

2. Перечислите элементарные виды теплообмена.

3. Что такое теплопередача?

4. Что такое теплопроводность?

5. Что такое коэффициент теплопроводности материала?

6. Напишите формулу теплового потока, передаваемого теплопроводностью в многослойной стенке при известных температурах внутренней tв и наружной tн 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 tв от наружной среды с температурой tн. Наружная поверхность путем конвекции обменивается теплотой с наружным воздухом, а лучистой - с окружающими поверхностями, имеющими температуру tокр. н. То же самое и с внутренней стороны. Можно записать, что тепловой поток с плотностью q, Вт/м2, проходящий сквозь стену, равен

, (2.13)

где *tокр. в* и *tокр. н* - температура поверхностей, окружающих соответственно внутреннюю и наружную плоскости рассматриваемой стенки, оС;

αк. в, αк. н - коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки, м2. оС/Вт;

αл. в, αл. н - коэффициенты лучистой теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки, м2. оС/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 αв, Вт/ (м2. оС), а на наружной поверхности - теплоотдача, интенсивность которой определяется коэффициентом теплоотдачи αн, Вт/ (м2. оС). Кроме того, принято считать, что температура воздуха и окружающих поверхностей равны друг другу, то есть *tокр. в =tв, а tокр. н =tн.* То есть

, (2.14)

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

. (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 оС. Величины, обратные коэффициентам теплоотдачи, принято называть *сопротивлениями теплоотдаче на внутренней Rв, м2. оС/Вт, и наружной Rн, м2. оС/Вт, поверхностях ограждения*:

*Rв = 1/ αв; Rн=1/ αн. (*2.16)

## 2.1.6 Теплопередача через многослойную стенку

Если с одной стороны многослойной стенки, состоящей из n слоев, поддерживается температура *tв*, а с другой стороны *tн< tв*, то возникает тепловой поток *q*, Вт/м2 (Рис.6).

Этот тепловой поток движется от среды с температурой *tв*, оС,к среде с температурой *tн*, оС, проходя последовательно от внутренней среды к внутренней поверхности с температурой τв, оС:

*q= (1/ Rв). (tв - τв),* (2.17)

затем от внутренней поверхности сквозь первый слой с термическим сопротивлением *R Т,1*к стыку первого и второго слоев:

*q= (1/ RТ,1). (τв - t1),* (2.18)

после этого через все остальные слои

*q= (1/ R Т, i). (ti-1 - ti),* (2.19)

и, наконец, от наружной поверхности с температурой *τн*к наружной среде с температурой *tн*:

*q= (1/ R н). (τн - tн),* (2.20)

где *R Т, i*- термическое сопротивление слоя с номером *i*, м2. оС/Вт;

*Rв, Rн* - сопротивления теплообмену на внутренней и наружной поверхностях, м2. оС/Вт;

ti-1 - температура, оС, на стыке слоев с номерами *i-1* и *i*;

*ti* - температура, оС, на стыке слоев с номерами *i* и *i+1*.

*Рис.6. Распределение температуры при теплопередаче через многослойную стену*

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

*tв - tн = q. (Rв+R Т,1+R Т,2+…+R Т, i+…. +R Т,n+Rн) (*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* *Ro*, м2. оС/Вт:

*Ro=Rв+ΣR Т, i+Rн*, (2.22)

а сумма термических сопротивлений отдельных слоев ограждения - его термическим сопротивлением *RТ*, м2. оС/Вт:

*RТ = R Т,1+R Т,2+…+Rв. п+…. +R Т,n*, (2.23)

где *R Т,1, R Т,2,…, R Т,n* - термические сопротивления отдельных плоскопараллельных последовательно расположенных по ходу теплового потока слоев слоев ограждающей конструкции, м2. оС/Вт, определяемые по формуле (2.4);

*Rв. п* - термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, м2. оС/Вт, по п.2.1.4

*По физическому смыслу общее сопротивление теплопередаче ограждения* *Ro* - это разность температуры сред по разные стороны ограждения, которая формирует проходящий через него тепловой поток плотностью 1 Вт/ м2, в то время как *термическое сопротивление многослойной конструкции* - разность температуры наружной и внутренней поверхностей ограждения, которая формирует проходящий через него тепловой поток плотностью 1 Вт/ м2,Из (2.22) следует, что тепловой поток *q*, Вт/м2, проходящий через ограждение, пропорционален разности температуры сред по разные стороны ограждения (*tв - tн)* и обратно пропорционален общему сопротивлению теплопередаче *Ro*

*q= (1/ Rо). (tв - tн),* (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, имеющихся 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 м2. 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:

 (2.25)

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

*A* - площадь конструкции (или участка конструкции), м2.

Выражение является по своему смыслу усредненной по площади (или приведенной к единице площади) плотностью потока теплоты через конструкцию, то есть можно записать:

. (2.26)

Из (2.24) и (2.25) следует:

. (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* , определенного формулой (2.22). Отношение значения приведенного сопротивления теплопередаче конструкции к значению условного сопротивления теплопередаче рассмотренного участка называется *коэффициентом теплотехнической однородности*:

 (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.

Коэффициент теплотехнической однородности определяется прямым расчетом многомерного температурного поля конструкции или упрощенно по [32], а для случая стержневых связей по [19].

Величина, обратная приведенному сопротивлению теплопередаче, названа *коэффициентом теплопередачи ограждающей конструкции К*, Вт/м2. оС:

*. (*2.29)

Коэффициент теплопередачи ограждения *К* равен плотности теплового потока, проходящего сквозь ограждение, при разности температуры сред по разные стороны от него в 1оС. Следовательно, тепловой поток *q*, Вт/м2, проходящий через ограждение за счет теплопередачи, может быть найден по формуле:

*q= К. (tв - tн). (*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 *tx* в любом сечении ограждения:

, (2.31)

где *Rх-в*и *Rх-н*- сопротивления теплопередаче соответственно от внутреннего воздуха до точки х и от наружного воздуха до точки х, м2. оС/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 *Rх-в*и *Rх-н*с помощью коэффициента теплотехнической однородности:

. (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 плоскопараллельными слоями по ходу теплового потока.

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

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

7. Физический смысл общего сопротивления теплопередаче многослойной ограждающей конструкции с плоскопараллельными 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 tв к наружной с температурой tн через многослойную стенку.

13. Начертите качественную картинку распределения температуры в двухслойной стенке при известных температурах окружающих сред tв и tн, если λ1>λ2.

14. Начертите качественную картинку распределения температуры в двухслойной стенке при известных температурах окружающих сред tв и tн, если λ1<λ2.

15. Напишите формулу для определения температуры внутренней поверхности двухслойной стенки в при известных температурах сред tв и tн, толщинах слоев δ1 и δ2, коэффициентах теплопроводности λ1 и λ2.

16. Напишите формулу для определения температуры наружной поверхности двухслойной стенки τн в при известных температурах сред tв и tн, толщинах слоев δ1 и δ2, коэффициентах теплопроводности λ1 и λ2.

17. Напишите формулу для определения температуры между слоями двухслойной стенки t при известных температурах сред tв и tн, толщинах слоев δ1 и δ2, коэффициентах теплопроводности λ1 и λ2.

18. Напишите формулу для определения температуры tx в любом сечении многослойной стенки при известных температурах сред tв и tн, 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.

*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.

*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 ло высоты 2 - 2,5 м над землей.

*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 моросящими 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.

*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.

*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".

*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.

*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 теплопотерь здания и большим энергозатратам на отопление.

Теплопроводность увеличивается с повышением влажности материала из-за того, что вода, находящаяся в порах материала, имеет коэффициент теплопроводности около 0, 58 Вт/ моС, 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/моС, 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 [24]. По природе энергии связывания влаги с веществом и величине энергетического уровня различаются три вида этой связи.

*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.

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

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

## 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 Менделеева-Клайперона:

, (2.33)

где *Mi* - масса i-го газа, в данном случае водяного пара, кг;

*R* - универсальная газовая постоянная, равная 8 314,41 Дж/ (кмоль. К);

*Т* - температура смеси в абсолютной шкале, К;

*V* - объем, занимаемый смесью газов, м3;

*μi* - молекулярный вес газа, кг/моль. Для водяного пара μп= 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 μв ≈ 29 кг/моль. *Барометрическое давление влажного воздуха* Рб, Па, складывается из парциального давления сухого воздуха есв, Па, и парциального давления пара еп, Па:

. (2.34)

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

Для характеристики меры увлажнения воздуха пользуются понятием *относительной влажности воздуха* φв, 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 Е. Величина относительной влажности φв равна отношению парциального давления водяного пара еп во влажном воздухе при определенных атмосферном давлении и температуре к давлению насыщения Е при тех же условиях:

, (2.35)

или φ,% . (2.36)

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

. (2.37)

Его значения определяют экспериментальным путем и приводят в специальных таблицах [1]. Кроме того, имеется ряд формул, аппроксимирующих зависимость Е от температуры. Например, формулы, приводимые в [1]:

над поверхностью льда при температуре от - 60 оС до 0 оС

, (2.38)

над поверхностью чистой воды при температуре от 0 оС до 83 оС

, (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 Е. По мере остывания воздуха при некоторой его температуре, когда еп станет равно Е, относительная влажность воздуха станет равной 100%, то есть воздух достигнет полного насыщения водяным паром. Температура tр, оС, 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 Е 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 τв ниже точки росы воздуха tр, 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* ωв,%, определяется отношением массы влаги, содержащейся в образце, к массе образца в сухом состоянии:

, (2.40)

где *М1* - масса влажного образца, кг,

*М2* - масса сухого образца, кг.

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

, (2.41)

где *V1* - объем влаги в образце, м3,*V2* - объем самого образца, м3.

Между весовой ωв и объемной влажностью ωо материала существует соотношение:

, (2.42)

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

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 [38]. Из рис.8 видно, что, например, для φ = 40% при сорбции пеносиликат имеет весовую влажность ωв=1,75%, а при десорбции ωв=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 [9].

## 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 *е, Па*. 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 *Е*. Не смотря на то, что относительная влажность внутреннего воздуха меньше относительной влажности наружного, парциальное давление водяных паров во внутреннем воздухе *ев* значительно превышает парциальное давление водяных паров в наружном воздухе *ен*. 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.

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 м2 площади, перпендикулярной потоку, при градиенте парциального давления водяного пара вдоль потока, равному 1 Па/м.

Расчетные значения μ приведены в справочных таблицах [32]. Причем для изотропных материалов μ не зависит от направления потока влаги, а для анизотропных (древесины, других материалов, имеющих волокнистую структуру или прессованных) значения μ приводятся в зависимости от соотношения направлений потока пара и волокон.

Паропроницаемость для теплоизоляционных материалов, как правило, рыхлых и с открытыми порами имеет большие значения, например, для минераловатных плит на синтетическом связующем при плотности ρ=50 кг/м3 коэффициент паропроницаемости равен μ=0,60 мг/ (ч. м. Па). Материалам большей плотности соответствует меньшее значение коэффициента паропроницаемости, например, тяжелый бетон на плотных заполнителях имеет μ=0,03 мг/ (ч. м. Па). Вместе с тем бывают исключения. Экструдированный пенополистирол, утеплитель с закрытыми порами, при плотности ρ=25 - 45 кг/м3 имеет μ=0,003 - 0,018 мг/ (ч. м. 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 [32] приводятся сопротивления паропроницанию и толщины этих слоев.

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

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

Таблица 2

Аналогия между процессами теплопередачи и влагопередачи при диффузии пара

|  |  |
| --- | --- |
| Тепловое поле | Влажностное поле |
| Температуравнутреннего воздуха *tв*, оС;внутренней поверхности *τв*, оС;на стыках слоев *ti*, оС;наружной поверхности *τн*, оС;наружного воздуха *tн*, оС.  | Парциальное давление водяных паров:во внутреннем воздухе *ев*, Па;на внутренней поверхности *евп*, Па;на стыках слоев *еi*, Па;наружной поверхности *енп*, Па;в наружном воздухе *ен*, Па.  |
| Теплопроводность материала*λ*, Вт/ (м. оС)  | *Паропроницаемость материала*μ, мг/ (ч. м. Па)  |
| Термическое сопротивление слоятолщиной δ, м,*RТ*=*δ/ λ*, м2. оС/Вт | *Сопротивление паропроницанию слоя* толщиной *δ*, м,*Rп=δ/ μ*, м2. ч. Па /мг (2.43)  |
| Коэффициенты теплоотдачина внутренней поверхности αв, Вт/ (м2. оС);на наружной поверхности αн, Вт/ (м2. оС).  | *Коэффициенты влагоотдачи*на внутренней поверхности βв, мг/ (ч. м2. Па);на наружной поверхности βн, мг/ (ч. м2. Па).  |
| Сопротивление теплоотдаче на поверхностях огражденияна внутренней Rв=1/αв, м2. оС/Вт;на наружной Rн=1/αн, м2. оС/Вт;  | *Сопротивление влагоотдаче на поверхностях ограждения*на внутренней Rп. в=1/βв, м2. ч. Па/мг; (2.44)на наружной Rп. н=1/βн, м2. ч. Па/мг. (2.45)  |
| Общее сопротивление теплопередаче огражденияRo=Rв+Σδ/ λ+Rн, м2. оС/Вт | *Общее сопротивление паропроницанию ограждения*Rо. п=Rп. в+Σδ/ λ+Rп. н, м2. ч. Па/мг (2.46)  |
| Плотность теплового потока через ограждениеq= (tв-tн) /Ro, Вт/м2 | *Плотность диффузионного потока влаги через ограждение*g= (eв-ен) /Rо. п, мг/ (ч. м2) (2.47)  |

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

*Общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции* (при диффузии пара) складывается из сопротивлений паропроницанию всех его слоев и сопротивлений влагообмену на его поверхностях, как это следует из выражения (2.43).

Коэффициент влагоотдачи, как правило, в инженерных расчетах общего сопротивления паропроницанию не применяется, в расчетах используют непосредственно сопротивления влагоотдаче на поверхностях, принимая их значения равными Rп. в= 0,0267 м2. ч. Па/мг, Rп. н,= 0,0052 м2. ч. Па/мг [4].

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

, (2.48)

где *Rп. в-х, Rп. н-х* - сопротивления паропроницанию, от точки х до соотвенственно внутреннего и наружного воздуха, м2. ч. Па/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 энергетическиого 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 паропроницание?

21. Что такое паропроницаемость?

22. Чему количественно равна паропроницаемость материала μ?

23. Что такое пароизоляция?

24. Физический смысл сопротивления паропроницанию слоя?

25. Что такое общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции?

26. Напишите формулу общего сопротивления паропроницанию ограждения.

27. Как определить парциальное давление водяных паров в воздухе при известных его температуре tв и относительной влажности φв?

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 eв и eн, если μ1> μ 2.

30. Начертите качественную картинку распределения парциального давления водяных паров в двухслойной стенке при известных давлениях в окружающих средах eв и eн, если μ1< μ 2.

31. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров на внутренней поверхности двухслойной стенки eвн. пов при известных давлениях в средах eв и eн, толщинах слоев δ1 и δ2, паропроницаниемостях μ1 и μ 2.

32. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров на наружной поверхности двухслойной стенки eн. пов при известных давлениях в средах eв и eн, толщинах слоев δ1 и δ2, паропроницаниемостях μ1 и μ2.

33. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров между слоями двухслойной стенки e при известных давлениях в средах eв и eн, толщинах слоев δ1 и δ2, паропроницаниемостях μ1 и μ2.

34. Напишите формулу для определения парциального давления водяных паров ex в любом сечении многослойной стенки при известных давлениях в средах eв и eн, толщинах слоев δi, паропроницаниемостях μi.

## 2.3 Воздухопроницаемость наружных ограждений

## 2.3.1 Основные положения

*Воздухопроницаемостью* называется свойство строительных материалов и ограждающизх конструкций пропускать сквозь себя поток воздуха, *воздухопроницаемостью* считают также расход воздуха в кг, который проходит через 1м2 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 [5], еще два вида фильтрации - *продольная и внутренняя.*

Вообще говоря, воздухопроницаемостью обладают все наружные ограждения, но в расчете теплопотерь обычно учитывается только инфильтрация через окна, балконные двери и витражи. Нормы плотности остальных ограждений исключают возможность сквозной воздухопроницаемости, ощутимо влияющей на тепловой баланс помещения.

Как уже было сказано в гл.2, для пароизоляции ограждающих конструкций с их внутренней стороны делается плотный слой. Этот слой обычно достаточно воздухонепроницаем для поперечной фильтрации. Однако, если с наружной стороны фасадный слой не плотный, может происходить продольная фильтрация, заключающаяся в том, что под воздействием ветра холодный наружный воздух проходит внутрь ограждающей конструкции и в другом месте выходит из нее. Этим вызываются дополнительные теплопотери.

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

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

Инфильтрация и эксфильтрация и, вообще, любая фильтрация воздуха возникают под воздействием *перепадов полных давлений воздуха* *∆P*, Па, с разных сторон ограждения.

То есть, *потенциалом переноса воздуха* через материалы и ограждающие конструкции является разность давлений воздуха изнутри здания и снаружи. Она объясняется, во-первых, различной плотностью холодного наружного воздуха и теплого внутреннего - *гравитационной составляющей* и, во-вторых, действием ветра, создающего положительное дополнительное давление в набегающем потоке с наветренной стороны и разрежение с подветренной - *ветровой составляющей*.

## 2.3.2 Разность давлений на наружной и внутренней поверхности ограждений

Известно, что в столбе газа статическое *гравитационное давление* переменно по высоте.

Гравитационное давление *Ргр*, Па, в любой точке наружного воздуха на высоте *h* от поверхности земли, равно

 (2.49)

где *Ратм* -атмосферное давление на уровне условного ноля отсчета, Па;

*g* - ускорение свободного падения, м/с2;

*ρн* - плотность наружного воздуха, кг/м3.

Ветровое давление Pветр, Па, в зависимости от направления ветра на разных поверхностях здания будет различным, что в расчетах учитывается аэродинамическим коэффициентом С, 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 *ρн. v2/2* 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 *kдин*, значения которого регламентированы СНиП 2.01.07-85\* [31]. Коэффициент *kдин*, 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

 (2.50)

где *ρн* - плотность наружного воздуха, кг/м3;

*v* - скорость ветра, м/с;

c - аэродинамический коэффициент на расчётном фасаде;

*kдин* - коэффициент учета изменения скоростного давления ветра в зависимости от высоты здания, принимаемый по [31].

По СНиП 2.01.07-85\* [31] для большинства зданий величина аэродинамического коэффициента на наветренной стороне равна c*н*=0,8, а на подветренной - c*з*= - 0,6.

Так как гравитационное и ветровое давления независимы друг от друга, для нахождения полного давления наружного воздуха *Рнар* на здание, их складывают:

 (2.51)

За условный ноль давления *Русл*, Па, по предложению В.П. Титова [35] 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).

, (2.52)

где *cз* - аэродинамический коэффициент, соответствующий подветренной стороне здания;

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

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

 (2.53)

На рис.10 показаны эпюры гравитационного *Ргр*, и ветрового Рветр давлений и уровень, на котором принят условный ноль давления Русл.

В каждом помещении создается свое полное избыточное внутреннее давление, которое складывается из давления, сформированного различным давлением на фасадах здания Рв, Па, и гравитационного давления *Ргр, в*, Па.

Так как в здании температура воздуха всех помещений приблизительно одинакова, внутреннее гравитационное давление зависит только от высоты центра помещения h:

 (2.54)

где *ρв*- плотность внутреннего воздуха, кг/м3.

Рис.10. Формирование воздушных потоков в многоэтажном здании с естественной вентиляцией

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

 (2.55)

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

Плотность воздуха ρ, кг/м3, может быть определена по вытекающей из (2.33) формуле:

, (2.56)

где t - температура воздуха.

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

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

 (2.57)

Второй, более громоздкий способ расчета величины Pв, 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:

, (2.58)

гдеc*н, cб, cз* - аэродинамические коэффициенты на наветренном, боковом и подветренном фасадах;

*Aн, Aб, Aз* - площади окон и витражей на наветренном, боковых и подветренном фасадах, м2.

В расчетах теплопотерь учитывается, что каждый фасад может быть наветренным. Следует обратить внимание на то, что величина внутреннего давления *Pв*, принимаемая по (2.58), 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 *Pв*, приближается к получаемой по (2.57). Таким образом, использование формулы (2.58) для расчета внутреннего давления оправдано в случаях, когда распределение световых проемов по фасадам явно неравномерно или когда рассматриваемое здание примыкает к соседнему, или один фасад либо его часть не имеют окон совсем.

Разность наружного и внутреннего давлений по разные стороны ограждения на наветренном фасаде на любой высоте *h* с учетом формулы (2.55) равна:

 (2.59)

Разность давлений *∆P* для окон одного фасада разных этажей будет отличаться только величиной гравитационного давления (первое слагаемое), зависящего от разности *Н-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

## 2.3.3 Воздухопроницаемость строительных материалов

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

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

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

Прямолинейный участок от 0 до точки *а* 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 маловоздухороницаемых материалах, напротив, движение воздуха по порам ламинарно и при довольно больших разностях давлений, поэтому зависимость *G* от *ΔР* линейна при любой разности давлений (линия 3). Во влажных материалах (кривая 4) при малых *ΔР*, меньших определенной минимальной разности давлений *ΔРмин*, 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 *ΔРмин*.

При ламинарном движении воздуха в порах материала справедлива зависимость

, (2.60)

где G - воздухопроницаемость ограждения или слоя материала, кг/ (м2. ч);

*i* - коэффициент воздухопроницаемости материала, кг/ (м. Па. ч);

*δ* - толщина слоя материала, м.

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

Величины коэффициента воздухопроницаемости для различных строительных материалов отличаются друг от друга значительно.

Например, для минеральной ваты i ≈ 0,044 кг/ (м. Па. ч), для неавтоклавного пенобетона i ≈ 5,3.10-4 кг/ (м. Па. ч), для сплошного бетона i ≈ 5,1.10-6 кг/ (м. Па. ч),

При турбулентном движении воздуха в формуле (2.60) следует заменить *ΔР* на *ΔРn*. При этом показатель степени *n* изменяется в пределах 0,5 - 1. Однако на практике формула (2.60) применяется и для турбулентного режима течения воздуха в порах материала.

В современной нормативной литературе не применяется понятия коэффициент воздухопроницаемости. Материалы и конструкции характеризуются *сопротивлением воздухопроницанию Rи,* кг/ (м. ч). при разности давлений по разные стороны ∆Ро=10 Па, которое при ламинарном движении воздуха находится по формуле:

, (2.61)

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

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

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

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

, (2.62)

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 сопротивление воздухопроницанию ограждающей конструкции?

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

13. Напишите формулу для определения сопротивления воздухопроницанию окна.