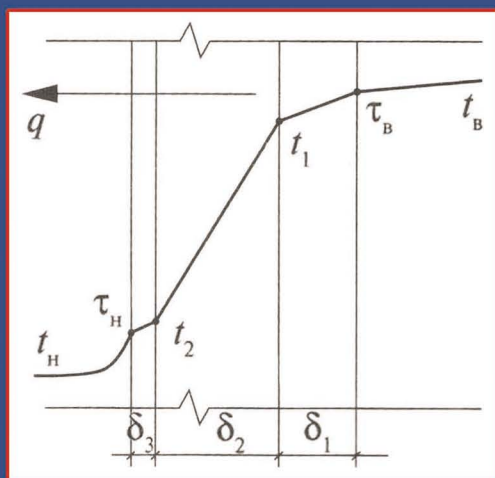


УЧЕБНИК XXI ВЕК

Е.Г. Малявина

ТЕПЛОФИЗИКА ЗДАНИЙ



Б
А
К
А
Л
А
В
Р



Е.Г. Малявина

ТЕПЛОФИЗИКА ЗДАНИЙ

Рекомендовано федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет» (МГСУ) в качестве учебного пособия для студентов ВПО, обучающихся по программе бакалавриата по направлению подготовки 270800 – «Строительство»



Издательство АСВ
Москва
2013

УДК 697
ББК 38.762
М18

Рецензенты:

зав. лабораторией строительной теплофизики
НИИСФ РААСН, д.т.н., проф., член – корр. РААСН *В.Г. Гагарин*;
профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции МГАКХиС,
д.т.н., проф. *А.И. Колесников*

Е.Г. Малявина

Теплофизика зданий: Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ,
2013. – 144 с.

ISBN 978-5-93093-967-5

Учебное пособие «Теплофизика зданий» к курсу «Теплогазо-снабжение и вентиляция» рассчитано на студентов квалификации – бакалавр строительных вузов, обучающихся по направлению подготовки 270800 «Строительство» и может быть полезно инженерам, занимающимся теплотехническим проектированием или теплотехнической оценкой запроектированных ограждающих конструкций здания.

Сведения, приведенные в учебном пособии, основываются на фундаментальной базе процессов, лежащих в основе теплотехнического проектирования элементов здания, и на действующих нормативах в этой области.

УДК 697
ББК 38.762
М18

ISBN 978-5-93093-967-5

© Малявина Е.Г., 2013
© Издательство АСВ, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
1.1. Цель и задачи курса.....	5
1.2. Предмет курса.....	5
1.3. Здание как единая энергетическая система	7
2. ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ НАРУЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ	8
2.1. Основы теплопередачи в здании	8
2.2. Влажностный режим ограждающих конструкций	24
2.3. Воздухопроницаемость через ограждающие конструкции	39
3. ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	47
3.1. Расчетные параметры наружной среды для теплотехнических расчетов	47
3.2. Расчетные значения параметров внутреннего микроклимата	51
3.3. Требуемое сопротивление теплопередаче наружного ограждения	53
3.4. Влияние влажностного режима наружного ограждения на его теплозащитные качества	58
3.5. Влияние воздухопроницаемости наружного ограждения на его теплозащитные качества	65
4. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ СЛОЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ	72
4.1. Основное дифференциальное уравнение и методы его решения	72
4.2. Метод конечных разностей	75
4.3. Приближенные инженерные методы	84
4.4. Электротепловая аналогия	92
5. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЯ И ОГРАЖДЕНИЯ	96
5.1. Основное дифференциальное уравнение теплопроводности	96

5.2. Методы решения задач нестационарной теплопередачи. Метод конечных разностей	96
5.3. Теплоустойчивость ограждения.....	98
5.4. Теплоустойчивость помещения	104
6. ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ	109
6.1. Лучистый теплообмен в помещении	109
6.2. Конвективный теплообмен в помещении	120
6.3. Общий теплообмен в помещении	127
7. ВЛИЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА КОМФОРТНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ПОМЕЩЕНИИ	131
7.1. Тепловой баланс человека	131
7.2. Основные понятия, относящиеся к микроклимату помещения	133
7.3. Условия комфортности температурной обстановки в помещении	137
Библиографический список литературы	140

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Цель и задачи курса

Учебное пособие по курсу «Теплофизика зданий» в рамках дисциплины «Теплогасоснабжение и вентиляция» предназначено для студентов-бакалавров строительных вузов, обучающихся по направлению подготовки 270800 «Строительство». Содержание учебного 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 тепловоздушного и влажностного режимов здания как к основе технологии обеспечения микроклимата.

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

В результате освоения курса 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.

1.2. Предмет курса

Теплофизика зданий (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. 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 поме-

щения от наружной среды или от неотапливаемых помещений (неотапливаемых техподполий, подвалов, чердаков, тамбуров и т.п.).

Несмотря на то что наука относится в основном к ограждающим конструкциям здания, для дисциплины теплогазоснабжение и вентиляция строительная теплофизика очень важна. Дело в том, что строительная теплофизика имеет дело с *теплозащитой здания*, т.е. в соответствии с [30] с теплозащитными свойствами совокупности наружных и внутренних ограждающих конструкций здания, обеспечивающими заданный уровень расхода тепловой энергии зданием, с воздухопроницаемостью ограждений и защитой их от переувлажнения. Таким образом, строительная теплофизика важна потому, что, во-первых, от теплотехнических качеств наружных ограждений зависят теплопотери здания, влияющие на мощность отопительных систем и расход теплоты ими за отопительный период. Во-вторых, влажностный режим наружных ограждений влияет на их теплозащиту, а следовательно, и 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 пяти 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 объектов недвижимости 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 теплозащитных 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 курсе «Теплофизика зданий»?
2. Что такое ограждение?
3. Что такое наружное ограждение?

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

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 газообразного вещества. Таким образом, теплопроводность – это теплообмен между частицами или элементами структуры материальной среды, находящимися в непосредственном соприкосновении друг с другом. При изучении теплопроводности вещество рассматривается как сплошная масса, его молекулярное строение игнорируется. В чистом виде теплопроводность встречается только в твердых телах, так как в жидких и газообразных средах практически невозможно обеспечить неподвижность вещества.

Большинство строительных материалов являются *пористыми телами*. В порах находится воздух, имеющий возможность двигаться, т.е. переносить теплоту конвекцией. Считается, что конвективной составляющей теплопроводности строительных материалов можно пренеб-

речь 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**, т.е. при постоянстве во времени всех характеристик процесса: теплового потока, температуры в каждой точке, теплофизических характеристик строительных материалов. Поэтому важно рассмотреть **процесс одномерной стационарной теплопроводности в однородном материале**, который описывается уравнением Фурье

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

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 м² площади, перпендикулярной направлению потока, при градиенте температуры вдоль потока, равном 1 °С/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·°С.

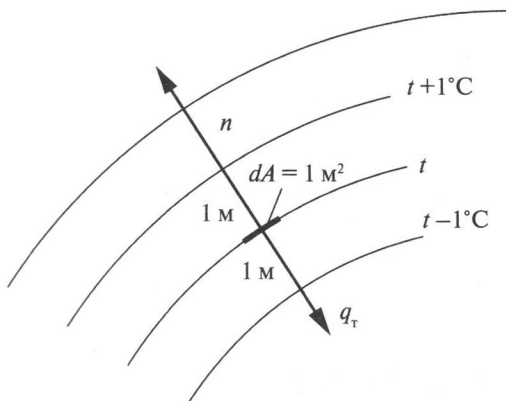


Рис. 1. Направления теплового потока и градиента температуры.
 _____ – изотермы; ----- – линии тока теплоты.

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 вещества (без пор) в зависимости от природы имеет теплопроводность от 0,1 Вт/м·°С (у пластмассы) до 14 Вт/м·°С (у кристаллических веществ при потоке теплоты вдоль кристаллической поверхности), в то время как воздух имеет теплопроводность около 0,026 Вт/м·°С. 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, $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$, имеют различные значения теплопроводности [38].

Таблица 1.

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

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

С уменьшением плотности материала его теплопроводность λ уменьшается, так как снижается влияние кондуктивной составляющей теплопроводности скелета материала, однако при этом возрастает влияние радиационной составляющей. Поэтому, уменьшение плотности ниже некоторого значения приводит к росту теплопроводности, т.е. существует некоторое значение плотности, при котором теплопроводность имеет минимальное значение. Существуют оценки того, что при 20 °С в порах диаметром 1 мм 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. Для пересчета значений теплопроводности материалов, полученных при температуре до 100 °С, на значения их при 0 °С служит эмпирическая формула О.Е. Власова [3]:

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

где λ_0 – теплопроводность материала при 0 °С;
 λ_t – теплопроводность материала при t °С;
 β – температурный коэффициент изменения теплопроводности, 1/°С, для различных материалов, равный около 0,0025 1/°С;
 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

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

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

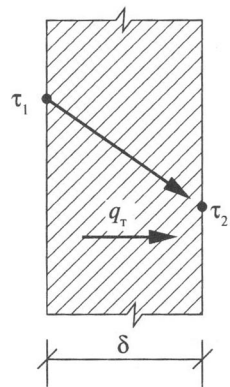


Рис. 2. Распределение температуры в плоской однородной стенке

Из выражения (2.3) следует, что распределение температуры по толщине стенки линейное. Величина δ/λ названа **термическим сопротивлением материального слоя** и обозначена R_T , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$:

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

Следовательно, тепловой поток q_T , $\text{Вт}/\text{м}^2$, через однородную плоскопараллельную стенку толщиной δ , м, из материала с теплопроводностью λ , $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°C}$, 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 $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

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 раз-

ности 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

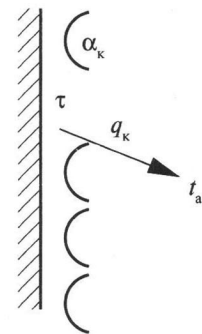


Рис. 3. Конвективный теплообмен стенки с воздухом

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

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.

Учебное пособие

Елена Георгиевна **Малявина**

ТЕПЛОФИЗИКА ЗДАНИЙ

Компьютерная верстка: *Д.А. Матвеев*
Редакторы: *В.Ш. Мерзлякова*
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Подписано к печати 20.02.13.
Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. 9 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

ООО «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26,
отдел реализации – оф. 511, тел., факс: (499)183-56-83,
e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>