



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Учебное пособие по дисциплине

«Основы обеспечения микроклимата зданий (включая теплофизику здания)»

Часть 1

Авторы
Скорик Т.А.,
Глазунова Е.К.

Ростов-на-Дону, 2017

Аннотация

В первой части курса «Основы обеспечения микроклимата зданий (включая теплофизику здания)» рассматриваются понятия «микроклимат помещения», факторы и процессы его формирования.

В разделе «Теплофизика зданий» излагаются базовые положения, определяющие тепловой, влажностный и воздушный режим здания и описание процессов теплообмена, происходящих на поверхности и в толще наружных ограждающих конструкций. Рассматриваются теплофизические основы проектирования ограждающих конструкций.

Предназначено для направления подготовки 08.03.01 «Строительство» профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Авторы

к.т.н., доцент кафедры
«Теплогазоснабжение и вентиляция»
Скорик Т.А.

к.т.н., доцент кафедры
«Теплогазоснабжение и вентиляция»
Глазунова Е.К.



Оглавление

Введение	4
1 Микроклимат помещений	6
1.1 Общие сведения	6
1.2 Санитарно-гигиенические и технологические требования к микроклимату	7
1.3 Факторы и процессы, формирующие микроклимат помещений	8
1.4 Тепловой комфорт для организма человека в помещении	11
1.5 Комфортное сочетание температуры, влажности и подвижности воздуха для человека. Оптимальные и допустимые микроклиматические условия	17
1.6 Воздушный комфорт для организма человека в помещении	24
1.7 Нормирование параметров микроклимата	26
1.8 Выбор расчетных параметров микроклимата	29
2 Влияние наружной среды на формирование микроклимата помещений	32
2.1 Характеристики наружного климата	32
2.2 Расчетные параметры наружного климата	39
2.3 Обеспеченность расчетных условий	40
3 Свойства влажного воздуха	43
4 Теплофизика зданий	52
4.1 Предмет строительной теплофизики, ее роль и значение дисциплины	52
4.2 Виды теплообмена. Теплообмен в помещении	53
4.3 Стационарная теплопередача через ограждающие конструкции	65
4.4 Основы нестационарной теплопередачи	91
4.5 Влажностное состояние ограждающих конструкций. Влажностный режим помещения	103
4.6 Воздухопроницаемость ограждающих конструкций	129
Библиографический список	143

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы обеспечения микроклимата зданий (включая теплофизику здания)» является базовой для изучения в будущем профессиональных дисциплин «Отопление», «Вентиляция», «Кондиционирование воздуха». В настоящее время всё большее значение уделяется качеству микроклимата, поэтому для обеспечения с помощью систем отопления, вентиляции и кондиционирования условий, необходимых для нормальной жизнедеятельности человека, необходимо изучить теоретическую основу происходящих в помещении процессов и факторов, формирующих микроклимат помещений, влияние внутренней среды на организм человека, состояние здоровья, работоспособность, правильно оценивать комфортность состояния человека.

В последние годы в нашей стране были существенно повышены требования к уровню тепловой защиты зданий и сооружений. Закон № 261 – ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности.» устанавливает требования к энергетической эффективности зданий, строений, сооружений, которые должны включать в себя в том числе требования к отдельным элементам, конструкциям зданий, строений, сооружений и к их свойствам, позволяющим исключить нерациональный расход энергетических ресурсов как в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта зданий, строений, сооружений, так и в процессе их эксплуатации.

Современные нормы по тепловой защите зданий установлены с целью проектирования зданий с рациональным использованием энергии. На это направлен комплекс архитектурных, строительных и инженерных решений. Наружные ограждения являются защитой помещений от наружных климатических воздействий и, так как они находятся между внутренним воздухом помещений и наружной средой, то следует знать, какое воздействие оказывает на них и внутренняя среда и наружный климат, а также какими должны быть физико-технические свойства ограждающих конструкций. Основной предмет строительной теплофизики – это обоснование и выбор наружных ограждающих конструкций зданий, которые обеспечивают заданный температурно-влажностный режим помещений, экономию энергоресурсов и долговечность самих конструкций ограждения.

Предлагаемое пособие дает представление о связи комфортной тепловой среды в зданиях и использовании конструктивных решений, направленных на экономию энергетических ресур-

сов; знания об основных понятиях и законах процессов теплопередачи, паро- и воздухопроницаемости, о теплофизических свойствах строительных материалов; основу расчетов, позволяющих выбирать ограждающие конструкции зданий, обеспечивающие необходимый уровень тепловой защиты.

В учебном пособии рассмотрена лишь первая часть вопросов, составляющих изучаемый предмет, при этом учтены основные положения, представленные в базовой литературе [1,2,3] по темам дисциплины.

1 МИКРОКЛИМАТ ПОМЕЩЕНИЙ

1.1 Общие сведения

Большую часть времени человек в процессе своей жизнедеятельности проводит в помещениях. Поэтому самочувствие, состояние здоровья, трудоспособность определяются взаимодействием человека с окружающей его внутренней средой. В гигиене труда имеется понятие «психофизическое состояние человека», которое отражает связь между здоровьем человека и влиянием окружающей среды. Человек будет чувствовать себя комфортно, если энергозатраты организма на адаптацию к окружающей среде минимальны. По определению английского ученого Бедфорда «состояние комфорта человека – это субъективное чувство, возникающее у людей под влиянием комплексных воздействий: акустических; факторов, влияющих на обоняние и дыхание; зрение; влияние цветов, температуры, влажности и подвижности воздуха; вибрации, а также особых факторов (например, ионизации, т.е. содержания в воздухе заряженных атомов и молекул, действия солнечных лучей); ощущений безопасности; гигиенических факторов; психологической совместимостью людей (групповым поведением) и т.д.».

На практике условия считают комфортными, когда соответствующее объективное чувство возникает не менее, чем у 80% людей.

По определению [1] **«внутренняя среда помещения, проявляющаяся в большом числе факторов воздействия на человека, называется микроклиматом помещения».**

Наибольшее влияние на физиологическое состояние человека оказывают тепловые условия и состав внутреннего воздуха. **Тепловые условия** характеризуются сочетанием таких параметров, как температура $t, ^\circ\text{C}$, относительная влажность $\phi, \%$, и подвижность $v, \text{ м/с}$, воздуха, а также радиационная температура помещения $t_r, ^\circ\text{C}$. **Состав воздуха** оценивается концентрацией углекислоты, вредных газов, паров, пыли. Восприятие воздуха характеризуется также озono-ионным составом и запахами.

1.2 Санитарно-гигиенические и технологические требования к микроклимату

Санитарно-гигиенические требования к микроклимату помещений – это требования, которым должен соответствовать микроклимат помещения для нормальной жизни и деятельности человека, т.е. определяемые самочувствием человека.

Есть технологические процессы в разных отраслях промышленности, которые могут протекать лишь при определенных метеорологических условиях, например, в полиграфической промышленности, текстильной, пищевой, радиоэлектронной и др. Специальные условия должны быть созданы и поддерживаться в помещениях для хранения сельхозпродукции, в животноводческих помещениях. Строгий температурно-влажностный режим необходим в зданиях для сохранности культурных и исторических ценностей. В некоторых случаях к внутренней среде помещений предъявляются наиболее жесткие требования, например, в особо чистых помещениях, в операционных. Те требования к микроклимату помещений, которые необходимы для нормального протекания технологического процесса, или обусловлены другими специфическими особенностями, являются **технологические требования**.

На большинстве производственных предприятий в технологическом процессе участвуют люди, т.е. необходимо обеспечение **комфортно-технологических условий** в производственных помещениях.

Далее будут рассматриваться санитарно-гигиенические требования к микроклимату. Технологические требования к микроклимату излагаются в определенных отраслевых документах.

В соответствии с [4] под **микроклиматом помещений** следует понимать «метеорологические условия внутренней среды помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения».

1.3 Факторы и процессы, формирующие микроклимат помещений.

Условия формирования микроклимата в помещении

Параметры микроклимата в помещении формируются под влиянием возмущающих и регулирующих воздействий (рисунок 1.1):

- наружной среды;
- технологических процессов внутри помещения;
- систем отопления, вентиляции и кондиционирования.

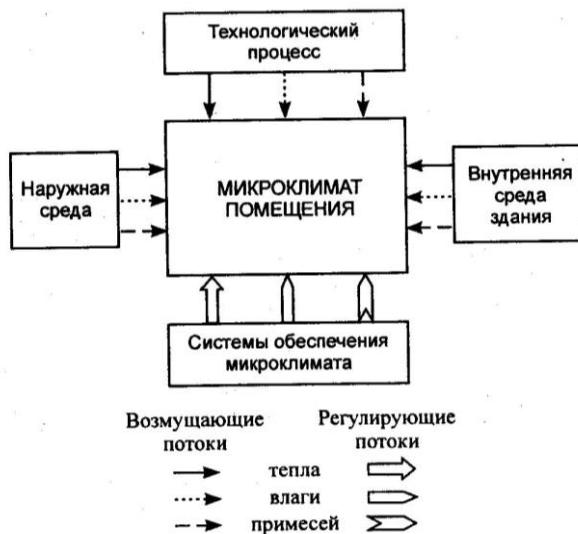


Рисунок 1.1 – Структурная схема формирования микроклимата

Воздействие **наружной среды** на микроклимат внутри помещений происходит через ограждающие конструкции (теплопередача, влагопроницаемость, воздухопроницаемость) и за счет внутренних связей между помещениями (перемещение потоков воздуха, теплообмен). Поэтому архитектурно-планировочные решения, которые заключаются в тепловой защите и планировочной композиции здания, являются **пассивными факторами** формирования микроклимата.

Технологический процесс на формирование микроклимата имеет значительное влияние, т.к. может сопровождаться выделением в помещение теплоты, влаги, пыли, вредных газов и

паров. Они оказывают воздействие непосредственно на воздух помещения.

Мероприятия, заключающиеся в совершенствовании технологических процессов, (применении менее вредных процессов и материалов, герметизации оборудования, автоматизации технологических процессов и т.п.), снижают отрицательную роль технологических процессов в формировании микроклимата.

Итак, микроклимат в помещении формируется под воздействием на него **потоков теплоты, влаги, газов**, которые поступают в помещение через наружные ограждения из наружной среды, через внутренние ограждения из соседних помещений, от внутренних источников, действующих в технологических процессах. Контактная с воздухом помещения, они изменяют параметры микроклимата. Это **возмущающие воздействия**. Противодействующими возмущающим воздействиям являются системы отопления, вентиляции и кондиционирования, которые также подают в помещение потоки теплоты, влаги и свежего воздуха. Эти потоки приводят параметры микроклимата к нормируемому, т.е. оказывают **регулирующее воздействие**.

Процессы формирования микроклимата – это процессы трансформации потоков теплоты, влаги и воздуха, в результате которых происходит изменение параметров микроклимата.

Основные три группы физических процессов формирования микроклимата:

- процессы теплообмена;
- процессы перемещения потоков воздуха;
- процессы молекулярной диффузии газовых примесей в воздухе помещения.

Теплообмен в помещении обусловлен поступлением лучистых и конвективных потоков. **Конвективный теплообмен** протекает между поверхностями ограждений, оборудования и воздухом помещений. Также в помещение поступают конвективные потоки с нагретым или охлажденным воздухом от систем вентиляции и кондиционирования. **Лучистый теплообмен** происходит между поверхностями, обращенными в помещение.

Поступление теплоты в помещение происходит от технологического оборудования, людей, искусственного освещения, солнечной радиации, приборов системы отопления.

Стоки теплоты из помещения – это теплотопотери через наружные ограждения и расход теплоты на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха.

Перемещение потоков воздуха происходит между помещениями здания; в пределах одного помещения; через наружные ограждения поступает наружный воздух и удаляется внутренний.

Перемещение воздуха между помещениями *по вертикали* вызвано вертикальным изменением разности давлений снаружи и внутри здания, обусловленное разностью плотностей наружного и внутреннего воздуха. *Горизонтальное* перемещение возникает в результате действия ветра на здание: наружный воздух поступает в помещение через неплотности в наружных ограждениях (**инфильтруется**) с наветренной стороны здания; внутренний воздух выходит наружу (**эксфильтруется**) на заветренной стороне.

Внутри помещения (рисунок 1.2) движение потоков возникает около нагретых поверхностей (технологическое оборудование, отопительные приборы) и около охлажденных поверхностей (наружных ограждений) – это конвективные струи. Наибольшее влияние на аэродинамику помещения оказывает действие **вентиляционных струй**.

В результате перемещения воздуха в помещении формируются поля скоростей, концентраций вредных веществ, температур, влажности.

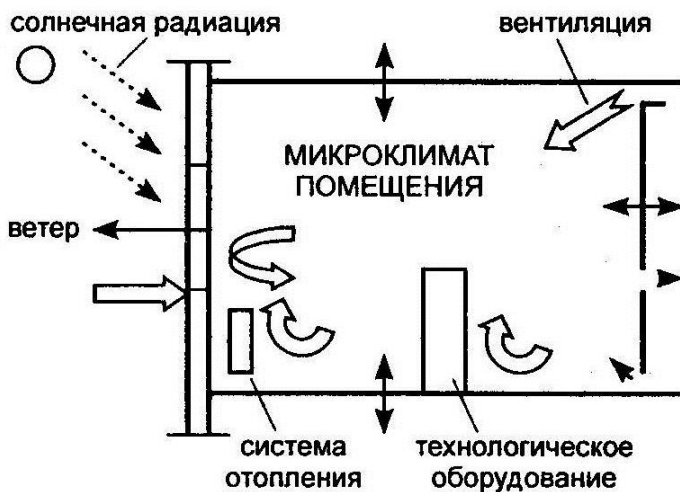


Рисунок 1.2 – Перемещение потоков в помещении

Молекулярная диффузия паров и газов в воздухе происходит за счет разности парциального давления вблизи источника вредности и в удалении от него. Вследствие подвижности воздуха скорость распространения вредных примесей в объеме помещения во много раз превышает скорость диффузии, поэтому этот процесс не оказывает существенного влияния на формирование параметров микроклимата.

Регулирующее воздействие **систем отопления, вентиляции и кондиционирования** заключается в снижении вредного воздействия наружной среды и технологических процессов.

Отопление обеспечивает искусственное, с помощью специальной установки или системы обогревание помещений здания для компенсации теплотерь и поддержания в них температурных параметров на уровне, определяемом условиями теплового комфорта для находящихся в помещении людей или требования-ми технологических процессов, протекающих в производственных помещениях.

Вентиляция создает обмен воздуха в помещениях для удаления избытков теплоты, влаги, вредных и других веществ с целью обеспечения **допустимых** метеорологических условий и чистоты воздуха в обслуживаемой или рабочей зоне.

Кондиционирование воздуха – автоматическое поддержание в закрытых помещениях всех или отдельных параметров воздуха (температуры, относительной влажности, чистоты, скорости движения) с целью обеспечения главным образом **оптимальных** метеорологических условий, наиболее благоприятных для самочувствия людей, ведения технологического процесса, обеспечения сохранности ценностей.

1.4 Тепловой комфорт для организма человека в помещении

Теплообмен человека с окружающей средой

В организме человека постоянно протекают процессы поглощения, превращения, хранения и выделения продуктов жизнедеятельности. Это **метаболические процессы**, которые сопровождаются круговоротом энергии, заключающемся в окислении питательных веществ, обмене веществ теплопродукции и механической работе мышц. Кислород из вдыхаемого человеком воздуха в организме преобразуется в углекислый газ с выделением теплоты. Чем выше тяжесть выполняемой человеком работы, тем больше потребление кислорода, выше интенсивность этого процесса. Поэтому гигиенисты количество вырабатываемой

организмом энергии устанавливают по объему потребляемого кислорода.

Человек будет чувствовать себя комфортно, т.е. не будет ощущать ни холода, ни перегрева в том случае, если от него нормально (без форсирования теплоотдачи) будет отводиться столько энергии, сколько вырабатывает его организм, т.е. комфортное теплоощущение человека зависит от баланса между теплогенерацией и теплопотерями в окружающую среду. В этом случае внутренняя температура тела человека поддерживается на уровне $36,6 - 36,8$ °С.

Для оценки **вырабатываемой в организме энергии** введен показатель "met". Активность человека, находящегося в расслабленном состоянии либо в положении сидя, характеризуют $1 \text{ met} = 58 \text{ Вт/м}^2$; в наклонном положении в наличии опоры – $0,8 \text{ met}$; в сидячем положении при выполнении офисной или домашней работы – $1,2 \text{ met}$ и т.д.

Выделение теплоты в окружающую среду с учетом теплоизоляционных свойств одежды характеризуют показателем "clo" (clothing – одежда). 1 clo равен $0,155 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ и соответствует рабочей одежде, состоящей из легкого нижнего белья, носок, рубашки, брюк, костюма, туфель.

Энергетический баланс человека зависит от многих факторов: возраста и пола человека, здоровья, теплозащитных свойств одежды, тепловой обстановки в помещении, физической деятельности. С ростом физической нагрузки потребление кислорода возрастает и метаболическая тепловая энергия также увеличивается. В таблице 1.1 приводятся показатели met при различных видах деятельности человека.

Таблица 1.1 – Производимая внутри организма человека метаболическая теплота при различной физической деятельности

Вид деятельности человека	Производимая тепловая энергия	
	Вт/м ²	met
Сон	40	0,7
Покой, положение сидя	55	1,0
Чтение, положение сидя	60	1,0
Расслабление, положение стоя	70	1,2
Легкий труд	70	1,2
Ходьба в помещении	100	1,7
Труд средней интенсивности	120	2,1
Танец	140–255	2,4–4,4
Тяжелый труд	235–280	4,0–4,8

Данные разных авторов по энергетическому балансу иногда расходятся, но в нашей стране **в производственных помещениях** в зависимости от тяжести выполняемых работ [5] на основе интенсивности энергозатрат разграничивает следующие категории работ:

- к категории Ia относятся работы с интенсивностью энергозатрат до 139 Вт, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением (ряд профессий на предприятиях точного приборо- и машиностроения, на часовом, швейном производствах, в сфере управления и т.п.);

- к категории Ib относятся работы с интенсивностью энергозатрат 140-174 Вт, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением (ряд профессий в полиграфической промышленности, на предприятиях связи, контролеры, мастера в различных видах производства и т.п.);

- к категории IIa относятся работы с интенсивностью энергозатрат 175-232 Вт, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения (ряд профессий в механосборочных цехах машиностроительных предприятий, в прядильно-ткацком производстве и т.п.);

- к категории IIб относятся работы с интенсивностью 233-290 Вт, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим

напряжением (ряд профессий в механизированных литейных, прокатных, кузнечных, термических, сварочных цехах машиностроительных и металлургических предприятий и т.п.);

– к категории III относятся работы с интенсивностью энергозатрат более 290 Вт, связанные с постоянными передвижениями, перемещением и переноской значительных (свыше 10 кг) тяжестей и требующие больших физических усилий (ряд профессий в кузнечных цехах с ручной ковкой, литейных цехах с ручной набивкой и заливкой опок машиностроительных и металлургических предприятий и т.п.).

В **общественных зданиях** учет физической нагрузки человека производится делением помещений на категории в зависимости от вида деятельности человека [6].

Помещения 1 категории – помещения, в которых люди в положении лежа или сидя находятся в состоянии покоя и отдыха.

Помещения 2 категории – помещения, в которых люди заняты умственным трудом, учебой.

Помещения 3а категории – помещения с массовым пребыванием людей, в которых люди находятся преимущественно в положении сидя без уличной одежды.

Помещения 3б категории – помещения с массовым пребыванием людей, в которых люди находятся преимущественно в положении сидя в уличной одежде.

Помещения 3в категории – помещения с массовым пребыванием людей, в которых люди находятся преимущественно в положении стоя без уличной одежды.

Помещения 4 категории – помещения для занятий подвижными видами спорта.

Помещения 5 категории – помещения, в которых люди находятся в полураздетом виде (раздевалки, процедурные кабинеты, кабинеты врачей и т.п.).

Помещения 6 категории – помещения с временным пребыванием людей (вестибюли, гардеробные, коридоры, лестницы, санузлы, курительные, кладовые).

Очень незначительная часть вырабатываемой в организме человека энергии превращается в механическую. По данным датского ученого Оле Фангера максимально возможная доля может составлять около 20%. Малая часть энергии расходуется на обеспечение внутриобменных процессов, значит большую ее часть надо удалять.

Отдача теплоты организмом человека происходит:

– **излучением (радиационный теплообмен)**; по дан-

ным разных авторов доля теплоотдачи излучением составляет 42 – 50%;

- **конвекцией**; (25 – 35%);
- **теплопроводностью**; (до 15%);
- **испарением и с выдыхаемым воздухом**; (20 – 25%);

Радиационный теплообмен происходит между человеком и поверхностями ограждений. Его величина и направление зависят от температуры поверхности одежды и открытых частей тела человека, а также температур и расположения окружающих поверхностей. При температурах поверхностей ниже температуры поверхности человека излучение теплоты происходит в направлении окружающих человека поверхностей. При высоких температурах окружающих поверхностей (свыше 30 °С) теплоотдача излучением полностью прекращается, а при более высоких температурах идет в обратном направлении – от горячих поверхностей к человеку.

Конвективный теплообмен происходит между телом человека и омывающим его воздухом и зависит от температуры и подвижности окружающего воздуха, атмосферного давления.

Теплообмен **теплопроводностью** осуществляется при непосредственном контакте тела с окружающими предметами и зависит от вида и теплопроводности одежды, температуры воздуха.

Испарение влаги, выводимой потовыми железами на поверхность кожи, и дыхании (скрытая теплоотдача) осуществляется за счет разности парциальных давлений водяных паров в насыщенном слое у поверхности тела и в воздухе помещения и зависит от температуры, скорости и относительной влажности воздуха. При этом расходуется теплота организма, идущая на испарение влаги.

Если при взаимодействии человека с окружающей средой его теплопродукция и теплоотдача не сбалансированы, то наблюдаются накопление или дефицит теплоты, приводящие к перегреванию или переохлаждению организма.

Сложный механизм автоматической **терморегуляции** человека позволяет в определенных пределах обеспечивать баланс теплоты. Процессы регулирования тепловыделений осуществляются в основном тремя способами: биохимическим путем, путем изменения интенсивности кровообращения и интенсивности пототделения.

Терморегуляция биохимическим путем заключается в изме-

нении интенсивности происходящих в организме окислительных процессов.

Терморегуляция путем изменения интенсивности кровообращения заключается в способности организма регулировать подачу крови (которая является в данном случае теплоносителем) от внутренних органов к поверхности тела путем сужения или расширения кровеносных сосудов. Температура кожного покрова человека зависит от параметров окружающего воздуха и, в среднем, равна 33 °С. При понижении температуры окружающей среды кожа охлаждается, что приводит к сужению капиллярных сосудов и соответственно сокращению объема крови, циркулирующей под поверхностью кожи, в результате чего уменьшается теплоотдача телом. Всё это говорит об увеличении термического сопротивления кожного покрова. При повышении температуры окружающей среды сосуды расширяются, количество притекающей к коже крови увеличивается, в результате чего увеличивается теплоотдача и уменьшается термическое сопротивление кожи.

Терморегуляция путем изменения интенсивности потовыделения заключается в изменении процесса теплоотдачи за счет испарения влаги.

При температуре воздуха ниже температуры кожи человека количество испаряемой влаги остается практически постоянным. При повышении температуры влаготдача увеличивается. Потоотделение начинается при температуре 28–29°С. При повышении температуры более 34°С теплоотдача испарением остается единственным способом теплоотдачи.

Благодаря автоматической терморегуляции организма человек приспосабливается к изменению параметров окружающего воздуха, однако эта терморегуляция эффективна лишь при медленных и малых отклонениях параметров от нормальных, необходимых для хорошего самочувствия. При больших и быстрых отклонениях параметров воздушной среды нарушаются физиологические функции организма: терморегуляция, обмен веществ, работа сердечно-сосудистой и нервной системы и т.п. При этом могут наблюдаться и серьезные отклонения в организме человека, Например, у людей, попавших в условия «перегрева», повышается температура тела, резко снижается работоспособность (рисунок 1.3), появляется раздражительность и т.д.

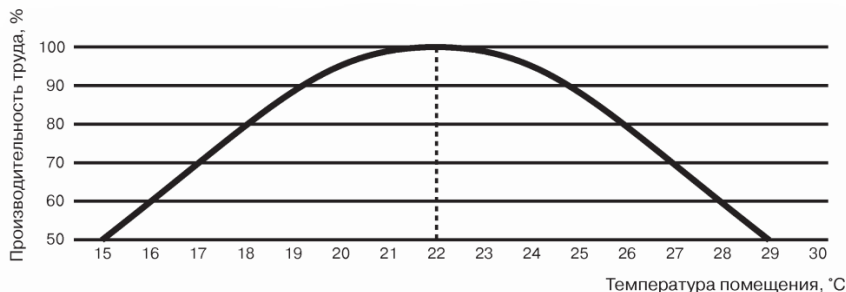


Рисунок 1.3 – Влияние температуры помещения на производительность труда человека

1.5 Комфортное сочетание температуры, влажности и подвижности воздуха для человека. Оптимальные и допустимые микроклиматические условия.

В 1884 г. впервые русский ученый И.И.Флавицкий пришел к выводу о необходимости комплексного учета влияния параметров воздушной среды на человека. Это означает, что человек ощущает тепловой комфорт, если **параметры микроклимата находятся в определенном сочетании**. В настоящее время широко известны работы датчанина П.О.Фангера, которые учитывают влияние на человека не только температуры, влажности и подвижности воздуха, но и лучистой теплоты, термического сопротивления одежды и т.д.

Изменение метеорологических условий приводит к значительным изменениям в соотношении отдельных составляющих теплоотдачи человека и, следовательно в его самочувствии.

Одним из факторов, влияющих на комфортное состояние человека, является **влажность**. Человек выделяет влагу, количество которой составляет около 900 г в сутки. Примерно одна треть этого количества выделяется через легкие, остальная – через кожу. Возмещается влага не только выпитыванием ее из жидкостей и пищи, но и при выдыхании через легкие. **Низкая относительная влажность** вдыхаемого воздуха приводит к пересыханию слизистых оболочек, в результате чего сокращается подвижность эпителия, ухудшаются фильтрационные свойства слизистой оболочки верхних дыхательных путей по отношению к пыли и микрофлоре, что способствует проникновению в легкие бактерий и вирусов. Низкая энтальпия воздуха, зависящая от влагосодержания, сказывается на состоянии кожи человека, которая

становится сухой, шероховатой и может даже растрескиваться. **Высокая относительная влажность воздуха** в помещении приводит к тому, что воздух будет поглощать водяной пар, выделяемый человеком, до тех пор, пока не достигнет состояния насыщения, при котором влага начнет выпадать в виде конденсата. Дополнительное количество водяного пара, выделяемого человеком, окружающий воздух поглотить не может, начинается обильное потение и утомление, т.к. дыхание становится все более тяжелым, и организм, пытаясь компенсировать потерю влаги, выделяемой при чрезмерном потении, поглощает все больше и больше жидкости. Если высокая влажность сочетается с высокой температурой воздуха, то это еще больше ухудшает теплообмен человека с окружающей средой, что приводит к перегреву организма. Оптимальная относительная влажность воздуха находится в диапазоне от 40 до 60%.

П.О. Фангером выявлено также, что людям нравится ощущение прохлады в дыхательных путях при каждом вдохе. Высокая энтальпия воздуха, которая зависит от влагосодержания, означает низкую способность вдыхаемого воздуха охлаждать слизистые оболочки дыхательных путей путем конвекции и испарения, что ухудшает ощущения, вызываемые тепловлажностным состоянием вдыхаемого воздуха.

Важное значение в создании теплового комфорта для человека в помещении имеет **подвижность воздуха**. При отсутствии движения воздуха или чрезмерно малом движении вокруг тела человека образуется тонкая неподвижная воздушная оболочка, которая быстро насыщается парами воды, принимает его температуру и уменьшает теплоотдачу. Легкое движение воздуха сдувает обволакивающий человека насыщенный водяными парами и перегретый слой воздуха. Если температура окружающей среды ниже температуры тела человека, то с повышением подвижности потеря теплоты человеком возрастает. Для сохранения комфортных условий необходимо либо увеличивать относительную влажность воздуха, уменьшив тем самым испарение, либо увеличить его температуру. В то же время чрезмерная подвижность воздуха, особенно в условиях охлаждения, вызывает ощущение сквозняка, т.к. увеличивается теплопотеря конвекцией и испарением, что способствует быстрому охлаждению организма. Влияние подвижности воздуха на комфортное состояние человека необходимо рассматривать в совокупности с температурой и относительной влажностью воздуха.

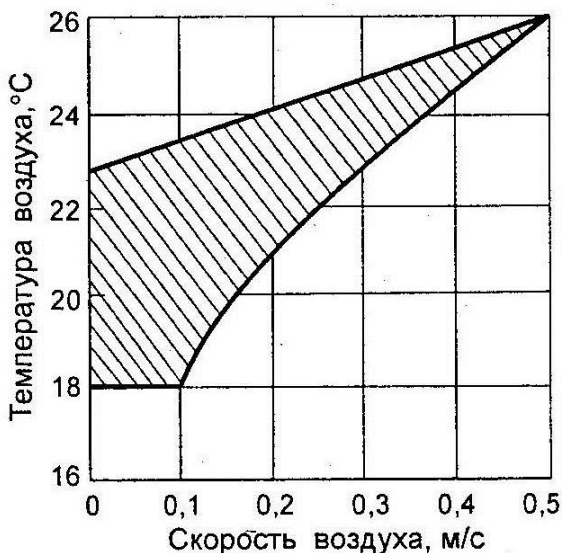


Рисунок 1.4 – Область комфортного сочетания подвижности и температуры.

Установлено, что в создании комфорта для человека имеет значение **изменение скорости движения** воздуха. При отвечающих требованиям комфорта скорости и температуре воздуха человек может ощущать дискомфорт, если скорость будет пульсировать. Это объясняется особенностью восприимчивости к переменам органов чувств человека.

Условия комфортности температурной обстановки

Ощущение температурного комфорта, помимо других факторов, зависит от температуры окружающего воздуха и температуры поверхностей, обращенных в помещение. В качестве обобщающего температурного показателя введено понятие **«температура помещения»**. Когда температуры воздуха $t_{\text{в}}$ и поверхностей $t_{\text{р}}$ равны, в помещении имеется температурный уровень или **«температура помещения»** $t_{\text{п}}$, равная этой температуре, т.е. $t_{\text{п}} = t_{\text{в}} = t_{\text{р}}$.

Для приблизительного соблюдения условий температурного комфорта понижению температуры воздуха должно соответствовать определенное повышение температуры поверхностей. Поэтому удобно характеризовать условия в помещении **«темпера-**

турой помещения», понимая под ней такую одинаковую температуру воздуха и поверхностей, при которой теплоотдача человеком будет такая же, как и при заданных неравных температурах воздуха и поверхностей, т.е. это комплексный показатель радиационной температуры и температуры воздуха помещения.

При скорости движения воздуха до 0,2 м/с ее определяют по формуле

$$t_n = \frac{t_в + t_R}{2},$$

при скорости движения воздуха от 0,2 до 0,6 м/с по формуле

$$t_n = 0,6t_в + 0,4t_R,$$

где $t_в$ – температура воздуха в помещении, °С;

t_R – радиационная температура, °С;

Радиационная температура помещения – осредненная по площади температура внутренних поверхностей ограждений помещения и отопительных приборов. Определяется по формуле

$$t_R = \frac{\sum A_i t_i}{\sum A_i},$$

где A_i – площадь внутренней поверхности ограждений и отопительных приборов, м² ;

t_i – температура внутренней поверхности ограждений и отопительных приборов, °С.

Комфортное сочетание t_n , $t_в$, и t_R в помещении можно определить двумя условиями комфортности.

Первое условие комфортности температурной обстановки устанавливает зону сочетаний температуры воздуха в помещении и радиационной температуры помещения, при которых человек, находясь в середине помещения (обслуживаемой зоны), не испытывает чувства перегревания или переохлаждения.

Для *холодного периода* это условие записывают в виде

$$t_n = 1,57t_n - 0,57t_в \pm 1,5,$$

где t_n – нормируемое значение, °С;

Для *теплого периода*

$$t_R = 1,57t_n - 0,5t_b \pm 1,5$$

С помощью уравнения можно определить, какая должна быть температура воздуха, если известны радиационная температура и назначение помещения. Если имеет место значительная разница между температурой воздуха и радиационной температурой, что бывает при панельно-лучистом или воздушном отоплении, то нормируемыми значениями следует считать t_n .

Кроме общего теплового баланса не самочувствие человека влияют условия, в которых находятся отдельные части тела. Голова человека чувствительнее к радиационному перегреву и переохлаждению, а для ног важны температура поверхности пола, с которой они непосредственно соприкасаются, и наличие холодных токов воздуха вдоль пола.

Второе условие комфортности определяет допустимые температуры нагретых и охлажденных поверхностей при нахождении человека на границах обслуживаемой зоны помещения, т.е. в непосредственной близости от этих поверхностей.

Для предупреждения радиационного перегревания или переохлаждения человека в *холодный период* года поверхности *потолка и стен* могут быть **нагреты** до допустимой температуры

$$t_{\text{наг.}} \leq 19,2 + \frac{8,7}{\varphi},$$

или **охлаждены** до допустимой температуры

$$t_{\text{охл.}} \geq 23 - \frac{5}{\varphi},$$

где φ – коэффициент облученности с поверхности головы человека на охлажденную или нагретую поверхность.

$$\varphi = 1 - 0,8 \frac{y}{l},$$

где y – расстояние от головы человека до поверхности;
 l – осредненный размер поверхности (при известной площади A_n , равный $\sqrt{A_n}$).

В *теплый период* года температура нагретых поверхностей

должна быть не более

$$t_{\text{наг.}} \leq 29,3 + \frac{2,7}{\varphi}$$

Допустимая температура *нагретого пола* принимается в зависимости от назначения и особенностей режима работы помещения. В большинстве случаев температура поверхности нагретого пола не должна превышать 22 – 26 °С. Температура *холодного пола* зимой может быть ниже температуры воздуха не более, чем на 2 – 2,5 °С.

Для учета **комплексного влияния** параметров окружающей среды на самочувствие человека введено понятие «**эквивалентно-эффективная температура**» – это такая температура, которая эквивалентна тепловому воздействию температуры воздуха, относительной влажности и подвижности. Эквивалентно-эффективную температуру определяют по диаграмме, представленной на рисунке 1.5.

Субъективные тепловые ощущения человека в большей или меньшей степени отличаются от нормативных среднестатистических показателей микроклимата в помещении. Неудовлетворенность может являться результатом теплого или прохладного дискомфорта тела в целом, который характеризует ожидаемым значением теплоощущения PMV (Predicted Mean Vote) и прогнозируемым процентом неудовлетворенности PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Субъективное состояние психологического теплоощущения человека П.О. Фангер предлагает оценивать следующими ранговыми оценками PMV:

Холодно	Прохладно	Слегка прохладно	Нормально	Слегка тепло	Тепло	Жарко
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

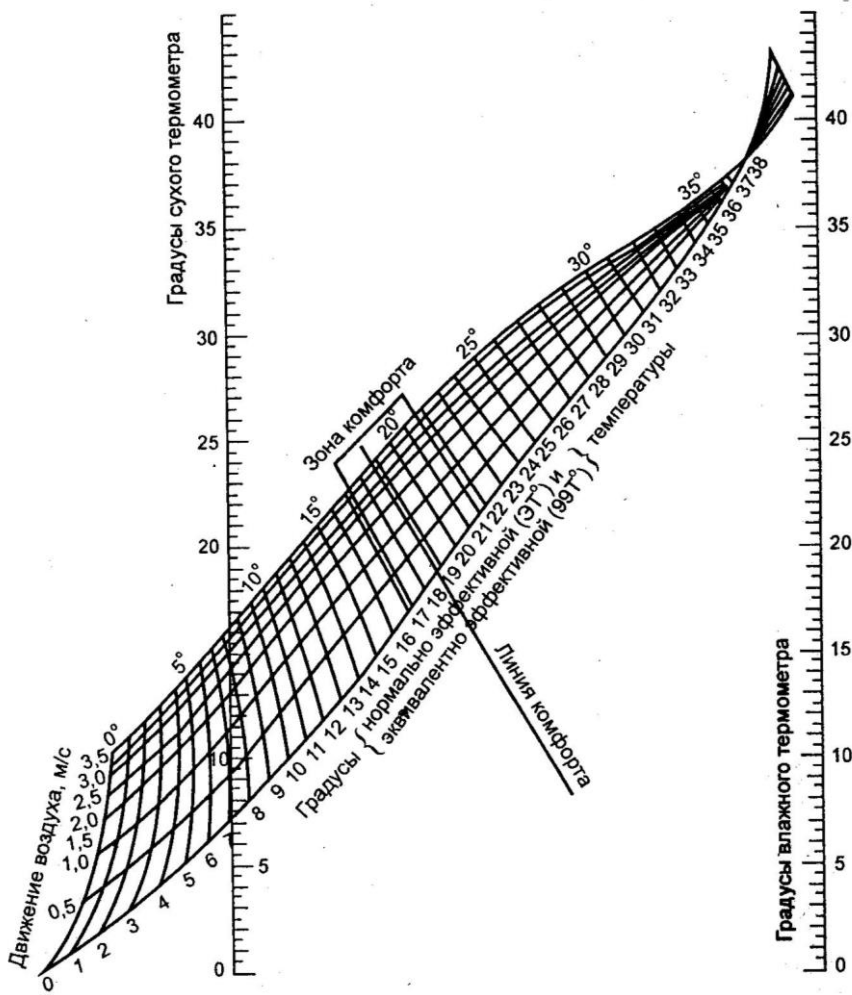


Рисунок 1.5 – Номограмма эквивалентно-эффективных температур

Для определения PMV предлагается следующая формула, полученная на основании экспериментов

$$PMV = 0,41 \exp\left(-0,049 \frac{M}{F_T}\right) + 0,037 \Delta q,$$

где M – метаболическая теплота (теплопродукция, энергозатраты) человека, величина которой зависит от тяжести выполняемых работ, Вт;

F_T – расчетная площадь поверхности взрослого человека, принимается равной $1,75 \text{ м}^2$;

Δq – избыточная (недостаточная) теплота человека, которая может быть либо положительной, либо отрицательной, т. е. тело человека либо накапливает теплоту, либо отдает больше чем получает, Вт/м².

Сочетания перечисленных параметров являются исходными при проектировании зданий и систем обеспечения микроклимата. При этом различают **оптимальные** микроклиматические условия и **допустимые** микроклиматические условия.

В [4] даны следующие определения этих понятий.

Оптимальные микроклиматические условия это такие сочетания количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального теплового состояния организма без напряжения механизмов терморегуляции. Они обеспечивают ощущение теплового комфорта и создают предпосылки для высокого уровня трудоспособности.

Допустимые микроклиматические условия это сочетания количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать преходящие и быстро нормализующиеся изменения теплового состояния организма, сопровождающиеся напряжением механизмов терморегуляции, не выходящим за пределы физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникает повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут наблюдаться дискомфортные теплоощущения, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности.

1.6 Воздушный комфорт для организма человека в помещении.

Воздушный комфорт человек ощущает при определенном составе воздуха, отсутствии вредных примесей, запахов.

Нарушение воздушного комфорта обуславливается:

- накоплением антропоксинов;

- деструкцией полимерных материалов в помещении;
- фоновым загрязнением наружного воздуха, поступающего в помещения;
- деструкцией наружного воздуха при обработке в системах вентиляции и кондиционирования.

В помещениях производственных зданий в воздух могут попадать различные загрязняющие вещества, которые выделяются при проведении технологических процессов – **«вредности»**. Это производственная пыль, газы и пары вредных веществ. Физиологическое воздействие зависит от токсичности, концентрации в воздухе помещений и времени пребывания там людей. Под концентрацией вредных веществ понимается их масса в единице объема воздуха (мг/м^3 , мг/л).

Вредные газы и пары образуются при сгорании топлива (оксид углерода, окислы азота), выделяются при проведении окрасочных работ (пары растворителей), при применении чистящих бытовых веществ (летучие химические соединения). К числу наиболее часто встречающихся вредных веществ, сопровождающих технологические процессы, относятся сернистый газ, формальдегид, пары свинца, ртути, синильной кислоты и другие.

В результате механической обработки изделий, применения сыпучих материалов, горения и возгонки в воздух помещений попадает различные **пыли**, дымы.

Попадая в организм человека через дыхательные пути, кожу, пищеварительный тракт, газы и пары вредных веществ могут вызвать профессиональные отравления. Физиологическое воздействие зависит от токсичности, концентрации в воздухе помещений и времени пребывания там людей.

Имеются и **бактериологические загрязнения** – это органическая пыль животного и растительного происхождения, бактерии, плесень, табачный дым; в процессе жизнедеятельности человека выделяется комплекс веществ – **антропоксинов**.

Дискомфорт человека может быть вызван наличием в воздухе помещения неприятных **запахов**, выделяемых человеческим телом, кухонных запахов, духов, органических веществ.

Для хорошего самочувствия человека важен **озоно-ионный** состав воздуха. Отрицательные ионы кислорода положительно отражаются на самочувствии человека, причем легкие ионы предпочтительнее, чем тяжелые. Но при обработке воздуха в кондиционерах происходит деструкция озono-ионного состава, в результате чего содержание легких отрицательных ионов в воздухе помещения сокращается в 8 раз, а содержание озона в по-

мещении в 30 – 100 раз меньше, чем в наружном воздухе.

Вредные выделения делят на однонаправленные и разнонаправленные. **Однонаправленные** вещества воздействуют на один или одну и ту же группу органов. В случае выделения **разнонаправленных** веществ каждое воздействует на определенный орган или группу органов.

1.7 Нормирование параметров микроклимата

Нормирование параметров микроклимата осуществляется для различных зданий и сооружений, которые в зависимости от характера жизнедеятельности человека, от вида технологических процессов, происходящих в них, и основных требований строительных норм и правил разбиты по их назначению на четыре основные группы: жилые здания, общественные здания и сооружения, административные и бытовые здания, производственные здания.

Показатели микроклимата в помещениях регламентируются нормативными документами, используемыми для проектирования соответствующих зданий и сооружений: сводами правил (СП), санитарными правилами и нормами (СанПиН), межгосударственными стандартами (ГОСТ), отраслевыми документами.

Общие требования, предъявляемые при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования к состоянию воздушной среды в помещениях различного назначения регламентируются [4,7,]. Также они изложены в [8].

Для **жилых и общественных** зданий [6] регламентирует следующие параметры, характеризующие микроклимат помещений:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- результирующая температура помещения;
- локальная асимметрия результирующей температуры.

Для помещений **производственных** зданий [5] устанавливает следующие показатели, характеризующие микроклимат:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- температура поверхностей;
- интенсивность теплового облучения, q , Вт/м².

Кроме того для интегральной оценки тепловой нагрузки среды на рабочих местах реко- мендуется учитывать индекс

тепловой нагрузки среды (ТНС – индекс), под которым понимают сочетанное действие на организм человека параметров микроклимата (температура, относительная влажность, скорость движения воздуха, тепловое облучение), выраженное одночисловым показателем в °С.

Параметры микроклимата устанавливаются для обслуживаемой зоны помещения (зоны обитания) в общественных и жилых зданиях и для рабочей зоны производственных помещений.

Обслуживаемая зона помещения (зона обитания) – пространство в помещении, ограниченное плоскостями, параллельными полу и стенам: на высоте 0,1 и 2,0 м над уровнем пола для людей стоящих илидвигающихся и высотой 1,5 м над уровнем пола для сидящих людей (но не ближе, чем на 1 м от потолка при потолочном отоплении), на расстоянии 0,5 м от внутренних поверхностей наружных и внутренних стен, окон и отопительных приборов.

Рабочая зона – пространство над уровнем пола или рабочей площадки высотой 2 м при выполнении работы стоя или 1,5 м – при выполнении работы сидя, на которых находятся места постоянного (более 50% времени или более 2 ч непрерывно) или временного (непостоянного) пребывания работающих.

Нормативными документами устанавливается **оптимальные** и **допустимые** микроклиматические условия в помещении для холодного и теплого периода года в зависимости от классификации помещений по категориям для жилых и общественных зданий и от категорий работ в производственных помещениях.

Холодный период года – период, характеризующийся среднесуточной температурой наружного воздуха, равной 10°C и ниже.

Теплый период года – период года, характеризующийся среднесуточной температурой наружного воздуха выше 10°C.

Параметры наружного воздуха для **переходных условий** года следует принимать 10 °С и удельную энтальпию 26,5 кДж/кг.

В соответствии с [5] оптимальные величины показателей микроклимата необходимо соблюдать на рабочих местах производственных помещений, на которых выполняются работы операторского типа, связанные с нервно-эмоциональным напряжением.

Допустимые величины показателей микроклимата в производственных помещениях устанавливаются в тех случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины.

Нормативные требования к чистоте воздуха устанавливает [4]. Необходимая чистота воздуха в рабочей зоне обеспечивается тем, что концентрация в воздухе рабочей зоны вредных веществ не должна превышать предельно допустимые концентрации (ПДК), установленные [4] и [9].

Под **предельно допустимыми концентрациями** вредных веществ в воздухе рабочей зоны понимают такие концентрации, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 часов или при другой продолжительности, но не более 41 ч в неделю, в течение всего рабочего стажа не могут вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений.

Если в воздухе рабочей зоны содержатся одновременно несколько вредных веществ **разно**направленного действия, ПДК остаются такими же, как и при изолированном воздействии. Если **одно**направленного действия, то сумма отношений фактических концентраций каждого из них ($K_1, K_2 \dots$) в воздухе и их ПДК ($ПДК_1, ПДК_2 \dots$) не должна превышать единицы, т.е. должно выполняться условие:

$$\frac{K_1}{ПДК_1} + \frac{K_2}{ПДК_2} + \dots \leq 1$$

1.8 Выбор расчетных параметров микроклимата

В соответствии с указаниями [8] численные значения нормируемых параметров микроклимата помещений при проектировании **отоплении и вентиляции помещений** (кроме помещений, для которых метеорологические условия установлены другими нормативными документами) следует принимать, как правило, по [4, 5, 6, 7] для обеспечения параметров воздуха в пределах **допустимых** норм в обслуживаемой или рабочей зоне помещений (на постоянных и непостоянных рабочих местах):

- в **холодный** период года в обслуживаемой зоне **жилых** помещений температуру воздуха — минимальную из оптимальных температур по [6];

- в **холодный** период года в обслуживаемой или рабочей зоне **жилых зданий (кроме жилых помещений)**, а также **общественных и административно-бытовых** зданий или в рабочей зоне **производственных** помещений температуру воздуха — минимальную из допустимых температур при отсутствии избытков явной теплоты (далее — теплоты) в помещениях; экономически целесообразную температуру воздуха в пределах допустимых норм в помещениях с избытками теплоты. В производственных помещениях площадью более 50 м² на одного работающего следует обеспечивать расчетную температуру воздуха только на постоянных рабочих местах и более низкую (но не ниже 10 °С) температуру воздуха — на непостоянных рабочих местах;

- в **теплый** период года в обслуживаемой или рабочей зоне помещений **при наличии избытков теплоты** — температуру воздуха в пределах допустимых температур, но не более чем на 3 °С для **общественных и административно-бытовых** помещений и не более чем на 4 °С для **производственных** помещений выше расчетной температуры наружного воздуха (параметры А) и не более максимально допустимой температуры по [8, приложение А], а **при отсутствии избытков теплоты** — температуру воздуха в пределах допустимых температур.

- скорость движения воздуха — в пределах допустимых норм;

- относительную влажность воздуха — в пределах допустимых норм (при отсутствии специальных требований) по заданию на проектирование;

Параметры микроклимата или один из параметров допускается принимать в пределах оптимальных норм вместо допустимых, если это экономически обосновано, или по заданию на про-

ектирование.

Если допустимые нормы микроклимата невозможно обеспечить в рабочей или обслуживаемой зоне по производственным или экономическим условиям, то на постоянных рабочих местах следует предусматривать душирование воздухом, охлаждающие или нагревающие панели, местные кондиционеры, передвижные установки и др.

В **холодный** период года в помещениях отапливаемых зданий, кроме помещений, для которых параметры воздуха установлены другими нормативными документами, когда они не используются и в нерабочее время, можно принимать температуру воздуха ниже нормируемой, но не ниже:

- 15 °С — в жилых помещениях;
- 12 °С — в общественных и административно-бытовых помещениях;
- 5 °С — в производственных помещениях

Нормируемую температуру следует обеспечить к началу использования помещения или к началу работы.

В **теплый** период года метеорологические условия **не нормируются** в помещениях:

- жилых зданий;
- общественных, административно-бытовых и производственных в периоды, когда они не используются и в нерабочее время при отсутствии технологических требований к температурному режиму помещений;

Параметры микроклимата **при кондиционировании помещений** (кроме помещений, для которых метеорологические условия установлены другими нормативными документами или заданием на проектирование) следует предусматривать для обеспечения параметров воздуха в пределах оптимальных норм:

- в обслуживаемой зоне жилых, общественных и административно-бытовых помещений – по [6, (раздел 3)] и [7];
- в рабочей зоне производственных помещений или отдельных их участков, а также на рабочих местах производственных помещений, на которых выполняются работы операторского типа, связанные с нервно-эмоциональным напряжением – по [4] и [5].

Относительную влажность воздуха в кондиционируемых помещениях допускается не обеспечивать по заданию на проектирование.

В местностях с расчетной температурой наружного воздуха в **теплый** период года (по параметрам Б) 30 °С и более темпера-

туру воздуха **в кондиционируемых помещениях** следует принимать на $0,4$ °С выше указанной в [6] и [4] на каждый градус превышения температуры наружного воздуха сверх температуры 30 °С, увеличивая также соответственно скорость движения воздуха на $0,1$ м/с на каждый градус превышения температуры наружного воздуха. При этом скорость движения воздуха в помещениях в указанных условиях должна быть не более $0,5$ м/с.

Один из параметров микроклимата допускается принимать в пределах допустимых норм вместо оптимальных при согласовании с органом санитарно-эпидемиологического надзора и по заданию на проектирование.

Качество воздуха в помещениях жилых и общественных зданий следует обеспечивать согласно [6] и [10] необходимой величиной воздухообмена в помещениях.

Для **детских учреждений, больниц и поликлиник** следует принимать **оптимальные** показатели качества воздуха.

Для **жилых и общественных зданий** следует принимать, как правило, **допустимые** показатели качества воздуха. Оптимальные показатели воздуха для указанных зданий допускается принимать по заданию на проектирование.

2 ВЛИЯНИЕ НАРУЖНОЙ СРЕДЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ

2.1 Характеристики наружного климата

Условия и пути создания микроклимата в помещении, необходимого для жизни и деятельности человека, зависят от целого ряда факторов, в том числе от условий природной среды, в которой находится здание, в частности, от **атмосферных** условий. Разнообразие и сезонная изменчивость этих условий формируют такое понятие как **климат**. Для ограниченной территории, имеющей свои особенности, – это **микроклимат местности**. Для искусственной среды помещений в зданиях, как было сказано выше, – это микроклимат помещений. **И климат и микроклимат – это комплекс значений определенных параметров в определенном пространстве.**

Наружные конструкции зданий, находясь между внутренней и наружной средой, подвергаются воздействию каждой из них, поэтому при решении задачи создания микроклимата в помещении, в системе «*микроклимат местности – ограждение – микроклимат помещения*» (рисунок 2.1) должны быть определены возможные климатические воздействия, а также физико-технические свойства ограждающих конструкций.

Существует большое количество характеристик климата. В зависимости от целей использования их подразделяют на **общие** и **специальные**. К числу **общих** относят температуру и влажность воздуха, ветер, давление, облачность, осадки. **Специальные** параметры предназначены для решения практических задач, т.е. задачи конкретной отрасли, например сельского хозяйства, строительства и др.

Количественные значения климатических показателей изменяются под влиянием многочисленных и трудно учитываемых факторов (географических, солнечной радиации, атмосферной циркуляции в разные часы, сутки, месяцы и др.), поэтому для описания климатических показателей в климатологии используются методы теории вероятностей и математической статистики.

Средние значения (суточные, месячные, годовые) определяются обычно для характеристики температуры, влажности воздуха, скорости ветра, атмосферного давления и т.п.

Крайние значения существенно отличаются от многолетних средних, они указывают на аномалии климатических процессов. Это:

- **абсолютные экстремумы**, которые наблюдались хотя бы один раз за длительный период;
- **средние из годовых экстремальных** величин;
- **средние экстремумы** за месяц, т.е. средние значения из максимумов и минимумов за каждые сутки.

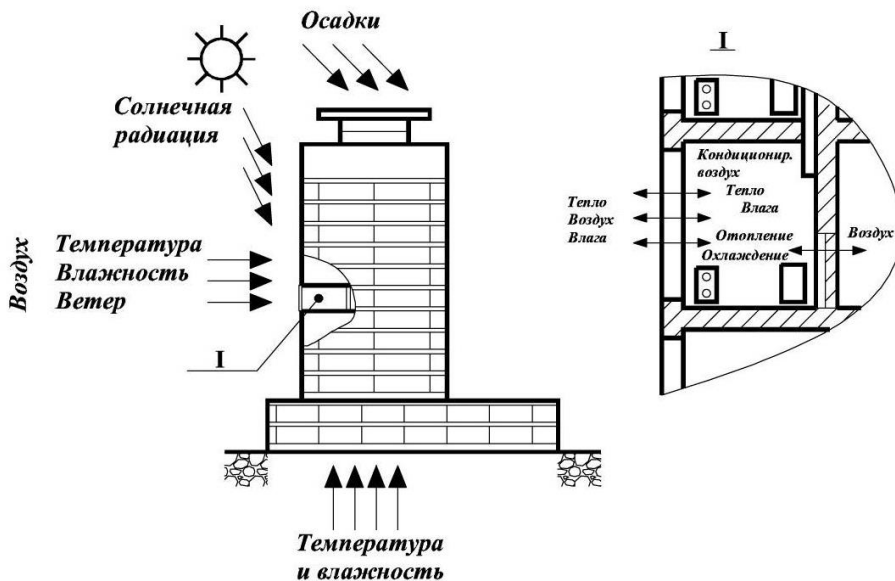


Рисунок 2.1 – Взаимодействие климата и микроклимата помещения

Амплитуда колебаний в климатологии – это разность между максимальным и минимальным значениями параметра. Если она получена по абсолютным экстремумам, то называется *абсолютной амплитудой*; если она получена по разности между средними максимальными и минимальными значениями, то называется *средней суточной амплитудой*.

В климатологии широко применяется расчет повторяемости атмосферных явлений.

Повторяемость – это частота или статистическая вероятность события. Вероятность того, что значение климатического параметра не превзойдет какого-то определенного (заданного, интересующего) значения, в климатологии называют **обеспеченностью**.

Результаты обобщения метеорологических наблюдений публикуются в виде справочных таблиц, климатических карт, различного рода диаграмм и номограмм, благодаря чему представители различных отраслей народного хозяйства имеют возможность отобрать необходимые для них климатические показатели. Большинство используемых в строительстве климатических показателей представлены [11].

Кратко ознакомимся с теми из них, которые используются при проектировании зданий для обеспечения в них требуемых микроклиматических условий.

Температурные параметры воздуха

Все температурные параметры воздуха, приводятся в [11] в градусах Цельсия и локализованы по множеству населенных пунктов, в которых расположены метеорологические станции.

Средняя температура воздуха по месяцам и за год.

Характеризует температурный режим отдельных месяцев и всего года с обеспеченностью 0,5 за 50...80-летний период наблюдений.

Абсолютные минимальная и максимальная температуры воздуха. Устанавливаются по данным последних 50...80 лет всего периода наблюдений. Обеспеченность этих показателей близка к 1,0

Температура воздуха наиболее холодных суток и наиболее холодной пятидневки. Значения этих показателей приводятся с обеспеченностью 0,98 и 0,92.

Основным показателем **холодного периода** года является *изменение* показателя температуры наружного воздуха t_{ext} . В разных климатических зонах и в разные годы изменения температуры в течение холодного периода могут быть различными, но имеется установившаяся закономерность в постоянном понижении температуры воздуха по мере приближения к наиболее холодному периоду.

Характерная расчетная кривая изменения t_{ext} в период резкого похолодания выглядит следующим образом (рисунок 2.2).

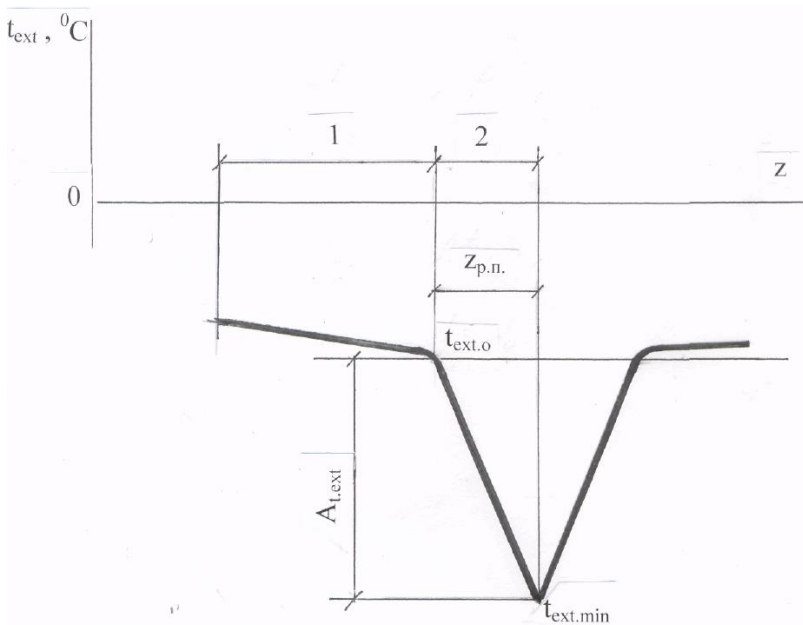


Рисунок 2.2 – Характерная расчетная кривая изменения температуры наружного воздуха в период резкого похолодания.

$t_{\text{ext.o}}$ – температура начала периода резкого похолодания;

$t_{\text{ext.min}}$ – минимальная температура; $A_{t.\text{ext}}$ – амплитуда изменения температуры от $t_{\text{ext.o}}$ до $t_{\text{ext.min}}$;

Сначала имеет место сравнительно медленное равномерное снижение температуры до начала резкого похолодания (участок 1), затем резкое понижение температуры (участок 2) с последующим повышением.

На участке 1 распределение температур в сечение ограждения можно считать стационарным, а при быстром похолодании (участок 2) поток становится нестационарным и для его расчета необходимо иметь динамику изменения температуры, т.е. $t_{\text{ext.o}}$, $t_{\text{ext.min}}$, $A_{t.\text{ext}}$, $Z_{\text{p.n}}$.

Для каждого географического пункта в СП даны следующие значения температур холодного периода:

- $t_{\text{ext.1}}$ – средняя температура наиболее холодных суток при коэффициенте обеспеченности $k_{\text{об.}} = 0,98$ и $k_{\text{об.}} = 0,92$;
- $t_{\text{ext.5}}$ – средняя температура наиболее холодной пятидневки при $k_{\text{об.}} = 0,98$ и $k_{\text{об.}} = 0,92$

- $t_{\text{ext.min}}$ – абсолютная минимальная температура;
- $A_{t.\text{ext}}$ – средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца, °С.

Средняя температура наиболее холодных суток близка к средней минимальной температуре; средняя же температура нескольких суток подряд ($t_{\text{ext. 5}}$) оказывается гораздо выше суток ($t_{\text{ext.1}}$).

Продолжительность периодов со средней суточной температурой воздуха равной и меньшей 8 и 10 °С. Для определения этих периодов строится кривая годового хода температур, затем по этому графику определяются даты устойчивого перехода средних суточных температур воздуха через значения 8 и 10 °С и по разности между соответствующими датами определяется продолжительность того или иного периода в сутках.

Средняя температура наиболее холодного периода. Определяется как средняя температура периода, составляющего 15% от общей продолжительности со средней суточной температурой воздуха, равной и меньше 8 °С, но не более 25 дней.

Средние и максимальные амплитуды температуры воздуха за сутки.

Средняя суточная амплитуда рассчитывается по ежедневным данным наблюдений за 25 лет как разность между суточным максимумом и минимумом температуры воздуха. Имеет обеспеченность 0,5. Максимальная суточная амплитуда определяется как наибольшее значение разности между суточным максимумом и минимумом температуры воздуха за период наблюдений. Ее обеспеченность близка к 1.

Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца. Рассчитывается как средняя месячная величина ежедневных максимальных значений температуры воздуха этого месяца за 50-летний период наблюдений. Обеспеченность составляет 0,5. Показатель характеризует наиболее теплую часть суток.

В числе температурных параметров **теплого периода** в [11] приводятся также:

- температура воздуха обеспеченностью 0,95;
- температура воздуха обеспеченностью 0,98;
- максимальная суточная амплитуда температуры воздуха в июле.

Солнечная радиация

Электромагнитное и корпускулярное излучение солнца – солнечная радиация по направлению к земле частично отражается облачным слоем, рассеивается и отражается воздухом атмосферы и загрязняющими его примесями, а частично в виде прямых солнечных лучей достигает поверхности земли и расположенных на ней объектов. Поэтому различают прямую и рассеянную солнечную радиацию.

Прямая солнечная радиация (инсоляция) – часть солнечной радиации, поступающая на поверхность земли в виде пучка параллельных лучей, исходящих непосредственно от видимого диска солнца.

Рассеянная солнечная радиация – часть солнечной радиации, поступающей от всего небосвода после рассеивания в атмосфере. Рассеянная радиация практически равномерно облучает участки земли, имеющие разные уклоны.

Поток теплоты ($\text{Вт}/\text{м}^2$), принесенной прямой солнечной радиацией для каждой точки на горизонтальной поверхности земли определяется продолжительностью и углом падения на неё солнечных лучей.

В [11] приведена суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на **горизонтальную** поверхность при безоблачном небе, $\text{МДж}/\text{м}^2$, для каждого месяца на различных географических широтах (40, 44, 48, 52, 56, 60, 64, 68 град. с.ш.). Также приводится суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на **вертикальную** поверхность различной ориентации по сторонам света для каждого месяца на тех же географических широтах.

Влажность воздуха. Осадки

В [11] для различных населенных пунктов

а) **для холодного периода** приводятся:

- средняя месячная относительная влажность наиболее холодного месяца, %;
- средняя месячная относительная влажность в 15 ч наиболее холодного месяца, %;
- количество осадков за ноябрь – март, мм.

б) **для теплого периода** приводятся:

- средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее теплого месяца, % ;
- средняя месячная относительная влажность воздуха в 15 ч наиболее теплого месяца, %;
- количество осадков за апрель – октябрь, мм;
- суточный максимум осадков, мм .

Также в [11] приводится среднее месячное и годовое парциальное давление водяного пара, ГПа.

Количество осадков, увлажняющих строительные конструкции, относительная влажность воздуха, количество солнечной радиации, падающей на конструкции и годовые колебания температуры наружного воздуха, характеризующиеся их амплитудой, оказывают совместное воздействие на влажностное состояние ограждающих конструкций здания.

На основании количественных соотношений этих факторов территории строительства делятся на три зоны: сухая, нормальная, влажная [12].

Параметры ветрового режима

От направления и скорости ветра зависит не только увлажнение ограждающих конструкций здания, но и общий температурно-влажностный режим территории. Ветер оказывает и силовые воздействия на конструкции зданий. На больших высотах скорость ветра увеличивается.

В [11] приводятся значения **повторяемости** направления ветра, его **средней скорости** по этим направлениям (С СВ, В, ЮВ, Ю, ЮГ, З, СЗ), максимальные и минимальные значения из средних скоростей по указанным румбам для наиболее холодного месяца (январь) зимнего периода и наиболее теплого месяца (июль) летнего периода.

Строительно-климатическое районирование территории страны

На основе анализа распределения средней месячной температуры воздуха в январе и июле, средней скорости ветра за три зимних месяца, среднемесячной относительной влажности воздуха в июле разработано **строительно-климатическое районирование** территории России и других стран, входящих ранее в состав СССР. Выделено четыре района, каждый из которых подразделен на несколько подрайонов. Расположение районов и подрайонов на территории приведено на карте [11].

2.2 Расчетные параметры наружного климата

Параметры наружного воздуха: температура, удельная энтальпия, скорость ветра приводятся для различных городов России в теплый и холодный периоды года в [11] – параметры А и Б.

Расчетными параметрами наружного воздуха для холодного периода для всех населенных пунктов приняты:

- параметры А – средняя температура наиболее холодного периода и энтальпия (теплосодержание) воздуха, соответствующая этой температуре и средней относительной влажности воздуха самого холодного месяца в 13 часов;
- параметры Б – средняя температура наиболее холодной пятидневки и энтальпия (теплосодержание) воздуха, соответствующая этой температуре и средней относительной влажности воздуха самого холодного месяца в 13 часов;

Расчетными параметрами наружного воздуха для теплого периода года для всех населенных пунктов приняты:

- параметры А – температура и энтальпия (теплосодержание) воздуха, соответствующая средней температуре самого жаркого месяца в 13 часов во всех населенных пунктах, кроме ряда пунктов в северных районах страны, где расчетная температура на 1,5 – 2,5 °С выше средней температуры самого жаркого месяца;
- параметры Б – средняя температура воздуха и энтальпия (теплосодержание) воздуха, соответствующая максимальной летней температуре.

Численные значения параметров наружного воздуха следует принимать по [11] в соответствии с таблицей 10.1– Климатические параметры для проектирования отопления, вентиляции и кондиционирования, а также по таблице 3.1 – Климатические параметры холодного периода года и таблице 4.1– Климатические параметры теплого периода года.

В соответствии с требованиями [8] заданные параметры микроклимата и чистоту воздуха в помещениях жилых, общественных, административно-бытовых и производственных зданий следует обеспечивать в пределах расчетных параметров наружного воздуха для соответствующих районов строительства по [11]:

- параметров А – для систем вентиляции и воздушного душирования в теплый периода года;
- параметров Б – для систем отопления, вентиляции и воздушного душирования в холодный период года, а также для

систем кондиционирования в теплый и холодного периоды года.

Параметры наружного воздуха для переходных условий следует принимать: температуру 10 °С и удельную энтальпию 26,5 кДж/кг или параметры наружного воздуха, при которых изменяются режимы работы оборудования, потребляющего теплоту и холод.

Параметры наружного воздуха для зданий сельскохозяйственного назначения, если они не установлены специальными строительными и технологическими нормами следует принимать:

- параметры А – для систем вентиляции и кондиционирования в теплый и холодный периоды года;
- параметры Б – для систем отопления в холодный период года.

По заданию на проектирование допускается принимать параметры наружного воздуха более низкие в холодный период года и более высокие в теплый период года, чем вышеуказанные расчетные параметры наружного воздуха.

2.3 Обеспеченность расчетных условий

Расчетные параметры микроклимата в помещении должны быть обеспечены в течение всего периода пребывания человека в нем независимо от меняющихся погодных условий. То есть кроме санитарно-гигиенических и технологических требований, определяющих необходимый уровень внутренних условий, важными являются требования, обеспечивающие надежность их поддержания, т.е. требования к их **обеспеченности**.

Обеспеченность расчетных условий показывает, как часто или насколько продолжительными могут быть отклонения внутренних условий от заданных расчетных.

Обеспеченность условий характеризуется коэффициентом обеспеченности $K_{об}$:

а) по числу случаев отклонения от расчетных условий в долях единицы

$$K_{об.п} = \frac{N - n}{N},$$

где N – количество дней, суток, лет работы установки;
 n – число случаев отклонений метеорологических условий в помещении от расчетных в период наибольшего похолодания.

Например, если $k_{об.} = 0,92$, это значит, что только в 8 зимах из ста в периоды наибольших похолоданий могут быть отклонения условий в помещении от расчетных.

б) по продолжительности возможных отклонений от расчетных условий

$$k_{об.z} = \frac{z - \Delta z}{z},$$

где Δz – продолжительность отклонения;
 z – общая продолжительность работы установки.

Для различных помещений обеспеченность расчетных внутренних условий может быть различна. Например, в зданиях с кратковременным пребыванием людей обеспеченность может быть низкой, а в зданиях с жестким техническим режимом должна быть высокая обеспеченность. Т.е. для помещения должны задаваться не только расчетные внутренние условия, но и показатели степени их обеспеченности.

Для выполнения требования обеспеченности необходимо правильно выбрать теплозащитные свойства ограждений, тепловую и холодильную мощность систем обеспечения микроклимата, которые выбираются по расчетным наружным условиям. Поэтому требование обеспеченности расчетных внутренних условий должно учитываться при выборе расчетных характеристик наружного климата. Таким образом, **какие наружные условия мы зададим, таким и будет конечный результат, т.е. степень обеспеченности внутренних условий.**

На примере летних условий в таблице 2.2 приведены значения коэффициентов обеспеченности для помещений с различным уровнем требований к микроклимату и их связь с параметрами наружного воздуха.

Таблица 2.2 – Категорийность помещений к микроклимату

Уровень требований к микроклимату помещений	Коэффициент обеспеченности по числу случаев	Коэффициент обеспеченности по продолжительности	Возможное отклонение параметров, ч	Параметры климата по СП
Повышенные	1,0	1,0	0	-
Высокие	0,9	0,98	50	-
Средние	0,7	0,92	200	Б
Низкие	0,5	0,8	400	А

3 СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Так как носителем параметров, характеризующих микроклимат, концентраций вредностей и других показателей является воздух, то следует знать состав воздуха, его свойства, законы, которым он подчиняется.

В атмосферном воздухе содержится то или иное количество влаги в виде водяного пара. Такую смесь сухого воздуха с водяным паром называют **влажным воздухом**.

Сухая часть воздуха содержит по объему около 78% азота, примерно 21% кислорода, около 0,03% углекислоты и незначительное количество инертных газов.

Каждый газ в смеси, в том числе и пар, занимает тот же объем, что и вся смесь. Он имеет температуру смеси и находится под своим давлением, которое называется **парциальным давлением**.

Так как обычно расчеты, связанные с влажным воздухом, выполняются при давлениях, близких к атмосферному, и парциальное давление водяного пара в нем невелико, то с достаточной точностью можно применять к влажному воздуху все формулы, полученные для **идеальных газов**. Поэтому принимается, что влажный воздух подчиняется уравнению состояния идеальных газов, а также закону Дальтона.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клайперона-Менделеева) может быть представлено следующими уравнениями:

$$p\nu = RT \quad \text{– для 1 кг газа;} \quad (3.1)$$

$$pV = MRT \quad \text{– для M кг газа;} \quad (3.2)$$

$$pV_{\mu} = \mu RT \quad \text{– для 1 киломоля газа,} \quad (3.3)$$

где p – давление газа, Н/м²;

ν – удельный объем, м³/кг;

R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·град);

V – объем газа, м³;

M – масса газа, кг;

V_{μ} – объем 1 кмолья газа, м³/кмоль;

μR – универсальная газовая постоянная 1 кмолья газа, Дж/(кмоль·град)

$$\mu R = 8314 \text{ Дж/(кмоль·град)}$$

T – температура газа, К.

Газовая постоянная для 1 кг газа определяется из условия

$$R = \frac{8314}{\mu} \quad (3.4)$$

где μ – масса 1 кмолья газа в кг, численно равная молекулярной массе газа.

Закон Авогадро. Объем 1 кмолья всех идеальных газов при нормальных условиях (температура 0°C , барометрическое давление 760 мм рт. ст.) равен $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

Пользуясь характеристическим уравнением для двух различных состояний газа, можно получить выражение для определения любого параметра при переходе из одного состояния в другое, если значения других параметров известны

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}; \quad (3.5)$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (3.6)$$

Закон Дальтона – сумма парциальных давлений газовых компонентов смеси Σp_i равна полному давлению смеси P

$$P = \Sigma p_i \quad (3.7)$$

Влажный воздух можно в первом приближении рассматривать как бинарную смесь, т. е. смесь, состоящую из двух компонентов:

– водяного пара (газа с молярной массой

$$\mu_n = 18 \frac{\text{кг}}{\text{моль}});$$

– сухого воздуха (условно однородного газа с молярной

массой $\mu_{с.в.} = 29 \frac{\text{кг}}{\text{моль}});$

Тогда барометрическое давление влажного воздуха B , Па будет равно сумме парциальных давлений сухого воздуха $P_{c.в.}$ и водяного пара P_n ; т. е.

$$B = p_{c.в.} + p_n \quad (3.8)$$

Водяной пар может находиться в воздухе как в перегретом, так и в насыщенном состоянии. Смесь, состоящую из сухого воздуха и перегретого водяного пара называют **ненасыщенным влажным воздухом**, а смесь, состоящую из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, – **насыщенным влажным воздухом**.

Температура воздуха – величина, пропорциональная средней кинетической энергии движения его молекул.

Имеет место зависимость

$$T = t + 273, \quad (3.9)$$

где T – абсолютная температура, К;
 t – температура по шкале Цельсия, °С.

Удельный объем v , м³/кг, воздуха представляет собой объем единицы его массы. Если V – объем, м³, занимаемый воздухом массой M , кг, то удельный объем

$$v = \frac{V}{M} \quad (3.10)$$

Величина, обратная удельному объему, представляет собой массу единицы объема и называется **плотностью** ρ , кг/м³, т. е.

$$\rho = \frac{M}{V}. \quad (3.11)$$

Плотность сухого воздуха для нормальных условий ($t=0^\circ\text{C}$, $B=101325$ Па)

$$\rho_{c.в.} = \frac{353}{T} . \quad (3.12)$$

Плотность пара

$$\rho_n = \frac{219}{T} . \quad (3.13)$$

Зная значение плотности сухого воздуха для определенных условий (например, $\rho_{c.в.} = 1,2 \text{ кг} / \text{м}^3$ при $t=20^0 \text{ C}$ и $V=101325 \text{ Па}$) и используя зависимость (3.5), можно определить плотность сухого воздуха при другом давлении $p_{c.в.}$ и другой температуре T . Уравнение (3.5) может быть записано следующим образом

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad \text{отсюда} \quad \rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} . \quad (3.14)$$

Подставив в (3.14) значения для стандартных условий ($t=20^0 \text{ C}$; $V=101325 \text{ Па}$), получаем значение плотности сухого воздуха для заданных давления и температуры

$$\rho_{c.в.} = 3,5 \cdot 10^{-3} \frac{p_{c.в.}}{T} , \quad (3.15)$$

т. е. плотность воздуха прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре.

Плотность влажного воздуха $\rho_в.$ может быть определена, как плотность сухого воздуха и водяного пара, находящихся под своими парциальными давлениями

$$\rho_в. = \frac{353}{T} - \frac{1.32 \cdot 10^{-3} \cdot p_n}{T} . \quad (3.16)$$

Из уравнения можно сделать вывод: так как парциальное давление водяного пара величина всегда положительная, то плотность влажного воздуха меньше плотности сухого воздуха.

При обычных условиях в помещении доля второго члена уравнения (3.16), учитывающего разницу плотности влажного и сухого воздуха, при прочих равных условиях составит всего 0,75% величины $\rho_{с.в.}$. Поэтому в инженерных расчетах в тех случаях, когда качественное различие плотности сухого и влажного воздуха не имеет значения, обычно считают, что $\rho_{с.в.} \approx \rho_в.$

Абсолютная влажность воздуха – это масса водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха, или (что то же) **плотность пара** ρ_n при его парциальном давлении и температуре воздуха. $\rho_n \cong 1,5 \text{ кг/м}^3$.

Относительная влажность φ - отношение абсолютной влажности воздуха при данной температуре к максимально возможной абсолютной влажности ρ_{\max} (т. е. при полном насыщении) и данной температуре.

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{\max}}. \quad (3.17)$$

Если температура влажного воздуха t_B меньше или равна температуре насыщения водяного пара $t_{\text{нас}}$ при давлении смеси, то ρ_{\max} будет равна плотности насыщенного пара при данной температуре, т. е. $\rho_{\text{нас}}$. и значение ее определяется по таблицам насыщенного пара. Если же $t_B > t_{\text{нас}}$, при давлении смеси, то ρ_{\max} будет равна плотности перегретого водяного пара при температуре и давлении смеси. Значения ρ_{\max} в этом случае определяют из таблиц для перегретого водяного пара.

Относительная влажность может быть также представлена, как отношение парциального давления водяного пара в ненасыщенном влажном воздухе p_n к парциальному давлению водяного пара при той же температуре и полном насыщении p_n , то есть

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} . \quad (3.18)$$

Если $p_n < p_n$, то пар в воздухе перегрет, а следовательно, воздух при этом не насыщен.

При данной температуре и барометрическом давлении парциальное давление водяного пара (упругость водяного пара) имеет предельное значение, сверх которого оно не может повышаться.

Парциальное давление водяного пара в состоянии насыщения называется **максимальной упругостью водяных паров**. Оно является функцией только температуры и может быть найдено по таблице, которая составлена экспериментальным путем, или по формуле (для области положительных температур)

$$p_n = 479 + (11,52 + 1,62t)^2 . \quad (3.19)$$

При обработке воздуха и изменении его свойств в вентиляционном процессе количество сухого воздуха остается неизменным, поэтому при рассмотрении тепловлажностного состояния воздуха все показатели относят к 1 кг сухой части влажного воздуха.

Влагосодержание воздуха – количество влаги (водяных паров) в г или кг, приходящейся на 1 кг сухого воздуха. Влагосодержание d , г/кг, может быть определено по формуле

$$d = 623 \frac{p_n}{B - p_n} , \quad (3.20)$$

т. е. влагосодержание воздуха пропорционально барометрическому давлению и является функцией только парциального давления пара.

Из уравнения (3.20) следует

$$p_n = B \frac{d}{623 + d} , \quad (3.21)$$

т. е. парциальное давление пара при данном давлении является функцией только влагосодержания.

$$\text{Т. к. } \varphi = \frac{p_n}{p_n}, \quad \text{то } p_n = \varphi p_n, \quad \text{тогда}$$

$$d = 623 \frac{\varphi p_n}{B - \varphi p_n}. \quad (3.22)$$

Фактическое содержание водяного пара в воздухе, характеризующее влагосодержанием, не отражает степень насыщения воздуха влагой, если при этом не указана его температура. Так, если известно, что $p_n = 1400$ Па, то при $t_b = 10^\circ$ влага вообще не будет находиться в парообразном состоянии.

Чтобы выразить степень насыщения воздуха водяными парами и введено понятие относительной влажности, которое характеризует состояние воздуха при данной температуре.

Если температура воздуха при данном влагосодержании повысится, то относительная влажность φ (из-за увеличения максимальной упругости p_n) понизится и наоборот.

При некоторой температуре, когда парциальное давление водяного пара p_n станет равным максимальной упругости водяного пара p_n , относительная влажность воздуха станет равной 100%, т.е. воздух достигнет полного насыщения водяным паром. Эта температура называется **температурой точки росы**. При дальнейшем снижении температуры воздуха влага будет конденсироваться т.е. превращаться капельно-жидкое состояние.

Удельная теплоемкость воздуха – это количество теп-

лоты, которое необходимо сообщить единице массы (удельная массовая теплоемкость) или единице объема (удельная объемная теплоемкость), или молю (удельная мольная теплоемкость), чтобы повысить температуру на градус.

Размерность соответственно $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}^0\text{С}}$ или $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\text{С}}$, или $\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}^0\text{С}}$.

Удельные теплоемкости сухого воздуха $c_{с.в.}$ и водяного пара c_n в обычном для вентиляционного процесса диапазоне температур можно считать постоянными:

$$c_{с.в.} = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^0\text{С}}; c_n = 1,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^0\text{С}}.$$

Энтальпия влажного воздуха – это количество теплоты, содержащейся в нем и отнесенной к 1 кг заключенного в нем сухого воздуха, i , кДж/кг.

Удельную энтальпию сухого воздуха $i_{с.в.}$ при температуре $t=0^\circ\text{С}$ принимают равной нулю. При произвольном значении температуры

$$i_{с.в.} = c_{с.в.} \cdot t. \quad (3.23)$$

Теплота парообразования r для воды при $t= 0^\circ\text{С}$ равна 2500 кДж/кг, поэтому энтальпия пара i_n во влажном воздухе при этой температуре равна r . При произвольной температуре

$$i_n = 2500 + 1,8t. \quad (3.24)$$

Энтальпия влажного воздуха складывается из энтальпии сухой его части и энтальпии водяных паров.

$$i = 1,005t + \frac{(2500 + 1,8t)d}{1000} \quad (3.25)$$

Если ввести характеристику теплоемкости влажного воздуха

$$c_{\epsilon} = 1,005 + \frac{1,8d}{1000}, \text{ тогда } i = c_{\text{в}}t + \frac{rd}{1000}. \quad (3.26)$$

В результате конвективного теплообмена воздуху передается явная теплота, температура воздуха повышается и соответственно изменяется его энтальпия.

При поступлении водяного пара (при подаче пара из внешних источников) в воздух передается теплота парообразования, и энтальпия воздуха возрастает. В данном случае это происходит вследствие изменения энтальпии водяного пара, масса которого увеличивается. Температура же воздуха остается неизменной.

При температуре влажного воздуха ниже 0° его энтальпия имеет отрицательное значение.

4 ТЕПЛОФИЗИКА ЗДАНИЙ

4.1 Предмет строительной теплофизики, ее роль и значение дисциплины

Строительная теплофизика или теплофизика зданий как самостоятельная наука существует в нашей стране с 20-х годов прошлого века. Большой вклад в ее становление и развитие внесли отечественные ученые и инженеры О.Е. Власов, К.Ф. Фокин, А.М. Шкловер, Л.А. Семенов, В.Н. Богословский. Сложные теплофизические задачи применительно к процессам теплообмена в ограждающих конструкциях и на их поверхностях решаются математическими и физическими способами с применением теории подобия и численных методов.

Строительная теплофизика рассматривает вопросы, одинаково важные как для специалистов по конструкциям зданий, так и специалистов в области проектирования систем климатизации. Так специалисты по конструкциям зданий, учитывают влияние режима эксплуатации ограждающих конструкций, зависящего от микроклимата помещений и наружного климата, на их долговечность и надежность. При проектировании инженерных систем, создающих комфортный микроклимат – систем отопления, вентиляции, кондиционирования – учитывается влияние на него наружных климатических условий через ограждающие конструкции. Следует учитывать, что тепловые нагрузки, производительность и надежность отопительно-вентиляционного оборудования определяются теплозащитными характеристиками ограждений.

В настоящее время вступил в силу ряд новых нормативных документов [13,14] в которых устанавливаются строгие требования не только к обеспеченности микроклимата, но и к энергопотреблению зданий. Для решения вопроса о соответствии уровня теплотребления системами климатизации современным требованиям в области энергосбережения необходимо рассчитывать теплотехнические характеристики наружных ограждений с учетом обеспечения тепловой защиты.

Тепловая защита здания формируется теплозащитными свойствами ограждающих конструкций здания, обеспечивающих заданный уровень расхода тепловой энергии здания с учетом воздухообмена в помещениях, а также их воздухопроницаемость и защиту от переувлажнения при оптимальных параметрах микроклимата его помещений. При этом теплозащитная оболочка здания представляет собой совокупность ограждающих конструк-

ций, образующих замкнутый контур, ограничивающий отапливаемый объем здания.

На энергетическую эффективность здания, отражающую отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов на его функционирование, к их затратам, в частности, на удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию непосредственное влияние оказывают теплозащитные характеристики ограждающих конструкций.

Таким образом, проектирование зданий и сооружений должно осуществляться с учетом требований к ограждающим конструкциям в целях обеспечения заданных параметров микроклимата, тепловой защиты, защиты от переувлажнения ограждающих конструкций, эффективности расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, необходимой надежности и долговечности конструкций.

В нормах [12] устанавливаются требования к:

- приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций здания;
- удельной теплозащитной характеристике здания;
- ограничению минимальной температуры и недопущению конденсации влаги на внутренней поверхности ограждающих конструкций в холодный период года;
- теплоустойчивости ограждающих конструкций в теплый период года;
- воздухопроницаемости ограждающих конструкций;
- влажностному состоянию ограждающих конструкций;
- теплоусвоению поверхности полов;
- расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий.

4.2 Виды теплообмена. Теплообмен в помещении

4.2.1 Виды теплообмена

Одним из основных процессов, рассматриваемых в строительной теплофизике, является **теплообмен**, происходящий в конструкциях зданий. Теплообмен возникает, если существует разность температур в отдельных зонах помещения или участках строительной конструкции. При этом тепловая энергия распространяется от зоны с более высокой температурой в зону с более низкой температурой.

Различают три вида (или способа) переноса теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Теплопроводность – это теплоперенос при непосредственном соприкосновении тел или частей одного тела с разной температурой. Механизм теплопроводности можно объяснить на основе молекулярно-кинетических представлений; перенос энергии осуществляется вследствие теплового движения микрочастиц (молекул, атомов, электронов), составляющих тело, и взаимодействия между ними.

Конвекцией называется перенос теплоты при движении жидкости или газа из области с одной температурой в область с другой.

Тепловое излучение (лучистый теплообмен) – это теплообмен между телами с разной температурой через лучепрозрачную среду (например, воздух, вакуум) с помощью электромагнитных волн. Он состоит из превращения внутренней энергии тела в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения другим телом.

Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью. Частным случаем конвективного теплообмена является **теплоотдача** – теплообмен между движущейся средой и поверхностью твердого тела. Теплоотдача может сопровождаться тепловым излучением.

Процессы переноса теплоты в зданиях и их ограждающих конструкциях связаны со всеми видами теплообмена. Однако в воздушной среде у поверхностей конструкции, а также в воздушных прослойках и пустотах преобладает теплообмен конвекцией и излучением, в твердых же материалах конструкций перенос теплоты осуществляется путем теплопроводности.

Включающий все виды теплообмена перенос теплоты от нагретой среды к холодной через разделяющую эти среды стенку называется **теплопередачей**.

4.2.2 Теплопроводность

Процесс теплопроводности неразрывно связан с распределением температуры внутри тела.

Совокупность значений температуры для всех точек тела в данный момент времени называется **температурным полем**. В общем случае температура t является функцией координат x, y, z и времени τ , то есть уравнение температурного поля имеет вид

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (4.1)$$

Если температура со временем меняется, то поле называется **нестационарным**, а если не меняется – **стационарным**. В последнем случае

$$t = f(x, y, z) \quad (4.2)$$

В строительной физике обычно не рассматриваются пространственные температурные поля, так как для большинства практических расчетов достаточно изучить двухмерное или одномерное температурное поле, возникающее в одной из проекций, т.е. в плане или разрезе конструкции. В этом случае при стационарных условиях температура в каждой точке проекции является функцией одной или двух координат:

$t = f(x, y)$ – двухмерное стационарное температурное поле;

$t = f(x)$ – одномерное стационарное температурное поле.

Температурное поле можно наглядно представить, если соединить точки с одинаковыми температурами и получить таким образом **изотермы** – линии равных температур. Так как в одной точке пространства одновременно не может быть двух разных температур, изотермы друг с другом не пересекаются. Изменение температуры в теле наблюдается лишь в направлениях, пересекающих изотермы, а сильнее всего температура меняется по нормали к изолиниям.

Важной величиной, характеризующей температурное поле, является **градиент температуры** [15].

Рассмотрим отношение изменения температуры между двумя изотермами Δt к кратчайшему расстоянию между ними Δn . Предел отношения $\Delta t / \Delta n$ при Δn , стремящемся к нулю, дает численное значение температурного градиента

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{dt}{dn} \quad (4.3)$$

Градиент температуры является мерой интенсивности изменения температуры в направлении нормали к изолиниям. Он является вектором и направлен в сторону возрастания температуры. Единица измерения $\text{grad } t$ – $^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Теплота самопроизвольно переносится только в сторону убывания температуры. Количество теплоты, переносимой в единицу времени через произвольную поверхность, называется **теп-**

ЛОВЫМ ПОТОКОМ Q , Вт. Количество тепла, проходящее в единицу времени через единицу площади, – это **плотность теплового потока** (или удельный тепловой поток) q , Вт/м²; q – это вектор, направленный в сторону уменьшения температуры.

Изучая процесс теплопроводности, Фурье установил, что количество теплоты, передаваемое теплопроводностью, прямо пропорционально градиенту температур. Математическим выражением **закона Фурье** являются уравнения:

- для плотности теплового потока

$$q = -\lambda \operatorname{grad} t, \quad (4.4)$$

- для теплового потока Q , передаваемого через площадь F ,

$$Q = -\lambda \operatorname{grad} t \cdot F, \quad (4.4a)$$

- для количества теплоты Q_t , проходящего через площадь F за время t ,

$$Q_t = -\lambda \operatorname{grad} t \cdot F \cdot t. \quad (4.46)$$

В дальнейшем изложении речь будет идти, в основном, об удельном тепловом потоке q .

Множитель λ в формуле (4.4) называется **коэффициентом теплопроводности** и является теплофизической характеристикой материала данного тела.

Знак минус в формуле (4.4) указывает на то, что направления плотности теплового потока и температурного градиента противоположны.

4.2.3 Коэффициент теплопроводности

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность материала проводить тепло. Он определяется из уравнения (4.4)

$$\lambda = -\frac{q}{\operatorname{grad} t} \quad (4.5)$$

Численно коэффициент теплопроводности равен количеству теплоты, проходящему за 1 сек через 1 м^2 поверхности при $\text{grad } t$, равном $1^\circ\text{C}/\text{м}$. Единица измерения λ – $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Значения коэффициента теплопроводности для разных веществ определяются из справочных таблиц, построенных на основании экспериментальных данных.

Наихудшими проводниками теплоты являются газы. Коэффициент теплопроводности воздуха составляет $0,026 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Коэффициент теплопроводности воды примерно равен $0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Металлы отличаются наибольшей теплопроводностью. Самый теплопроводный металл – серебро ($458 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$), высокие коэффициенты λ у меди ($384 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$), алюминия ($204 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$) и др. В скобках приведены значения λ при 0°C .

Коэффициент теплопроводности строительных материалов зависит, главным образом, от химического состава, кристаллической или аморфной структуры, плотности (объемного веса) и влажностного состояния вещества. Зависимость теплопроводности от температуры становится значимой лишь при воздействии высоких температур; при изменении температур в диапазоне $0 - 60^\circ\text{C}$, что имеет место для ограждений, этой зависимостью обычно пренебрегают. Однако при низких температурах замерзание влаги во влажных пористых материалах может существенно повлиять на их теплопроводность.

Чем меньше плотность строительного материала, тем больше его пористость и, как правило, тем меньше его коэффициент теплопроводности. Это связано с тем, что теплопроводность воздуха, заполняющего поры, намного меньше теплопроводности твердого «скелета» вещества. Например, для керамзитобетона плотностью $1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ в сухом состоянии $\lambda=0,66 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, а с плотностью $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ $\lambda=0,27 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Большое влияние на теплопроводность материалов оказывает их влажностное состояние: λ увеличивается с повышением влажности. Это можно объяснить тем, что теплопроводность воды, вытесняющей воздух из пор, существенно выше, чем теплопроводность воздуха. Причем, коэффициент теплопроводности влажного материала может быть выше, чем сухого – и воды в сумме.

В ограждающих конструкциях многих зданий с достаточно сухими помещениями влажность материалов зависит от внешних метеорологических воздействий; и климатические условия следует учитывать при определении расчетной величины коэффициен-

та теплопроводности. В нормах по тепловой защите зданий [12] территория Российской Федерации разделена на три зоны по влажности: сухую, нормальную и влажную. В сухой зоне (например, Ростов-на-Дону) многолетняя равновесная влажность правильно спроектированных ограждающих конструкций зданий с нормальным влажностным режимом достаточно низкая. Это приводит к меньшим значениям расчетных коэффициентов теплопроводности, чем в зоне с нормальной влажностью (например, Ставрополь, Москва). Во влажной зоне (прибрежные районы; например, Сочи, Владивосток) целесообразны специальные меры по уменьшению влажности материалов ограждающих конструкций (например, применение ограждений с вентилируемыми прослойками, быстро высыхающих материалов, защитных облицовок и др.). Расчетные коэффициенты теплопроводности в этой зоне, как правило, выше, особенно – для медленно высыхающих материалов (шлакобетоны, силикатные блоки и др.).

Карта зон влажности РФ приведена в [12].

На выбор расчетных коэффициентов теплопроводности влияет не только наружный климат, но и внутренний микроклимат помещений, его влажностный режим (раздел 1). Сочетания этих двух факторов определяют условия эксплуатации ограждающих конструкций.

Таблица 4.1 – Условия эксплуатации ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений зданий	Условия эксплуатации в зоне влажности		
	сухой	нормальной	влажной
Сухой	А	А	Б
Нормальный	А	Б	Б
Влажный или мокрый	Б	Б	Б

Современное строительство трудно представить без широкого применения эффективных теплоизоляционных материалов с низкой плотностью и теплопроводностью

К неорганическим теплоизоляторам относятся: минеральная вата и изделия из нее, стеклянное волокно и изделия из него, пеностекло, ячеистые бетоны и др. Органические теплоизоляционные материалы можно разделить на два вида: материалы на основе натурального сырья (камышитовые, фибролитовые и арболитовые плиты, торфяные блоки и др.) и теплоизоляционные

пластмассы, например: пенополистирол, пенополиуретан, сотопласты.

4.2.4 Теплопроводность плоской стенки

В простейшем виде расчетная модель ограждающей конструкции здания представляет собой бесконечно протяженную плоскую стенку, ограниченную параллельными поверхностями и разделяющую воздушные среды с разными температурами.

В этом и последующих параграфах будет рассматриваться холодный период, когда температура наружного воздуха намного ниже температуры внутреннего. Считаем, что эти температуры заданы и не меняются с течением времени. То есть процесс теплопроводности через стенку является **стационарным**.

Ограждающая конструкция может быть однородной, если она выполнена из одного материала, и многослойной.

Рассмотрим однородную стенку толщиной δ , коэффициент теплопроводности которой равен λ . На внутренней и наружной поверхностях поддерживаются постоянные температуры t_{si} и t_{se} . Очевидно, что при таких условиях температура внутри стенки будет изменяться только в направлении, перпендикулярном поверхности стенки, то есть по оси X .

Температурное поле одномерно и стационарно, а изотермы перпендикулярны оси X (рисунок 4.1).

Выделим внутри стенки слой толщиной dx , ограниченный двумя изотермами. В пределах этого слоя температура изменяется на dt . На основании закона Фурье уравнение (4.4) для этого случая можно записать как

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad \text{откуда} \quad dt = -\frac{q}{\lambda} dx. \quad (4.5)$$

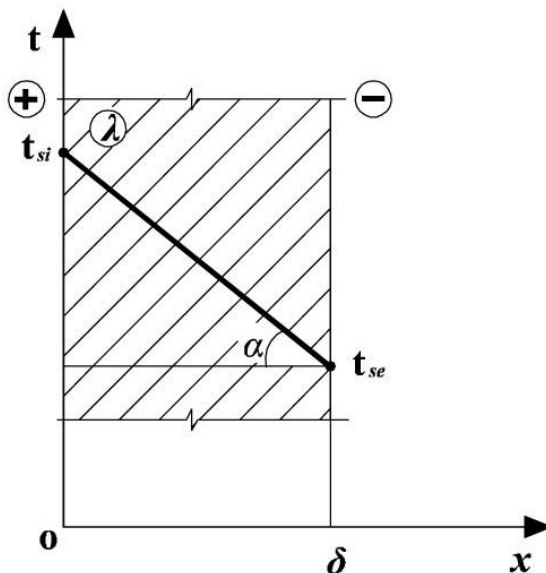


Рисунок 4.1 – Температурный график в однослойной стенке

Величина плотности теплового потока q при стационарных условиях постоянна в каждом сечении. Поэтому, интегрируя формулу (4.5), получим:

$$t = -\frac{q}{\lambda} x + C. \quad (4.6)$$

Постоянная C определяется из граничных условий, а именно: при $x = 0$ $t = t_{si} = C$, при $x = \delta$ $t = t_{se}$.

Подставим эти значения в формулу (4.6) и получим выражение для плотности теплового потока

$$q = -\frac{\lambda}{\delta} (t_{si} - t_{se}). \quad (4.7)$$

Можно сделать вывод: количество теплоты, проходящее через единицу поверхности стенки в единицу времени, прямо пропорционально коэффициенту теплопроводности λ , разности температур на поверхностях стенки $(t_{si} - t_{se})$ и обратно пропорцио-

нально толщине стенки δ .

Формулу (4.7) можно записать

$$q = \frac{t_{si} - t_{se}}{\frac{\delta}{\lambda}}.$$

Отношение δ/λ называется **термическим сопротивлением** R однородного ограждения или отдельного слоя в многослойном ограждении

$$R = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (4.8)$$

Тогда формулу (4.7) можно записать

$$q = \frac{t_{si} - t_{se}}{R}, \quad (4.9)$$

откуда

$$R = \frac{t_{si} - t_{se}}{q}.$$

Термическое сопротивление численно равно разности температур, при которой через стенку проходит тепловой поток плотностью 1 Вт/м², и измеряется в м²·°С/Вт.

Для многослойной конструкции, состоящей из n слоев, термическое сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных слоев

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}, \quad (4.10)$$

где δ_i – толщины отдельных слоев, м;

λ_i – коэффициенты теплопроводности материалов этих сло-

ев, Вт/(м · °С);
i = 1, 2, ..., n.

4.2.5 Теплообмен у поверхности ограждения

При рассмотрении процесса теплообмена между поверхностью стенки и подвижной средой наиболее существенное значение имеет перенос тепла конвекцией и излучением.

Конвективный теплообмен достаточно точно описывается законом Ньютона, согласно которому плотность теплового потока на поверхности теплообмена прямо пропорциональна разности температур и окружающей среды

$$q = \alpha_k (t - t_s), \quad (4.11)$$

где t и t_s – температуры окружающей среды и поверхности стенки, соответственно; $t > t_s$;

α_k – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С).

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность конвективного теплообмена. Его можно определить как количество тепла, переданное за единицу времени через единицу площади поверхности стенки при разности температур между поверхностью и подвижной (воздушной – в нашем случае) средой в 1°С.

$$\alpha_k = \frac{q}{t - t_s}.$$

Коэффициент теплоотдачи является сложной функцией различных величин, характеризующих процесс теплоотдачи. Коэффициент α_k зависит от температуры и формы поверхности, от скорости движения среды, ее температуры, физических свойств: коэффициента теплопроводности, теплоемкости, вязкости и др.

Величина $1/\alpha_k$, обратная коэффициенту теплоотдачи, называется термическим сопротивлением теплоотдаче. Она имеет такую же размерность, как термическое сопротивление R , то есть м²·°С/Вт.

Теплообмен излучением (или радиационный теплообмен) описывается законом Стефана-Больцмана, по которому плотность теплового потока, передаваемого от нагретого тела к холодному путем излучения, определяется выражением

$$q = \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (4.12)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

T_1 и T_2 – абсолютные температуры двух тел, К;

ε – приведенная степень черноты системы двух тел

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (4.13)$$

где ε_1 и ε_2 – степени черноты тел (телом может быть и газ).

Степень черноты характеризует способность тела излучать и поглощать энергию. Она зависит от природы тела, фактуры его поверхности (гладкая, шероховатая) и его температуры. Степень черноты материалов приводится в справочниках. Для реальных тел $\varepsilon < 1$.

Теплообмен излучением наиболее важен при высоких температурах.

Процесс переноса тепла между воздушной средой и поверхностью ограждающей конструкции является результатом совместного действия конвективного теплообмена и теплового излучения. Это так называемый сложный теплообмен. Здесь в качестве основного явления обычно принимается конвекция. В этом случае количественной характеристикой процесса служит коэффициент теплоотдачи α

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l, \quad (4.14)$$

где α_k учитывает действие конвекции, а α_l – действие теплового излучения.

Пусть тепло передается от теплого воздуха помещения с температурой t холодной поверхности стены, температура которой равна t_s . Плотность теплового потока при сложном теплообмене запишем по аналогии с формулой (4.11)

$$q = \alpha(t - t_s) = (\alpha_k + \alpha_n)(t - t_s). \quad (4.15)$$

С другой стороны, плотность теплового потока можно определить, суммируя выражения (4.11) и (4.12)

$$q = \alpha_k(t - t_s) + \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (4.16)$$

Так как $t - t_s = T_1 - T_2$, вынесем эту разность в формуле (4.16) за скобки, тогда получим

$$q = \left\{ \alpha_k + \varepsilon \cdot C_0 \left[\frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{T_1 - T_2} \right] \right\} (t - t_s). \quad (4.17)$$

Введем температурный коэффициент θ

$$\theta = \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{T_1 - T_2}. \quad (4.18)$$

Тогда из формул (4.15) и (4.16а) определим α_n

$$\alpha_n = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \theta. \quad (4.19)$$

α_n называется коэффициентом лучистого теплообмена. Он зависит от степени черноты тел и их температур.

Поскольку коэффициент теплоотдачи α зависит от многих факторов, то для большинства характерных случаев он определен экспериментально. В теплотехническом расчете ограждающих конструкций используются следующие значения коэффициента теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции α_{ext} для холодного периода:

– $\alpha_{\text{ext}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ – на наружной поверхности стен, покрытий;

– $\alpha_{\text{ext}} = 10,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ – на поверхности конструкции, обращенной в сторону вентилируемой наружным воздухом прослойки – для ограждающих конструкций с вентилируемыми воздушными прослойками.

В таблице 4.2 приведены значения коэффициентов теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции α_{int} .
Таблица 4.2 – Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции

Внутренняя поверхность ограждения	Коэффициент теплоотдачи α_{int} , Вт/(м ² ·°С)
Стен, полов, гладких потолков	8,7
Окон	8,0
Зенитных фонарей	9,9

4.3 Стационарная теплопередача через ограждающие конструкции

4.3.1 Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций

Рассмотрим однородную плоскую стенку с коэффициентом теплопроводности λ и толщиной δ (рисунок 4.2).

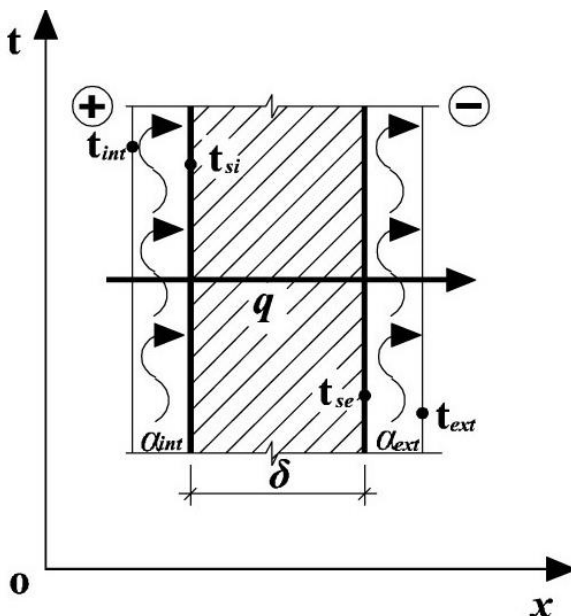


Рисунок 4.2 – Теплопередача через однослойную плоскую стенку

Она разделяет две воздушные среды: внутреннюю с температурой t_{int} и наружную с температурой t_{ext} . Температуры t_{int} и t_{ext} не меняются с течением времени, следовательно, процесс теплопередачи через стенку является стационарным.

В холодное время года температура внутренней поверхности ограждения t_{si} несколько ниже, чем температура воздуха помещения t_{int} , а температура наружной поверхности t_{se} выше температуры наружного воздуха t_{ext} . То есть существуют температурные перепады $t_{\text{int}} - t_{\text{si}}$ и $t_{\text{se}} - t_{\text{ext}}$ и, следовательно, происходит теплообмен между поверхностями ограждающей конструкции и окружающим воздухом. Коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей, соответственно, равны α_{int} и α_{ext} . Перенос тепла через стенку, вызванный разностью температур $t_{\text{si}} - t_{\text{se}}$, происходит путем теплопроводности.

При стационарной теплопередаче количество тепла, переданного от теплого воздуха стенке, равно количеству тепла, отданному от стенки наружной среде. Исходя из закона Ньютона, плотность теплового потока от внутреннего воздуха стенке определяется выражением

$$q = \alpha_{\text{int}} (t_{\text{int}} - t_{\text{si}}) \quad (4.20)$$

Плотность теплового потока, переносимого теплопроводностью сквозь стенку, равна (формула (4.6))

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{si}} - t_{\text{se}}).$$

Аналогично, тот же самый поток передается от наружной поверхности холодному воздуху

$$q = \alpha_{\text{ext}} (t_{\text{se}} - t_{\text{ext}}). \quad (4.21)$$

Из этих уравнений определим температурные перепады и запишем систему

$$t_{\text{int}} - t_{\text{si}} = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}} q \quad t_{\text{si}} - t_{\text{se}} = \frac{\delta}{\lambda} q \quad (4.22)$$

$$t_{se} - t_{ext} = \frac{1}{\alpha_{ext}} q .$$

Сложив левые и правые части, получим разность температур внутреннего и наружного воздуха

$$t_{int} - t_{ext} = q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ext}} \right) .$$

Отсюда

$$q = \frac{t_{int} - t_{ext}}{\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ext}}} . \quad (4.23)$$

Знаменатель этого выражения называется **сопротивлением теплопередаче** R_0 однослойного ограждения

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ext}} . \quad (4.24)$$

Как видно из приведенной формулы, сопротивление теплопередаче является суммой отдельных термических сопротивлений: $1/\alpha_{int}$ – сопротивления теплоотдаче от теплого воздуха внутренней поверхности стенки; δ/λ – термического сопротивления теплопроводности стенки; $1/\alpha_{ext}$ – сопротивления теплоотдаче от наружной поверхности стенки холодному воздуху.

Для многослойной конструкции нужно учитывать термическое сопротивление каждого слоя. В этом случае сопротивление теплопередаче определяется следующим образом

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{int}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{ext}} , \quad (4.25)$$

где n – число слоев конструкции.

Выражение для плотности теплового потока в соответствии с формулой (4.23) можно записать

$$q = \frac{t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}}{R_0} . \quad (4.26)$$

Количество теплоты Q_τ , передаваемое через ограждающую конструкцию площадью F за время τ , равно

$$Q_\tau = \frac{t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}}{R_0} F \cdot \tau .$$

Величина, обратная сопротивлению теплопередаче, называется **коэффициентом теплопередачи**

$$k = \frac{1}{R_0} . \quad (4.27)$$

Он имеет ту же размерность, что и α , т.е. Вт/(м²·°С). Коэффициент k определяет интенсивность передачи теплоты от одной среды к другой с учетом разделяющей стенки и равен количеству теплоты, которое передается через 1 м² стенки за 1 сек при разности температур между внутренним и наружным воздухом в 1 °С.

Сопротивление теплопередаче определяет теплозащитные свойства ограждающей конструкции в стационарных условиях. Такие условия характерны для холодного периода года: зимой температура наружного воздуха часто бывает устойчивой, а отопление поддерживает постоянную внутреннюю температуру.

4.3.2. Распределение температур в ограждающей конструкции

В условиях стационарной теплопередачи распределение температур в конструкции подчиняется определенным закономерностям, поэтому можно определить температуру в любом сечении стены.

Установим, как меняется температура по толщине однослойной стенки, на поверхностях которой заданы постоянные температуры t_{si} и t_{se} (рисунок 4.1). Подставим в уравнение (4.6) найденное значение константы C и получим зависимость температуры от толщины

$$t = -\frac{q}{\lambda}x + t_{si}. \quad (4.28)$$

Следовательно, температура однородной стенки меняется по линейному закону. График изменения – прямая линия (рисунок 4.1) с угловым коэффициентом q/λ , равным тангенсу угла наклона температурного графика к оси X

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{q}{\lambda},$$

то есть $\operatorname{tg} \alpha$ обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности. Следовательно, **чем лучше материал проводит тепло, тем меньше угол наклона температурного графика к оси X** (и меньше градиент температур), **и наоборот.**

В многослойной стене график распределения температур представляет собой ломаную линию, каждый участок которой соответствует одному слою конструкции, а угол наклона участка ломаной зависит от теплопроводности материала данного слоя (рисунок 4.3). В плотном теплопроводном слое стены часть графика является полой, основное изменение температуры отмечается в теплоизоляционном слое.

Рассмотрим две двухслойные стены, состоящие из слоя кирпичной кладки и слоя утеплителя. Материалы и толщины слоев одинаковы, но их расположение различно (рисунок 4.4). В случае **а** утеплитель находится с внутренней стороны стены, в варианте **б** – снаружи. Термические сопротивления этих конструкций равны. Сравним температурные графики. При наружном расположении слоя теплоизоляции температура на поверхности кладки падает незначительно. Это означает, что кладка всегда будет теплой, не будет возникать трещин от температурных деформаций. При внутреннем утеплении стены кирпичная кладка в течение года подвергается воздействию больших колебаний температуры, что приводит к возникновению температурных напряжений в ней; зимой эта стена будет более холодной.

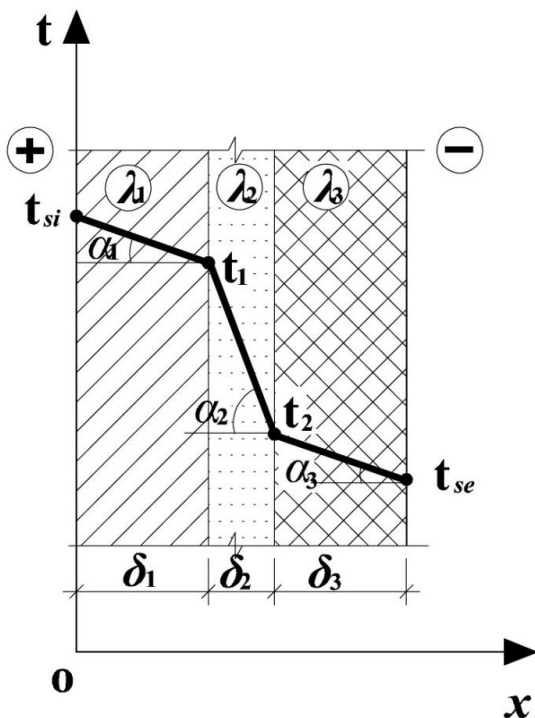


Рисунок 4.3 – График распределения температур в многослойной плоской стенке

График распределения температур в многослойной конструкции из ломаной линии превратится в прямую, соединяющую t_{si} и t_{se} , если эту конструкцию вычертить в масштабе термических сопротивлений, то есть по оси абсцисс отложить не толщины слоев δ_i , а значения их термических сопротивлений $R_i = \delta_i/\lambda_i$. Докажем это (рисунок 4.5).

Рассмотрим для простоты двухслойную стенку, температура на границе слоев – t_1 . Построим два треугольника: ABD и ACE.

$$\text{Из } \Delta \text{ ABD} \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{AD}{BD} = \frac{t_{si} - t_1}{R_1}; \quad \text{Из } \Delta \text{ ACE}$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{AE}{CE} = \frac{t_{si} - t_{se}}{R_1 + R_2}.$$

Правые части этих выражений есть плотности тепловых потоков q_1 и q_2 , проходящих через первый слой и всю стенку в целом, соответственно.

При стационарной теплопередаче $q_1 = q_2 = \text{const}$, следовательно, $\text{tg } \alpha_1 = \text{tg } \alpha_2$ и $\alpha_1 = \alpha_2$. Значит, в масштабе термических сопротивлений температурный график – прямая линия.

На этой закономерности основан **графический способ определения температур** в любом сечении стены x (рисунок 4.3). Это же значение можно рассчитать аналитически, зная величину термического сопротивления R_x от внутренней поверхности до данного сечения

$$t_x = t_{si} - \frac{t_{si} - t_{se}}{R_1 + R_2} R_x. \quad (4.29)$$

Если температуры поверхностей стены t_{si} и t_{se} неизвестны, но заданы постоянные температуры воздуха внутри и снаружи помещения t_{int} и t_{ext} и коэффициенты теплоотдачи α_{int} и α_{ext} , по оси абсцисс откладываются последовательно: сопротивление теплоотдаче у внутренней поверхности $1/\alpha_{\text{int}}$, термические сопротивления слоев, начиная от внутреннего, R_i , и наконец, сопротивление теплоотдаче у наружной поверхности $1/\alpha_{\text{ext}}$. Температурный график – прямая линия, соединяющая значения t_{int} и t_{ext} .

Значение температуры в сечении x можно найти по графику или вычислить по формуле

$$t_x = t_{\text{int}} - \frac{t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}}{R_0} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + R_x \right). \quad (4.30)$$

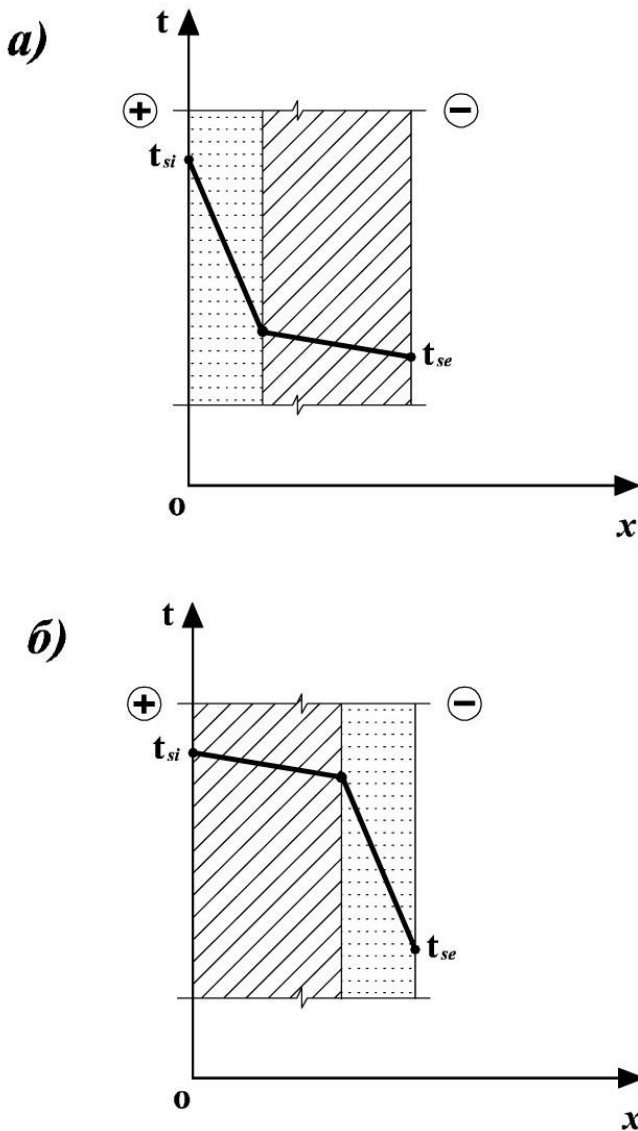


Рисунок 4.4 – График распределения температур в двухслойной стенке:

а) – с внутренним утеплителем; б) – с наружным утеплителем

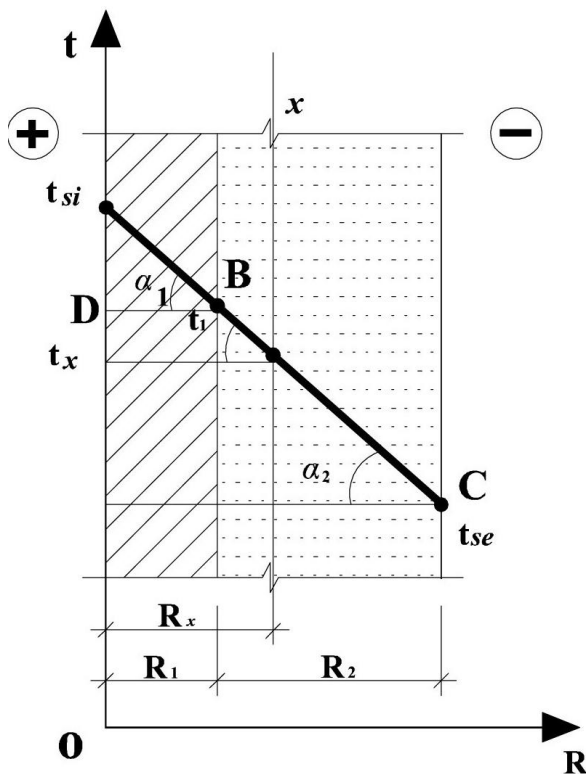


Рисунок 4.5 – График распределения температур в двухслойной стене, вычерченный в масштабе термических сопротивлений.

4.3.3. Приведенное сопротивление теплопередаче неоднородных ограждающих конструкций

Ранее рассматривались ограждающие конструкции, температурное поле в которых одномерно и изменяется только по оси, перпендикулярной к плоскости ограждения. Одномерная схема достаточно хорошо описывает плоские и протяженные конструкции, с неизменным поперечным сечением, обладающие теплотехнической однородностью по всей своей площади.

Однако даже для однородных конструкций характерны отдельные участки с более сложным распределением температур, поскольку в здании имеются углы, проемы, пересечения стен. Условия теплообмена на притоках простенков, в наружных углах здания и в местах примыкания к наружным ограждениям

внутренних поперечных стен искажают простейшее температурное поле, изотермы в этом случае не параллельны, а поток тепла не одномерен.

В частности, на перенос тепла влияет геометрическая форма наружных углов зданий. Площадь тепловосприятия (принимающая тепло от внутреннего воздуха) становится меньше площади теплоотдачи (отдающей тепло наружному воздуху).

На рисунке 4.6 линиями показаны изотермы двухмерного поля в наружном углу здания. Температура на внутренней поверхности угла ниже температур глади стены на 4 – 6 °С, что приводит к отсыреванию углов, а в недостаточно отапливаемых зданиях – к появлению инея в наиболее холодный период. Эти негативные явления устраняют путем обогрева наружных углов стояками отопительной системы, что связано с дополнительными потерями теплоты.

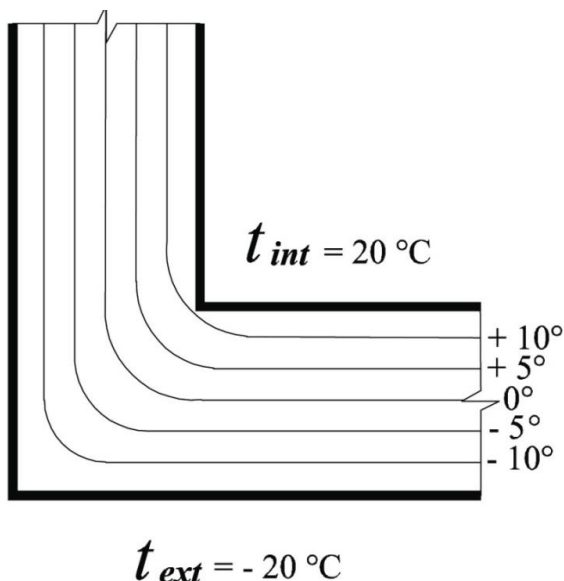


Рисунок 4.6 – Двухмерное температурное поле наружного угла

Также рассматриваются геометрически обусловленные «мостики холода». «Мостики холода» – это ограниченные участки строительных конструкций, через которые происходит повышенная теплопередача, следовательно, их главным недостатком является пониженная температура на внутренней

поверхности «мостиков», что может привести к появлению конденсационной влаги на внутренней поверхности ограждения.

Не только геометрическая форма, но и конструктивные особенности являются причиной теплотехнической неоднородности наружных ограждающих конструкций.

Отдельные участки ограждения содержат соединительные элементы между слоями (ребра, стержневые связи), сквозные и несквозные **теплопроводные включения**. На таких участках в поперечном сечении ограждающей конструкции присутствуют более теплопроводные материалы, что уменьшает сопротивление теплопередаче в зоне подобных неоднородностей.

Определение сопротивления теплопередаче таких конструкций по формуле (4.6), применимой в случае теплотехнически однородных ограждений, дает завышенные результаты, иногда существенно отличающиеся от действительных значений.

Теплотехнический расчет неоднородных ограждающих конструкций состоит в определении **приведенного сопротивления теплопередаче**.

Определение приведенного сопротивления теплопередаче на основе расчета температурных полей.

Приведенное сопротивление теплопередаче R'_{0} , $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, неоднородной ограждающей конструкции или ее фрагмента определяют по формуле

$$R'_{0} = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) \cdot F / Q, \quad (4.31)$$

где F – площадь неоднородной ограждающей конструкции или ее фрагмента, м^2 ;

Q – суммарный тепловой поток через конструкцию или ее фрагмент площадью F , Вт ;

t_{int} – расчетная температура внутреннего воздуха, °C , принимаемая согласно разделу 1;

t_{ext} – расчетная температура наружного воздуха, °C .

Суммарный тепловой поток через конструкцию Q определяется на основе расчета температурных полей (возможен также экспериментальный способ). Расчет температурного поля проводится с использованием численных методов. Исследуемая область разбивается на элементарные блоки с выделением участков с различными коэффициентами теплопроводности. Таким образом формируется расчетная сетка. В узлах этой сетки по формулам выбранного численного метода определяются значения температур. В результате расчета температурного поля

получают осредненный тепловой поток, проходящий через рассчитываемый участок площадью F . Процедура расчета осуществляется на ЭВМ с использованием вычислительной программы.

Определение приведенного сопротивления теплопередаче с использованием коэффициента теплотехнической неоднородности

Допускается приведенное сопротивление теплопередаче R'_0 характерного i -го участка неоднородной ограждающей конструкции вычислять по формуле

$$R'_0 = R_0 \cdot r, \quad (4.32)$$

где R_0 – сопротивление теплопередаче i -го участка однородной ограждающей конструкции, определяемое по формуле (4.6);

r – коэффициент теплотехнической однородности i -го участка ограждающей конструкции, учитывающий влияние стыков, откосов проемов, обрамляющих ребер, гибких связей и других теплопроводных включений.

На рисунке 4.7 приведены различные виды теплопроводных включений. Для плоских неоднородных ограждающих конструкций, содержащих такие включения, коэффициент теплотехнической однородности r допускается определять по формуле

$$r = 1 / \left[1 + (1/F) \sum_{i=1}^m (R_{0,i} / R'_{0,i}) a_i L_i k_i \right], \quad (4.33)$$

где F – то же, что в (3.30);

m – число теплопроводных включений конструкции;

a_i, L_i – соответственно ширина и длина i -го теплопроводного включения, m ;

$R'_{0,i}$ и $R_{0,i}$ – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, соответственно в месте i -го теплопроводного включения и вне этого места.

k_i – коэффициент, зависящий от типа i -го теплопроводного включения, принимаемый для:

– неметаллических теплопроводных включений по таблице 4.1;

– металлических теплопроводных включений по формуле

$$k_i = 1 + \Psi_i \cdot \delta_i^2 / (\lambda_i \cdot a_i \cdot R_{0,i}), \quad (4.33)$$

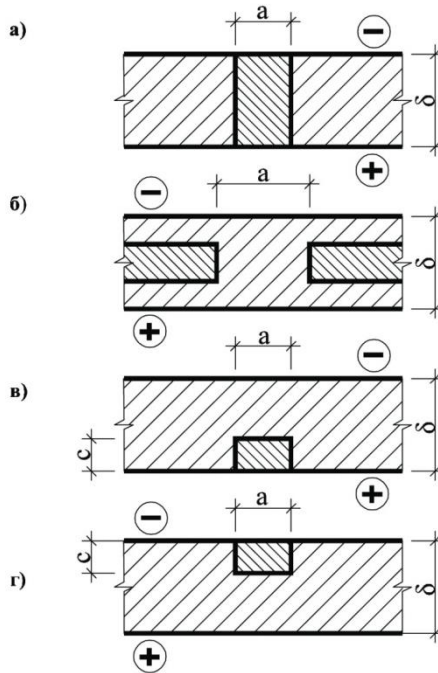


Рисунок 4.7 – Различные виды теплопроводных включений:
 а – сквозное; б – с выравнивающими слоями; в – у внутренней поверхности; г – у наружной поверхности

Таблица 4.3 – Определение коэффициента k_i

Схема теплопроводного включения по рисунку 4.7		$\lambda_{m/\lambda}$	Коэффициент k_i при a/δ (рисунок 4.7)							
			0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0
I		2	1,02	1,01	1,01	1,01	1	1	1	1
		5	1,16	1,11	1,07	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01
		10	1,33	1,25	1,15	1,1	1,08	1,06	1,04	1,03
		30	1,63	1,47	1,27	1,18	1,14	1,11	1,07	1,05
II		10-40	2,65	2,2	1,77	1,6	1,55	-	-	-
III При c/δ	0,25	2	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1
		5	1,12	1,08	1,05	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01
		10	1,18	1,13	1,07	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02
		30	1,21	1,16	1,1	1,07	1,05	1,04	1,03	1,02
	0,5	2	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01
		5	1,28	1,21	1,13	1,09	1,07	1,06	1,04	1,03
		10	1,42	1,34	1,22	1,14	1,11	1,09	1,07	1,05
		30	1,62	1,49	1,3	1,19	1,14	1,12	1,09	1,06
	0,75	2	1,06	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01
		5	1,25	1,2	1,14	1,1	1,08	1,07	1,05	1,03
		10	1,53	1,42	1,25	1,16	1,12	1,11	1,08	1,05
		30	1,85	1,65	1,38	1,24	1,18	1,15	1,11	1,08
IV При c/δ	0,25	2	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1	1
		5	1,12	1,10	1,07	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01
		10	1,2	1,16	1,1	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02
		30	1,28	1,22	1,14	1,09	1,07	1,06	1,04	1,07
	0,5	2	1,05	1,05	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01
		5	1,32	1,25	1,17	1,13	1,1	1,08	1,06	1,04
		10	1,54	1,42	1,27	1,19	1,14	1,12	1,09	1,06
		30	1,79	1,61	1,38	1,26	1,19	1,16	1,12	1,08
	0,75	2	1,07	1,05	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01
		5	1,36	1,28	1,18	1,14	1,11	1,09	1,07	1,05
		10	1,64	1,51	1,33	1,23	1,18	1,15	1,11	1,08
		30	2,05	1,82	1,5	1,33	1,25	1,21	1,16	1,11

Определение приведенного сопротивления теплопередаче по расчету конструкций в направлениях, параллельном и перпендикулярном потоку тепла

Для плоских ограждающих конструкций с теплопроводными включениями большой толщины, теплопроводность которых не превышает теплопроводности основного материала более, чем в 40 раз, приведенное термическое сопротивление определяется

как среднее термическое сопротивление из значений сопротивлений отдельных участков ограждения. Поскольку направление теплового потока в этом случае отклоняется от основного (перпендикулярно стене) из-за разной теплопроводности элементов ограждения, расчет производится два раза; характерные участки конструкции рассматриваются в двух направлениях: параллельно основному и перпендикулярно ему.

а) ограждающая конструкция условно разделяется плоскостями, **параллельными** основному потоку тепла (рисунок 4.8), на участки с разными теплотехническими свойствами. Эти участки могут быть однородными (I) или состоять из слоев из различных материалов (II).

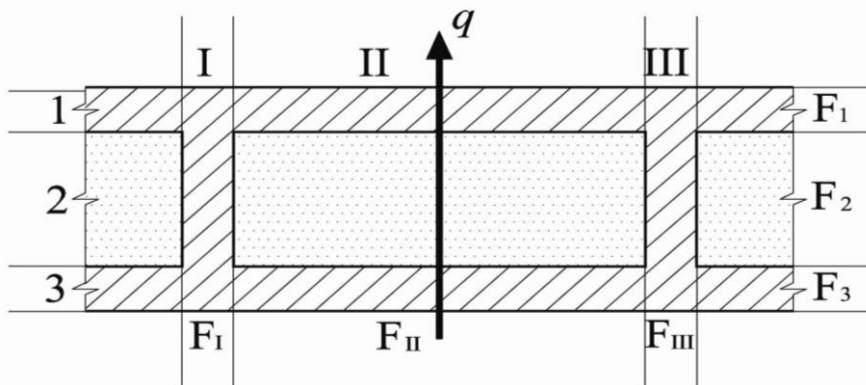


Рисунок 4.8 – Расчетная схема неоднородной ограждающей конструкции

Среднее термическое сопротивление определится

$$R_{\parallel} = \frac{F_I + F_{II} + \dots + F_N}{F_I / R_I + F_{II} / R_{II} + \dots + F_N / R_N}, \quad (4.35)$$

где F_I, F_{II}, \dots, F_N – площади отдельных участков конструкции (или ее части);

R_I, R_{II}, \dots, R_N – термические сопротивления этих участков, рассчитываемые по формулам (4.8) и (4.10);

N – число рассматриваемых участков.

б) конструкция условно разделяется плоскостями **перпендикулярными** потоку тепла. В этом случае расчетная схема ограждения представляет собой как бы слоистую конструкцию, одни слои которой могут быть однородными, а другие – нет. Термические сопротивления неоднородных слоев определяются так же, как однородных, по формуле (4.8), но в качестве коэффициента теплопроводности используется рассчитанное среднее значение λ_{CP}

$$\lambda_{CP} = \frac{\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \dots + \lambda_n F_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n}, \quad (4.36)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коэффициенты теплопроводности материалов в неоднородном слое;
 F_1, F_2, \dots, F_n – площади, занимаемые в характерной части конструкции этими материалами;
 n – число материалов в неоднородном слое.

Термическое сопротивление по второму расчету R_{\perp} определяется суммированием сопротивлений отдельных слоев, то есть по формуле (4.37).

Если величины R_{\parallel} и R_{\perp} отличаются не более, чем на 25%, то приведенное термическое сопротивление рассчитывается по формуле

$$R^r = (R_{\parallel} + 2 R_{\perp}) / 3. \quad (4.37)$$

Приведенное сопротивление теплопередаче неоднородного ограждения равно

$$R^r_0 = \frac{1}{\alpha_{int}} + R^r + \frac{1}{\alpha_{ext}}. \quad (4.38)$$

Если величина R_{\parallel} превышает величину R_{\perp} более, чем на 25%, или ограждающая конструкция не является плоской (имеет выступы на поверхности), то приведенное сопротивление теплопередаче следует определять с помощью методов, изложенных в 4.3.1.

4.3.4. Требуемое сопротивление теплопередаче

В [12] установлены три нормируемых показателя тепловой защиты зданий; два из них относятся к теплотехническим характеристикам наружных ограждающих конструкций: «а» – приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций здания (*поэлементные требования*) и «в» – (*санитарно-гигиенические требования*) – ограничение температуры на внутренних поверхностях ограждающих конструкций.

Показатель «б» – это удельная теплозащитная характеристика здания (*комплексное требование*). По этому показателю проектирование здания осуществляется путем определения комплексной величины энергосбережения от использования архитектурных, строительных, теплотехнических и инженерных решений. В настоящем пособии нормы и методика определения показателя «б» не рассматриваются.

Требования тепловой защиты здания будут выполнены при одновременном выполнении требований (а, б и в).

Поэлементные требования

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, $R_0^{\text{норм}}$, м²·°С/Вт, следует определять по формуле*

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{тп}} \cdot m_p, \quad (4.39)$$

где $R_0^{\text{тп}}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт, следует принимать в зависимости от градусо-суток отопительного периода, ГСОП, °С·сут/год, региона строительства и определять по таблице 4.4 [12].

m_p – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства, принимается равным 1. Допускается снижение значения коэффициента m_p в случае, если расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию меньше нормируемого значения. Значения коэффициента m_p при этом должны

* условные обозначения приведены по [12]; соответствие с ранее принятыми и используемыми в данном пособии условными обозначениями отражено в приложении

быть не менее: $m_p = 0,63$ – для стен, $m_p = 0,95$ – для светопрозрачных конструкций, $m_p = 0,8$ – для остальных ограждающих конструкций.

Установление требований к теплозащитным свойствам ограждений неразрывно связано с задачей энергосбережения в зданиях, а именно: с уменьшением затрат на отопление. Количественной характеристикой, определяющие эксплуатационные расходы, то есть издержки на отопление, являются **градусо-сутки отопительного периода**

Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП), °С·сут/год, определяют по формуле

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) \cdot z_{\text{от}}, \quad (4.40)$$

где $t_{\text{от}}$, $z_{\text{от}}$ – средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут/год, отопительного периода, принимаемые по [11] для периода со средней суточной температурой наружного воздуха не более 8°С, а при проектировании лечебно-профилактических, детских учреждений и домов-интернатов для престарелых не более 10°С;

$t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха здания, °С, принимаемая при расчете ограждающих конструкций групп зданий указанных в таблице 4.4: по поз. 1 – по минимальным значениям оптимальной температуры соответствующих зданий (в интервале 20-22°С); по поз. 2 – согласно классификации помещений и минимальных значений оптимальной температуры (в интервале 16-21°С); по поз. 3 – по нормам проектирования соответствующих зданий (раздел 1.8 пособия).

Таблица 4.4 – Базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Здания и помещения, коэффициенты а и b	Градусо-сутки отопительного периода ГСОП, °С·сут/год	Базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче R_0^{TP} , м ² /(°С·Вт), ограждающих конструкций				
		Стен	Покрытий и перекрытий над проездами	Перекрытий чердачных, над неотапливаемыми подпольями и подвалами	Окон и балконных дверей, витрин и витражей	Фонарей
1	2	3	4	5	6	7
1 Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты, гостиницы и общежития	2000	2,1	3,2	2,8	0,3	0,3
	4000	2,8	4,2	3,7	0,45	0,35
	6000	3,5	5,2	4,6	0,6	0,4
	8000	4,2	6,2	5,5	0,7	0,45
	10000	4,9	7,2	6,4	0,75	0,5
	12000	5,6	8,2	7,3	0,8	0,55
a	-	0,00035	0,0005	0,00045	-	0,000025
b	-	1,4	2,2	1,9	-	0,25
2 Общественные, кроме указанных выше, административные и бытовые, производственные и другие здания и помещения с влажным или мокрым режимами	2000	1,8	2,4	2,0	0,3	0,3
	4000	2,4	3,2	2,7	0,4	0,35
	6000	3,0	4,0	3,4	0,5	0,4
	8000	3,6	4,8	4,1	0,6	0,45
	10000	4,2	5,6	4,8	0,7	0,5
	12000	4,8	6,4	5,5	0,8	0,55
a	-	0,0003	0,0004	0,00035	0,00005	0,000025
b	-	1,2	1,6	1,3	0,2	0,25
3 Производственные с сухим и нормальным режимами*	2000	1,4	2,0	1,4	0,25	0,2
	4000	1,8	2,5	1,8	0,3	0,25
	6000	2,2	3,0	2,2	0,35	0,3
	8000	2,6	3,5	2,6	0,4	0,35
	10000	3,0	4,0	3,0	0,45	0,4
	12000	3,4	4,5	3,4	0,5	0,45
a	-	0,0002	0,00025	0,0002	0,000025	0,000025
b	-	1,0	1,5	1,0	0,2	0,15

Примечания

 1 Значения R_0^{TP} для величин ГСОП, отличающихся от табличных, следует определять по формуле

$$R_0^{TP} = a \cdot \text{ГСОП} + b$$

где ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, °С·сут./год, для конкретного пункта;

а, b – коэффициенты, значения которых следует принимать по данным таблицы для соответствующих групп зданий, за исключением графы 6, для группы зданий в поз. 1, где для интервала до 60000С·сут/год: a = 0,000075, b = 0,15; для интервала 6000-80000С·сут/год: a = 0,00005, b = 0,3; для интервала 8000 0С·сут/год и более: a = 0,000025; b = 0,5.

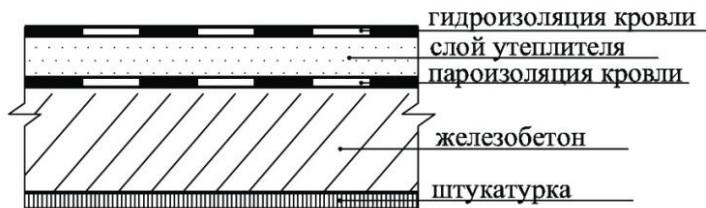
2 Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче глухой части балконных дверей должно быть не менее чем в 1,5 раза выше нормируемого значения приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной части этих конструкций.

 3* Для зданий с избытками явной теплоты более 23 Вт/м³, нормируемые значения приведенного сопротивления теплопередаче, должны определяться для каждого конкретного здания.

Введение новых теплотехнических нормативов [12] существенно повысило требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий. По сравнению с более ранним документом – СНиПом П-3-79* «Строительная теплотехника» – нормируемые значения сопротивления теплопередаче увеличены в 2,5 – 3 раза. Для достижения требуемых величин $R_o^{тп}$ (R_{req}) и обеспечения выполнения поэлементных требований существенно следует увеличить толщину ограждения, либо использовать материалы с малыми коэффициентами теплопроводности.

Использование ограждающих конструкций только из кирпича или бетона с высокой плотностью нецелесообразно, так как это требует очень большой толщины стены. Применяя в качестве утеплителей теплоизоляционные строительные материалы можно добиться необходимых теплозащитных свойств при толщине стены 0,5 – 0,7 м. Чтобы существенно уменьшить толщину стены и обеспечить при этом ее высокое сопротивление теплопередаче, следует использовать эффективные теплоизоляционные материалы с малыми коэффициентами теплопроводности (пенополистирол, минераловатные плиты и др.), а сами ограждения выполнять многослойными, с учетом как конструктивных, так и теплотехнических требований (рисунок 4.9 а).

а)



б)



Рисунок 4.9 – Бесчердачное (совмещенное) покрытие:
 а) не вентилируемое; б) вентилируемое

Одним из приемов, повышающих теплоизоляционные качества ограждений, является устройство **воздушной прослойки**. Ее используют в конструкциях наружных стен (навесные фасадные системы НФС), перекрытий, окон, витражей. В стенах и перекрытиях воздушная прослойка применяется и для предупреждения переувлажнения конструкций.

Воздушная прослойка может быть герметичной или вентилируемой (рисунок 4.9б, 4.10). Внутри воздушной прослойки протекают с различной интенсивностью процессы теплообмена (рис.4.11) Методика теплофизического расчета НФС приведена в [12, приложение Л] .

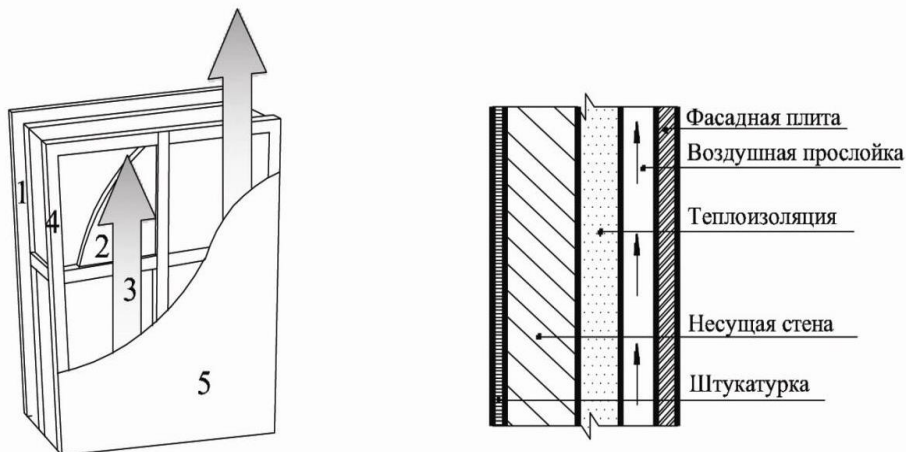


Схема конструкции

Схема в разрезе

Рисунок 4.10 – Конструкция вентилируемого фасада

- 1 – несущая стена; 2 – теплоизоляция; 3 – вентилируемая воздушная прослойка; 4 – под облицовочной конструкцией; 5 – наружная облицовка.

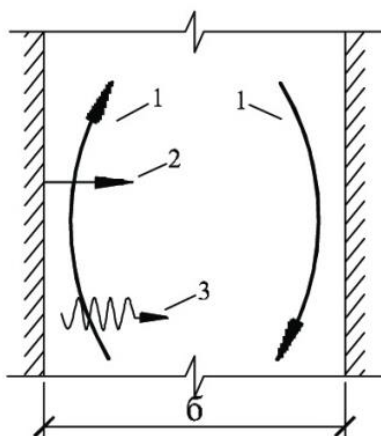


Рисунок 4.11 – Передача теплоты через воздушную прослойку:

- 1 – путем конвекции; 2 – путем излучения; 3 – путем теплопроводности

Существенное влияние на формирование микроклимата помещений оказывают **светопрозрачные ограждающие конструкции**.

Основные потери теплоты зимой и теплопоступления летом происходят именно через окна и фонари вследствие их небольшого сопротивления теплопередаче, поэтому добиться комфортных тепловых условий в помещении при их значительных размерах достаточно сложно и требует значительных расходов энергии на отопление зданий зимой и на их охлаждение летом.

Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций (окон, витражей балконных дверей, фонарей) принимается по результатам испытаний в аккредитованной лаборатории; при отсутствии таких данных оно оценивается по методике, изложенной в [12, приложение К].

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций с вентилируемыми воздушными прослойками следует рассчитывать в соответствии с [12, приложение Л].

Санитарно-гигиенические требования

Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции (за исключением вертикальных светопрозрачных конструкций), в зоне теплопроводных включений, в углах и оконных откосах, а также зенитных фонарей должна быть не ниже точки росы внутреннего воздуха при расчетной температуре наружного воздуха – t_n , °С, принимаемой в соответствии с пояснениями к формуле (4.39).

Минимальная температура внутренней поверхности остекления вертикальных светопрозрачных конструкций, т.е. с углом наклона к горизонту 45° и более (кроме производственных зданий) должна быть не ниже 3°С, для производственных зданий – не ниже 0°С. Минимальная температура внутренней поверхности непрозрачных элементов вертикальных светопрозрачных конструкций не должна быть ниже точки росы внутреннего воздуха помещения, при расчетной температуре наружного воздуха t_n , °С, принимаемой в соответствии с пояснениями к формуле (4.39).

Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции должна определяться по результатам расчета температурных полей всех зон с теплотехнической неоднородностью или по результатам испытаний в климатической камере в аккредитованной лаборатории.

Относительную влажность внутреннего воздуха для

определения точки росы следует принимать:

- для помещений жилых зданий, больничных учреждений, диспансеров, амбулаторно-поликлинических учреждений, родильных домов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, общеобразовательных детских школ, детских садов, яслей, яслей-садов (комбинатов) и детских домов – 55%;
- для кухонь – 60%;
- для ванных комнат – 65%;
- для теплых подвалов и подполий с коммуникациями – 75%;
- для теплых чердаков жилых зданий – 55%;
- для других помещений общественных зданий (за исключением вышеуказанных) – 50%.

Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций гораздо выше при использовании трехслойного или четырехслойного остекления, закрепляемого в переплетах из малотеплопроводных материалов. Использование селективного покрытия с внутренней стороны, отражающего лучистое тепло помещения обратно, и заполнение межстекольного пространства теплоизоляционным газом (аргоном) существенно повышают теплозащиту окон.

Кроме показателя тепловой защиты зданий «а» – по приведенному сопротивлению теплопередаче, для окон следует провести проверку по санитарно-гигиеническому показателю «б».

Температура внутренней поверхности остекления окон жилых и общественных зданий t_{si} должна быть не ниже + 3°C, для производственных зданий – не ниже 0°C. Если это условие не выполняется, то следует выбрать другое конструктивное решение заполнения окон с целью обеспечения выполнения этого требования.

В случаях реконструкции зданий, для которых по архитектурным или историческим причинам невозможно утепление стен снаружи, нормируемое значение сопротивления теплопередаче стен допускается определять по формуле

$$R_o^{\text{норм}} = \frac{(t_B - t_H)}{\Delta t^H \cdot \alpha_B}, \quad (4.41)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С), принимаемый по таблице 4.5;

Δt^H – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха t_b и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции t_b , °С, принимаемый по таблице 4.6;

t_b – то же, что в формуле (4.38);

t_n – расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °С, принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 по [11].

Нормируемое значение сопротивления теплопередаче входных дверей и ворот R_o^{HOPM} , $m^2 \cdot ^\circ C / Bt$, должно быть не менее $0,6 R_o^{HOPM}$ стен зданий, определяемого по формуле (4.39).

Если температура воздуха двух соседних помещений отличается больше, чем на $8^\circ C$, то минимально допустимое приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, разделяющих эти помещения (кроме светопрозрачных), следует определять по формуле (4.39), принимая за величину t_n расчётную температуру воздуха в более холодном помещении.

Расчетную температуру воздуха в теплом чердаке, техническом подполье, остекленной лоджии или балконе при проектировании допускается принимать на основе расчета теплового баланса.

Таблица 4.5 – Коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции

Внутренняя поверхность ограждения	Коэффициент теплоотдачи α_B , $Bt / (m^2 \cdot ^\circ C)$,
1. Стен, полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты h ребер к расстоянию a , между гранями соседних ребер $\frac{h}{a} \leq 3$	8,7
2. Потолков с выступающими ребрами при отношении $\frac{h}{a} > 3$	7,6
3. Окон	8,0
4. Зенитных фонарей	9,9
Примечание. Коэффициент теплоотдачи α_B внутренней поверхности ограждающих конструкций животноводческих и птицеводческих зданий следует принимать в соответствии с СП 106.13330.	

Таблица 4.6 – Нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции

Здания и помещения	Нормируемый температурный перепад Δt^t , °С, для			
	наружных стен	покрытий и чердачных перекрытий	перекрытий над проездами, подвалами и подпольями	зенитных фонарей
1. Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты	4,0	3,0	2,0	$t_b - t_p$
2. Общественные, кроме указанных в поз. 1, административные и бытовые, за исключением помещений с влажным или мокрым режимом	4,5	4,0	2,5	$t_b - t_p$
3. Производственные с сухим и нормальным режимами	$t_b - t_p$, но не более 7	$0,8(t_b - t_p)$, но не более 6	2,5	$t_b - t_p$
4. Производственные и другие помещения с влажным или мокрым режимом	$t_b - t_p$	$0,8(t_b - t_p)$	2,5	не нормируется
5. Производственные здания со значительными избытками явной теплоты (более 23 Вт/м^3) и расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха не более 50%	12	12	2,5	$t_b - t_p$

Обозначения: t_b – то же, что в формуле (4.38);
 t_p – температура точки росы, °С, при расчетной температуре t_b и относительной влажности внутреннего воздуха, принимаемым согласно СанПиН 2.1.2.2645, ГОСТ 12.1.005 и СанПиН 2.2.4.548, СП 60.13330 и нормам проектирования соответствующих зданий.
Примечание – Для зданий картофеля – и овощехранилищ нормируемый температурный перепад Δt^t для наружных стен, покрытий и чердачных перекрытий следует принимать по СП 109.13330.

Для помещений зданий с влажным или мокрым режимом, а также для производственных зданий со значительными избытками теплоты и расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха не более 50% нормируемое значение сопротивления теплопередаче определяется по формуле (4.41)

4.4 Основы нестационарной теплопередачи

Рассматриваемые до сих пор теплотехнические расчеты относятся к стационарным условиям теплопередачи, когда температуры внутреннего и наружного воздуха постоянны. При этом через наружные ограждающие конструкции проходит установившийся тепловой поток. В реальных условиях такое постоянство температур наблюдается редко и в некоторых случаях при расчетах ограждений следует учитывать нестационарный характер теплопереноса.

В летний период, особенно в южных регионах, наблюдаются существенные изменения температуры наружного воздуха в течение суток, что связано с действием солнечной радиации. Прогрев ограждающих конструкций и проникновение солнечных лучей через световые проемы могут привести к перегреву помещений, нарушению в них комфортной тепловой среды.

В холодный период года возможны значительные изменения температуры наружного воздуха, например, в период оттепели. Колебания температуры воздуха в помещении в этот период характерны и для зданий с периодически действующим отоплением.

Если предположить что изменение теплового потока происходит циклично по синусоиде, то средняя линия $Q_z - Q_z$ выражает средний тепловой поток, проходящий через 1 м^2 ограждения в 1 час за период Z часов.

Величина максимального повышения или понижения относительно значения среднего теплового потока называют **амплитудой колебания теплового потока A_Q** . Таким образом величина теплового потока колеблется от $(Q_z - A_Q)$ до $(Q_z + A_Q)$. Величина A_Q может быть выражена как часть среднего расхода теплоты:

$$A_Q = m Q_z,$$

где m – коэффициент неравномерности теплоотдачи системой

отопления.

Водяное отопление центральное $m = 0,1$

То же, местное

(или с поквартирным регулированием) $m = 1,5$

Печное отопление $m = 0,4 - 1,4$

Чем меньше m , тем равномернее теплоотдача и при $m=0$ – тепловой поток стационарен, т.е. $A_Q=0$.

Величина связывающая A_Q и $A_{TБ}$ называется коэффициентом теплоусвоения слоя Y , Вт/(м²·°С)

$$Y = \frac{A_Q}{A_{TБ}} \quad (4.42)$$

Он показывает долю теплового потока A_Q , которая за 1 час усваивается 1 м² внутренней поверхности при изменении ее температуры на 1 °С.

Чем больше будет величина коэффициента теплоусвоения Y_B при постоянном значении A_Q , тем меньше будет амплитуда колебаний температура на его поверхности.

Возникновение значительных периодических изменений температур наружного и внутреннего воздуха приводит к необходимости ввести дополнительные требования к теплозащитным качествам ограждающих конструкций. Ограждения должны обладать **теплоустойчивостью**.

Теория теплоустойчивости была разработана в СССР О.Е.Власовым, Л.А.Семеновым, А.М.Шкловером. На основе этой теории созданы методы расчетов колебаний температур в ограждающих конструкциях, подвергающихся периодическим тепловым воздействиям.

Если ограждение однородного A_Q , имеет значительную толщину, то теплоусвоение его поверхности будет зависеть только от свойств материала при одном и том же периоде Z . В этом случае теплоусвоение представляет физическую характеристику, материала, которая называется **коэффициентом теплоусвоения материала S** (мерой массивности однородной строительной конструкции может служить тепловая инерция; так при $D \leq 0,5$, $Y = 2S_1$).

Коэффициент теплоусвоения S , Вт/(м²·°С), характеризует способность материала более или менее интенсивно воспринимать теплоту при колебании температуры на его

поверхности.

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\rho}{Z}}. \quad (4.43)$$

При $Z = 24$ часа $S_{24} = 0,27\sqrt{\lambda c\rho}$; при $Z = 12$ $S_{12} = 1,41 \cdot S_{24}$, т.е. коэффициент теплоусвоения увеличивается с уменьшением Z .

В пределе, когда $Z=0$, $S = \infty$, т.е. это стационарный тепловой поток.

$$\left(Y \approx S = \frac{A_Q}{A_T}, \text{ т.е. } \infty = \frac{A_Q}{0} \right)$$

Наибольшее теплоусвоение имеют тяжелые теплопроводные материалы, а наименьшее – легкие малотеплопроводные:

- гранит $\rho = 2800$ $\lambda = 3,49 \rightarrow S_{24} = 25$
- маты минераловатные $\rho = 125, \lambda = 0,064 \rightarrow S = 0,73$

Колебания теплового потока, вызывающие колебания на поверхности ограждения, распространяются вглубь материала ограждения. По мере удаления от поверхности колебания температуры будут постепенно уменьшаться, т.е. затухать в толще ограждений и запаздывать во времени относительно начальных колебаний.

Распространение температурных колебаний оцениваются по синусоидальному закону затухания. Таким образом, в толще ограждения образуется температурная волна, затухающая по мере проникновения ее в толщу ограждения. Расстояние между двумя максимумами волны называется **длиной волны**. Для характеристики числа волн, располагающихся в толще ограждения служит величина тепловой инерции $D = R \cdot S$. Для

многослойного ограждения $D = \sum D_i$

При $D=8,5$ в ограждении располагается 1 волна;

$D < 8,5$ в ограждении располагается неполная волна;

$D > 8,5$ в ограждении располагается более 1 волны.

Значение показателя тепловой инерции зависит от теплоусвоения S , а оно в свою очередь зависит от периода колебаний ($Z=24$ часа или 12 часов).

С уменьшением периода колебаний Z увеличивается D , т.е. в ограждении будет располагаться большое число волн с меньшей длиной и они быстрее затухают.

При определении величины коэффициента теплоусвоения внутренней (тепловоспринимающей) поверхности ограждения большое значение имеет слой резких температурных колебаний. Это слой непосредственно прилегающий к поверхности, амплитуда колебания температуры которого $A_t^{\text{резк.кол.}}$ составляет половину амплитуды колебания температуры на поверхности ограждения A_τ , т.е.

$$A_t^{\text{резк.кол.}} \cong 0,5A_\tau .$$

В слое резких температурных колебаний располагаются

около $1/8$ длины температурной волны, а его $D=1 \rightarrow \delta_{p.k} = \frac{\lambda}{8}$.

При определении коэффициента теплоусвоения наружной поверхности слоя Y (как для пола) большое значение имеет расположение слоя резких температурных колебаний. Это определяет, с какого слоя конструкции надо начинать расчет.

Теплоустойчивость ограждающих конструкций характеризует способность ограждения уменьшать амплитуду температурных

колебаний $V = \frac{A_{t.n}}{A_{тв}}$. В соответствии с [12] должно выполняться

условие: $A_{тв} \leq A_{тв}^{mp}$.

Расчетная величина затухания температурных колебаний в ограждении зависит от различных теплофизических свойств материалов конструкции. Эти свойства, в частности, определяют толщину слоя резких колебаний, непосредственно прилегающего

к поверхности, воспринимающей периодические тепловые воздействия. Внутри слоя резких колебаний однородной конструкции амплитуда температуры затухает примерно вдвое.

Допустим, что однородная конструкция или внешний конструктивный слой имеет толщину больше, чем толщина слоя резких колебаний. При периодическом изменении теплового потока, поступающего на поверхность, температура этой поверхности также периодически изменяется. Отношение амплитуды колебаний плотности теплового потока к амплитуде колебаний температуры поверхности, периодически воспринимающей это тепло, представляет собой **коэффициент теплоусвоения материала S**. По своему физическому смыслу этот коэффициент является коэффициентом теплообмена при передаче через ограждения периодических тепловых воздействий путем теплопроводности. S измеряется в Вт/(м²·°C).

Величина коэффициента теплоусвоения зависит от периода тепловых воздействий, коэффициента теплопроводности, плотности и теплоемкости материала. Значения S при периоде в 24 часа, который характерен для летнего режима, приведены в [12, приложение Т]. Наибольшее теплоусвоение имеют тяжелые теплопроводные материалы: для стали S = 126,5 Вт/(м²·°C), для гранита S = 25,04 Вт/(м²·°C), для мрамора S = 22,86 Вт/(м²·°C). Наименьшее теплоусвоение у легких теплоизоляционных материалов, например, у пенополистирола S = 0,25 – 0,89 Вт/(м²·°C) (в зависимости от плотности).

Величина усвоения тепла поверхностью относительно тонкого слоя будет отличаться от S, так как на нее влияет или степень усвоения тепла материалом, расположенным под тонким слоем – в многослойных конструкциях, или теплоотдача с противоположной поверхности ограждения – в однослойных. Коэффициент теплоусвоения поверхности тонкого слоя (с номером n в многослойной конструкции) определяется по формуле

$$Y_n = \frac{R_n \cdot S_n^2 + Y_{n-1}}{1 + R_n \cdot Y_{n-1}}, \quad (4.44)$$

где R_n и S_n – соответственно термическое сопротивление и коэффициент теплоусвоения материала рассматриваемого слоя;

γ_{n-1} – коэффициент теплоусвоения следующего (по направлению тепловой волны) слоя. В случае, если противоположная поверхность рассматриваемого слоя граничит с внутренним воздухом, этот коэффициент принимается равным коэффициенту теплоотдачи внутренней поверхности α_{int} .

Степень затухания температурных колебаний в однослойной конструкции связана с **показателем тепловой инерции** ограждения D , который представляет собой произведение термического сопротивления на коэффициент теплоусвоения материала:

$$D = R \cdot S . \tag{4.45}$$

Для многослойного ограждения показатель тепловой инерции определяют суммированием условных толщин отдельных слоев

$$D = R_1 \cdot S_1 + R_2 \cdot S_2 + \dots + R_n \cdot S_n . \tag{4.46}$$

Показатель тепловой инерции для слоя резких колебаний $D = 1$.

Тепловая инерция – это свойство ограждения сохранять или медленно изменять существующее распределение температур внутри конструкции. Чем больше показатель D , тем большей тепловой инерцией обладает конструкция.

После введения ряда понятий опишем, в чем состоит расчет затухания температурных колебаний в конструкции, состоящей из N слоев.

Расчет затухания внутри многослойной конструкции следует начинать с последнего слоя на пути тепловой волны и переходить от слоя к слою, приближаясь к поверхности, подвергающейся периодическим тепловым воздействиям. То есть в летних условиях, когда нагревается наружная поверхность, вычисления начинают со слоя, граничащего с воздухом помещения. Нумерация слоев показана на рисунке 4.12.

Расчетное значение затухания температурных колебаний v вычисляется по формуле

$$v = 0,9 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot \dots \cdot v_N \cdot v_{ext} , \tag{4.47}$$

где v_n – затухание в n -ном слое, определяемое по формуле

$$v_n = e^{D_n / \sqrt{2}} \left(\frac{S_n + Y_{n-1}}{S_n + Y_n} \right), \quad (4.48)$$

где Y_n – коэффициент теплоусвоения наружной поверхности слоя n .

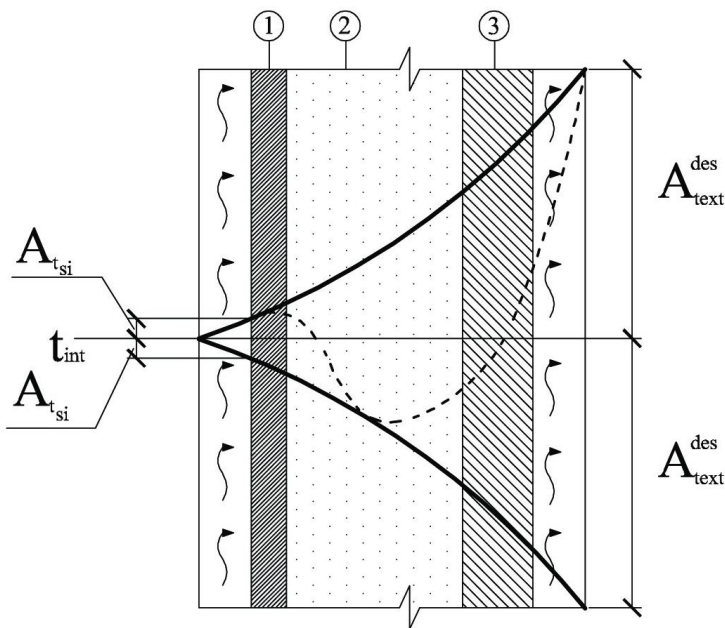


Рисунок 4.12 – Затухание температурных колебаний в многослойной конструкции (летний период)

Если показатель тепловой инерции этого слоя $D_n \geq 1$, слой считается толстым; в этом случае $Y_n = S_n$. Если $D_n < 1$, слой тонкий и Y_n находят по формуле (4.42).

Таким образом, расчет затухания температурных колебаний v сводится, в основном, к последовательному вычислению коэффициентов теплоусвоения поверхностей конструктивных слоев Y_n . Степень затухания в наружном пограничном слое воздуха не учитывается.

4.4.1. Теплоустойчивость ограждающих конструкций

Теплоустойчивость – это свойство ограждающей конструкции сохранять относительное постоянство температуры на ее внутренней поверхности при изменении температуры воздушной среды.

Свойство теплоустойчивости ограждений способствует поддержанию в помещении постоянной температуры воздуха, что обеспечивает комфортные условия для людей. В зданиях с недостаточно теплоустойчивыми ограждающими конструкциями температура воздуха летом быстро поднимается, а зимой (при перепадах в работе отопительной системы) быстро падает.

Следует отметить, что расчет ограждающих конструкций на теплоустойчивость, как правило, проводится для теплого периода года. Это можно объяснить тем, что для холодного периода характерен режим стационарной теплопередачи (раздел 4.1 пособия). В зимних условиях теплозащитные свойства ограждений определяются, в основном, величиной приведенного сопротивления теплопередаче R'_{0} , а летом – при периодических суточных изменениях параметров наружного воздуха – теплоустойчивостью.

Рассмотрим нестационарную теплопередачу через ограждающие конструкции зданий в теплый период года.

Солнечная радиация относится к основным климатообразующим факторам. Значительное воздействие тепловой солнечной радиации на наружные поверхности ограждающих конструкций зданий в летнее время может существенно изменить температурную картину как внутри зданий, так и на прилегающей территории.

Общий тепловой эффект солнечного облучения вызван суммарной радиацией, включающей прямую и рассеянную радиацию. Прямая радиация связана с непосредственным воздействием прямых солнечных лучей; рассеянная радиация возникает в результате диффузного отражения солнечных лучей от облаков, капелек влаги, пылинок, содержащихся в приземном слое атмосферы.

Количество солнечного радиационного тепла, падающего на 1 м^2 поверхности за 1 с , определяет **интенсивность суммарной солнечной радиации** – I , Вт/ м^2 .

Интенсивность солнечной радиации зависит от географической широты местности, состояния атмосферы, расположения поверхности и ее ориентации по сторонам света, времени дня. Если

вести речь о непрозрачных ограждающих конструкциях, то наибольшую тепловую нагрузку от солнечного облучения претерпевают горизонтальные поверхности (кровли) и вертикальные поверхности (стены) западной и юго-западной ориентации. В последнем случае это связано с тем, что они облучаются солнцем во второй половине дня. Совпадают максимумы значений нестационарной температуры наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации.

Максимальные и средние значения интенсивности суммарной солнечной радиации при ясном небе в июле приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Максимальные и средние значения интенсивности суммарной солнечной радиации при ясном небе в июле

Градусы с.ш.	Ориентация поверхности	Интенсивность солнечной радиации, Вт/ м ²	
		максимальная	средняя
40	Горизонтальная	928	333
	Западная	740	169
42	Горизонтальная	915	334
	Западная	748	175
44	Горизонтальная	894	331
	Западная	756	180
46	Горизонтальная	880	329
	Западная	752	182
48	Горизонтальная	866	328
	Западная	764	184
50	Горизонтальная	859	328
	Западная	774	187
52	Горизонтальная	852	329
	Западная	781	194

Температура воздуха у наружной поверхности ограждающих конструкций с учетом солнечной радиации t'_{ext} определяется по формуле

$$t'_{ext} = t_{ext} + t_{экв} , \quad (4.49)$$

где t_{ext} – расчетная температура наружного воздуха в тени;
 $t_{экв}$ – температура, эквивалентная тепловому действию солнечной радиации, вычисляемая по формуле

$$t_{\text{Экв}} = \frac{\rho \cdot I}{\alpha_{\text{ext}}}, \quad (4.50)$$

где ρ – коэффициент поглощения солнечной радиации наружной поверхностью ограждения, принимаемый по таблице 4.8;

I – интенсивность суммарной солнечной радиации, падающей на наружную поверхность рассматриваемого ограждения, Вт/м²;

α_{ext} – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции по летним условиям, Вт/(м²·°С), определяемый по формуле

$$\alpha_{\text{ext}} = 1,16 (5 + 10 \sqrt{v}), \quad (4.51)$$

где v – минимальная из средних скоростей ветра по румбам за июль, повторяемость которой составляет 16% и более, но не менее 1 м/с, принимаемая по [11].

Проведенные расчеты показали, что суммарная температура у наружной поверхности кровли ($\rho = 0,9$), определяемая по формуле (4.47), может превышать 70°С, а вблизи кирпичных стеновых ограждений ($\rho = 0,7$) достигает 55°С. Возникает значительный нагрев поверхности, тепло передается через толщу ограждения, что может привести к перегреву помещения.

Формула (4.47) определяет текущее значение суммарной температуры, которое в течение суток меняется от максимального до минимального значения.

Во-первых, изменяется температура наружного воздуха в тени t_{ext} ; максимальная амплитуда ее изменения $A_{t,\text{ext}}$ принимается по [11] для июля. В расчетах рассматривается отклонение максимального значения температуры от среднего за сутки, такое отклонение составит $0,5 A_{t,\text{ext}}$.

Таблица 4.8 – Коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности ограждающей конструкции

№ п.п.	Материал наружной поверхности ограждающей конструкции	Коэффициент поглощения солнечной радиации ρ
1	Алюминий	0,5
2	Асбестоцементные листы	0,65
3	Асфальтобетон	0,9
4	Бетоны	0,7
5	Дерево неокрашенное	0,6
6	Защитный слой рулонной кровли из светлого гравия	0,65
7	Кирпич глиняный красный	0,7
8	Кирпич силикатный	0,6
9	Облицовка природным камнем белым	0,45
10	Окраска силикатная темно-серая	0,7
11	Окраска известковая белая	0,3
12	Плитка облицовочная керамическая	0,8
13	Плитка облицовочная стеклянная синяя	0,6
14	Плитка облицовочная белая или палевая	0,45
15	Рубероид с песчаной посыпкой	0,9
16	Сталь листовая, окрашенная белой краской	0,45
17	Сталь листовая, окрашенная темно-красной краской	0,8
18	Сталь листовая, окрашенная зеленой краской	0,6
19	Сталь кровельная оцинкованная	0,65
20	Стекло облицовочное	0,7
21	Штукатурка известковая темно-серая или терракотовая	0,7
22	Штукатурка цементная светло-голубая	0,3
23	Штукатурка цементная темно-зеленая	0,6
24	Штукатурка цементная кремовая	0,4

Во-вторых, меняется с течением времени интенсивность солнечной радиации, падающей на поверхность. Рассматривается отклонение максимального значения от среднего (табл.4.7).

В итоге расчетную амплитуду колебаний температуры наружного воздуха (с учетом солнечной радиации) определяют по формуле

$$A_{t,ext}^{des} = 0,5A_{t,ext} + \frac{\rho(I_{\max} - I_{av})}{\alpha_{ext}} . \quad (4.52)$$

На рис.4.12 показана многослойная конструкция, температура наружного воздуха у поверхности которой меняется в течение суток с амплитудой $A_{t,ext}^{des}$. Можно представить, что у поверхности существует источник температурных волн. Колебания температуры передаются вглубь ограждающей конструкции, их амплитуды уменьшаются, т.е. колебания постепенно затухают.

Амплитуда изменения температуры внутренней поверхности ограждающей конструкции – $A_{t,si}$.

На рисунке 4.12 пунктиром показано мгновенное распределение температуры внутри конструкции, а сплошными линиями – границы возможных изменений температуры в каждом сечении.

Количественной мерой теплоустойчивости ограждающих конструкций является **затухание температурных колебаний ν**

$$\nu = \frac{A_{t,ext}^{des}}{A_{t,si}} . \quad (4.53)$$

Согласно [12] амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности $A_{t,si}$ не должна превышать нормируемую амплитуду колебаний $A_{t,si}^{req}$, определяемую по формуле

$$A_{t,si}^{req} = 2,5 - 0,1(t_{ext} - 21) , \quad (4.54)$$

где t_{ext} – средняя месячная температура наружного воздуха в июле [11].

Следует отметить, что расчет ограждающих конструкций на теплоустойчивость проводится для районов строительства со среднемесячной температурой июля $t_{ext} \geq +21^\circ\text{C}$.

При введении ограничений на амплитуду колебаний температуры внутренней поверхности можно ввести требуемую величину затухания температурных колебаний v^{req}

$$v^{req} = \frac{A_{t,ext}^{des}}{A_{t,si}^{req}} . \quad (4.55)$$

Чтобы установить, является ограждающая конструкция теплоустойчивой по летним условиям или нет, следует сравнить требуемое значение затухания колебаний v^{req} с расчетной величиной v . Конструкция отвечает требованиям теплоустойчивости в теплый период, если выполняется условие

$$v \geq v^{req} \text{ или } A_{t,si} \leq A_{t,si}^{req} . \quad (4.56)$$

4.5 Влажностное состояние ограждающих конструкций. Влажностный режим помещения

Помещения зданий изолированы от внешней среды при помощи наружных ограждающих строительных конструкций.

Это позволяет поддерживать в помещениях заданный микроклимат. Наружные ограждения защищают от непосредственных климатических воздействий благодаря определенным теплотехническим свойствам на которые влияют факторы наружной и внутренней среды. Строительные материалы являются капиллярно-пористыми телами и обладают определенной проницаемостью для воздуха и водяных паров, поэтому через наружные ограждения происходит фильтрация воздуха и передача (диффузия) влаги, причем процессы массообмена влияют на процессы теплообмена через строительные конструкции. Это процессы естественные и неизбежные, но они не должны приводить к переохлаждению или переувлажнению конструкций. Передача теплоты, фильтрация

воздуха и перенос влаги связаны и одно явление оказывает влияние на другое, поэтому определение сопротивлений тепло-, воздухо- и влагопередачи производится как общий расчет защитных свойств наружных ограждений здания.

Влажностное состояние материала оказывает большое влияние на эксплуатационные качества ограждающих конструкций и является одной из главных причин повреждения и разрушения зданий. Так, влага вызывает или ускоряет следующие процессы:

- электрохимическую коррозию металлических изделий и деталей, например, каркаса зданий, арматуры в железобетонных конструкциях, оборудования и воздухопроводов систем ОВК (отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха) и т. д.;
- разрушение бетона, каменной и кирпичной кладки при промерзании и оттаивании;
- ухудшение теплозащитных свойств ограждающих конструкций из-за увеличения коэффициента теплопроводности увлажненных материалов;
- изменение внешнего вида здания, например, выцветание, появление пятен и т. д.;
- изменение объема материалов конструкций (разбухание, коробление, усадка), что может привести к появлению трещин и к деформации конструкций;
- биологические повреждения, например, образование плесени, что сказывается на здоровье людей, состоянии конструкций и внешнем облике здания.

Для влажностного режима эксплуатируемых жилых и общественных зданий характерным является превышение абсолютной влажности внутреннего воздуха относительно наружного воздуха, что объясняется наличием источников влаги в помещениях: так 1 человек в состоянии покоя выделяет влагу W в среднем в количестве 45 г/час ; 1 человек при тяжелой – 200 г/час;

1 газовая горелка – 700 г/час ; стирка белья – 3000 г/час с 1 м² водной поверхности ; мытье полов – 175 г/час с 1 м² площади пола.

Следовательно, влажность воздуха в помещении обуславливается следующими видами влагопоступлений в помещение:

- а) в жилых – бытовые влагопоступления;
- б) в общественных – влагопоступления от людей, зависящие от их числа
- в) в производственных помещениях влагопоступления определяются особенностями технологии (в некоторых производствах ф достигает 80-90% – это, например, красильные отделения

, оранжереи; в некоторых ф пониженная –это, например, механо-сборочные производства, машинные залы и т.д..

4.5.1 Причины увлажнения ограждающих конструкций

Коэффициент теплопроводности материала существенно возрастает с повышением влажности, что приводит к снижению теплозащитных качеств ограждения (Глава 2). А это, в свою очередь, незамедлительно отражается на санитарно – гигиеническом состоянии помещений. Рост теплопотерь здания сопровождается понижением температур на внутренней поверхности ограждения и внутреннего воздуха, повышением относительной влажности воздуха и появлением сырости на наиболее охлаждаемых участках внутренней поверхности ограждения.

На состояние влажностного режима влияет работа вентиляции, т.е. воздухообмен между наружным и внутренним воздухом. От относительной влажности воздуха зависит интенсивность испарения влаги человеком. Нормальной для постоянного пребывания человека гигиенистами считается ф 30÷60%. При более высокой ф затрудняется отдача влаги с поверхности тела человека и в итоге его теплообмен, а при $f < 30\%$ появляются ощущения сухости слизистых оболочек и кожи человека.

Расчётные значения относительной влажности принимаются для жилых помещений $f = 55\%$, для общественных зданий $f = 50\%$.

Распределение влаги обычно неравномерно как в плане, так и по высоте помещения. Тёплый воздух имеет более низкую плотность и поднимается вверх. Следовательно, в верхней зоне помещения t_b всегда выше. (Например: при $t_b = 18^\circ$ и $f_b = 60\%$ если $t_x = 22^\circ$, то $f_x = 47\%$, а, например в зоне открывания ворот температура снизится $t_b = 15^\circ$ и $f_b = 73\%$.

Имеют место также колебания влажности суточные и годовые. Так влагосодержание материалов ограждений возрастает в апреле – мае и уменьшается к концу лета. Зимой, в январе, влагосодержание близко к среднему за год. В течение суток внутри помещения меняются влаговыделения, меняется температура. Однако при периодически повторяющихся изменениях среднесуточное влажностное состояние поверхностей ограждений будет установившимся, т.е. равновесным по отношению к среднесуточному.

В любом случае следует иметь в виду, что влажность в помещении из-за влаговыделений и, благодаря более высокой температуре, выше чем снаружи.

Ход изменения влаговыделений (1) и влажности (2) в помещении (рисунок 4.13) должны быть таковы, чтобы предотвратить переувлажнение материала ограждения с одной стороны – атмосферной влагой, а с другой – вследствие диффузии водяных паров из помещения.

Влажностный режим эксплуатации ограждения влияет на теплозащитные качества, ограждения и его долговечность. Поэтому расчётные коэффициенты теплопроводности, теплоусвоения и влагонакопления приводятся в зависимости от влажностного режима в помещении и зоны влажности района строительства.

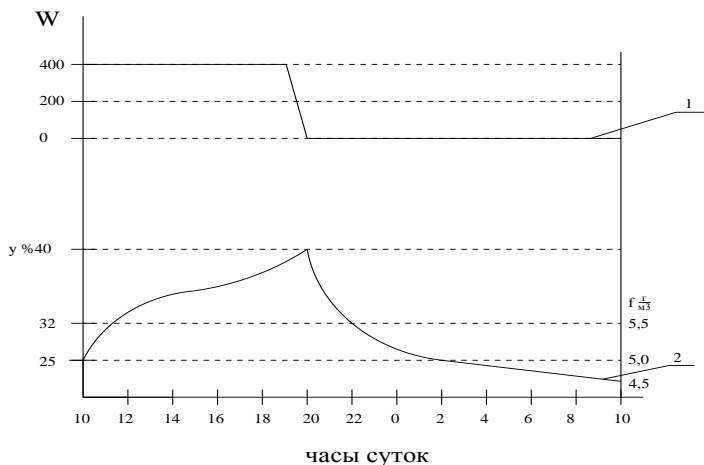


Рисунок 4.13 – Ход изменения влаговыделений W (1) и влажности φ (2) в течение суток

Таблица 4.9 – Влажностный режим помещений зданий в холодный период года в зависимости от относительной влажности воздуха φ_v и температуры воздуха t_v .

Режим	φ_v % при t_v		
	<12°C	12-24°C	>24°C
Сухой	<60	<50	<40
Нормальный	60-75	50-60	40-50
Влажный	>75	60-75	50-60
Мокрый	-	>75	>60

С учетом влажностного режима помещений и зон влажности территорий [12] по таблице 4.9 выбираются расчётные условия эксплуатации ограждающих конструкций.

Возможными **причинами увлажнения** ограждения могут быть следующие:

1 Строительная влага, которая попадает в ограждения во время возведения здания. Ее количество зависит от начальной влажности применяемых материалов, сборных деталей, а также от увлажнения в связи с применением мокрых технологических процессов (кладка кирпича на растворах, штукатурка мокрым способом и т. д.). Различают строительную эксплуатационную. Строительная влажность характерна для начального периода эксплуатации (1 год) и связана с испарением влаги из объема конструкции, попавшей в нее при изготовлении и монтаже. Так в зданиях с кирпичными схемами в первый год $\varphi > 75\%$. Эксплуатационное влажностное состояние ограждений наступает после того, как влагосодержание материалов приблизится к некоторому состоянию, равновесному относительно воздействующих на ограждение внутренней и наружной сред.

2 Грунтовая влага, проникающая в ограждение из грунта, под действием капиллярных сил при отсутствии или плохом выполнении гидроизоляции между подземными и наземными конструкциями.

3 Метеорологическая влага, проникающая в ограждение в связи с выпадением косых дождей, мокрого снега или инея. Воздействие этой влаги в сухих или умеренных районах обычно бывает непродолжительным. Однако, в некоторых климатических районах с ветрами постоянного направления и сопровождающими их дождями (например, в приморских районах Дальнего Востока) этот вид влаги является основным источником увлажнения

ограждений.

4 Гигроскопическая влага, проникающая в ограждения вследствие гигроскопичности его материала, т. е. его способности поглощать (сорбировать) влагу из воздуха.

5. Конденсационная влага, появляющаяся в ограждениях, вследствие конденсации проникающих из воздуха водяных паров. Конденсация водяных паров может происходить как на внутренней поверхности, так и в его толще.

Из перечисленных источников увлажнения конденсация водяных паров является основной причиной повышенного увлажнения ограждения в процессе его эксплуатации.

4.5.2 Увлажнение ограждающих конструкций и сорбционные характеристики строительных материалов

Тесно связан с теплотехническим режимом ограждений **процесс конденсации влаги из воздуха помещения**. Содержащаяся в воздухе влага, вступает во взаимодействие со строительными конструкциями. При этом часть её может конденсироваться в виде жидкой фазы как на поверхности так и в объёме конструкции.

На внутренней поверхности ограждения влага из воздуха будет конденсироваться, когда температура внутренней поверхности t_B окажется ниже температуры точки росы внутреннего воздуха t_p . Влага, конденсирующаяся на внутренней поверхности ограждения, будет впитываться материалом ограждения, постепенно повышая его влажность.

Увлажнение внутренней поверхности ограждения ухудшает санитарное состояние помещения. Явление конденсации влаги может наблюдаться прежде всего в местах с минимальной температурой: наружных углах, у стыков панелей, под окнами в нижней части стен первых этажей.

Условия конденсации влаги на поверхности ограждения следующие:

$t_B < t_p$ – конденсация по всей внутренней поверхности;

$t_B > t_p > t_y$ – конденсация в наружном углу; t_y – температура поверхности в наружном углу;

$t_B > t_p > t_{min}$ – периодическая конденсация, связанная с понижением температуры внутренней поверхности ограждения до t_{min} в результате недостаточной теплоустойчивости.

Зимой может наблюдаться конденсация влаги в виде изморози на нарушенных поверхностях ограждений. Это бывает при

резком потеплении после морозов. В этом случае температура нарушаемой поверхности t_n и влага из наружного воздуха конденсируется на поверхности и замерзает.

Диффузия водяного пара

Разность величин упругости водяного пара с внутренней и наружной сторон ограждения вызывает направленное перемещение водяных паров. Это явление носит название **диффузия водяного пара через ограждение**. Таким образом, в зимнее время водяной пар диффундирует из помещения наружу. В летнее время при принудительном искусственном охлаждении помещения и температуре внутреннего воздуха ниже наружной, диффузия водяного пара может идти в обратном направлении снаружи в помещение, но это явление будет значительно менее интенсивно, вследствие меньшей разности температур и относительных влажностей. Поэтому рассматривается преимущественно диффузия водяного пара через ограждение в зимнее время.

Диффундирующий через ограждение водяной пар будет снижать свою упругость и встречать на своем пути все более холодные слои. В некоторых случаях падение упругости и температуры не приведет к конденсации влаги, в других же могут создаться условия, вызывающие конденсацию водяного пара в толще ограждения.

В ограждающих конструкциях строительный материал никогда не бывает в абсолютно сухом состоянии, а имеет некоторую влажность вследствие процессов сорбции и конденсации. Влажность материала в нормальной климатической зоне и в нормальных условиях эксплуатации называется **нормальной** и составляет, например, 1,5 % для кирпича плотностью $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$; 2,5% – для кирпича силикатного; 15% – для дерева плотностью $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$.

Влага, поглощаемая пористым материалом из окружающего его воздуха, называется **сорбционной**.

Если высушенный образец пористого материала поместить в воздушную среду с определенной температурой и относительной влажностью, то с течением времени образец поглотит некоторое количество влаги. При дальнейшем пребывании материала в воздухе с постоянной температурой и влажностью количество поглощаемой влаги останется неизменным. Если изменить температуру или влажность окружающего воздуха, постепенно приходит в соответствие с этими изменениями и количество влаги, содержащиеся в материале.

Процесс поглощения влаги из окружающего воздуха называется **сорбцией**. Сорбционное увлажнение происходит за счет сил молекулярного взаимодействия между поверхностью материала и молекулами водяных паров, которые обволакивают поверхность его пор и капилляров.

Процесс увлажнения строительной конструкции обусловлен увлажнением сухого материала путем поглощения воды из влажного воздуха даже при отсутствии зоны конденсации в толще ограждения. Находящиеся во влажном воздухе молекулы воды в парообразном состоянии под действием молекулярных сил сухого материала образует на поверхности зерен или пор газовую или жидкостную пленку. Подобное явление и называется сорбцией. Сорбция – это увеличение влажности материала вследствие поглощения влаги из окружающего влажного воздуха. Существует равновесное состояние между сорбированной влагой и упругостью водяного пара окружающего воздуха, не связанное с разностью температур воздуха и материала, т.е. не связанное с температурной конденсацией. Для разных материалов зависимость между влажностью материала и относительной влажностью воздуха изображается графически в виде изотерм сорбции (рисунок 4.14).

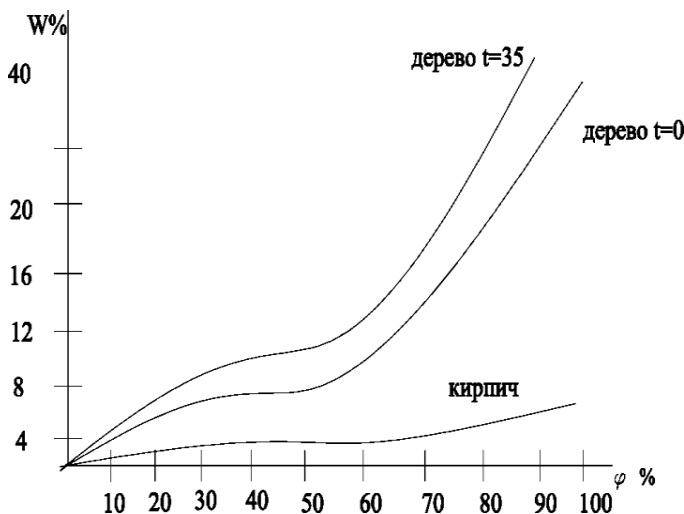


Рисунок 4.14 – Сорбционные кривые

Они показывают особенности поглощения сорбционной

влаги материалами выражая зависимость массовой влажности материала от относительной влажности воздуха при постоянной температуре. Форма кривой изотермы сорбции зависит от природы и структуры материала. Для мелкопористых материалов, хорошо смачиваемых влагой (древесина, фибролит, ячеистые бетоны и др.) выпуклая часть изотермы указывает на появление внутри материала адсорбированной влаги, состоящей из одного слоя молекул водяного пара, прочно связанных с твердой поверхностью пор и капилляров силами молекулярного притяжения (мономолекулярная адсорбция). Средняя часть изотермы, близкая к прямой линии, соответствует появлению пленки адсорбированной влаги, состоящей из многих слоев молекул (полимолекулярная адсорбция). При дальнейшем повышении влажности воздуха пленки влаги утолщаются и заполняют тонкие капилляры. Этот этап сорбционного увлажнения называется капиллярной конденсацией и соответствует вогнутой части изотермы в области высокой относительной влажности воздуха.

Процесс капиллярной конденсации имеет место в хорошо смачиваемых материалах, внутри которых имеются мелкие поры и тонкие капилляры с радиусом, равным или меньшим 10^{-5} см. При этом, чем тоньше капилляры и чем большей смачиваемостью обладает их поверхность, тем меньше относительная влажность воздуха, при которой возникает капиллярная конденсация. Так, для мелкопористого гипса капиллярная конденсация начинается при 70–75% относительной влажности воздуха, а для хорошо обожженного кирпича – при 80 – 85%.

Полное сорбционное насыщение материала при неизменной температуре достигается при максимальной относительной влажности воздуха; ему соответствует предельное значение массовой влажности материала W_{100} . Для таких пористо-капиллярных материалов, как древесина, фибролит предельное значение массовой влажности W_{100} равно 30 – 35%.

Для крупнопористых материалов, плохо смачиваемых влагой, (битумы, минераловатные плиты и др.) характерны изотермы с прямолинейными, близкими к горизонтальным участками. Процесс капиллярной конденсации в таких материалах практически отсутствует. Верхний предел сорбционного увлажнения соответствует предельной массовой влажности $W_{100} = 0,2 - 2,0\%$.

Промежуточное положение занимают ограниченно смачиваемые материалы (обожженный кирпич, пеностекло и др.).

Такой же характер изотерм свойственен очень плотным, хотя и более смачиваемым материалам (известняки, силикатный кирпич и др.). Верхний предел сорбционного насыщения для таких материалов составляет примерно от 0,5 до 5,0%.

Понятие сорбции охватывает два явления. Поглощение водяного пара поверхности пор из-за адгезии молекул воды при их соударении с материалом, называемое **адсорбцией** и имеющие основное значение, и далее, из-за адсорбции водяного пара в пограничном слое влажного воздуха, упругость водяного пара падает и возникает диффузия водяных паров из области больших концентраций в область меньших концентраций с распространением процесса вглубь объема материала, что называется **абсорбцией** (рисунок 4.15).

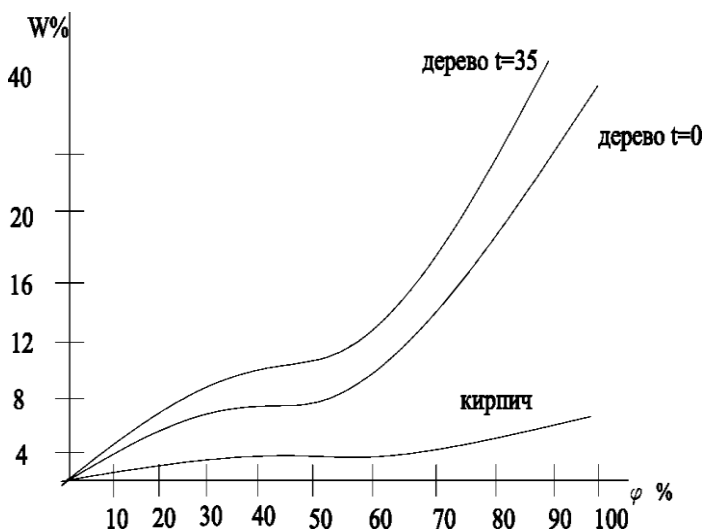


Рисунок 4.15 — Изотермы сорбции и десорбции

Интенсивность сорбирования влаги материалом зависит от его физико-химических свойств и структуры. Неорганические материалы обладают меньшей сорбционной способностью, чем органические. Зависимость сорбционной способности материала от температуры также различна.

Если на графике представлена зависимость количества сорбированной влаги от относительной влажности воздуха, полученная в результате последовательного снижения давления водяного

пара, то она называется **изотермой десорбции**. Для большинства материалов изотермы сорбции и десорбции не совпадают, т.к. при увлажнении адгезии молекул воды препятствуют адсорбированный на материале слой воздуха, что объясняет начальную неполноту смачивания, чего нет при высушивании (десорбции) увлажненного материала.

Анализ сорбционных кривых позволяет выделить три участка соответствующие трем стадиям процесса сорбции.

1 – начальный выпуклый участок характеризует мономолекулярную адсорбцию, при которой образуется пленка жидкости толщиной в одну молекулу (сопровождается выделением теплоты, экзотермический процесс);

2 – полимолекулярная адсорбция – наращивание слоя жидкости, процесс менее интенсивный;

3 – $\varphi \sim 80 \div 100\%$ – капиллярная конденсация, что соответствует резкому увеличению влажности материала.

Причиной капиллярной конденсации является, что упругость водяных паров в состоянии насыщения над вогнутой поверхностью мениска капилляра меньше, чем над плоскостью, что может привести к конденсации. Чем диаметр капилляра меньше, тем больше радиус кривизны и больше капиллярная конденсация. Материал может поглощать влагу из окружающей среды путем сорбции только до равновесной влажности, называемой гигроскопической, зависящей от физико-химических свойств материала. Гигроскопичность – это условное понятие, дающее сравнительную характеристику оценки скорости сорбции водяного пара строительными материалами.

Влажностное состояние конструкции зависит от того, как протекают процессы сорбции и конденсации. Конденсация пара в толще материала в отличие от капиллярной конденсации возможна, когда влажность достигает максимальной сорбционной (см. на изотерме сорбции при соответствующей t^0 и $\varphi=100\%$). Таким образом, сорбция предшествует конденсации.

4.5.3 Конденсация влаги на поверхности и в толще ограждения

В холодный период года температура поверхности ограждающих конструкций, обращенной в отапливаемое помещение, всегда на несколько градусов ниже температуры внутреннего воздуха. Воздух, соприкасающийся с внутренней поверхностью ограждающих конструкций, охлаждается до температуры самой

поверхности, и в процессе такого охлаждения может достигнуть точки росы t_d . В этом случае на поверхности ограждения происходит образование конденсата. Во избежание этого должно выполняться условие: $t_{si} > t_d$, где t_{si} – температура внутренней поверхности ограждающей конструкции.

Наиболее вероятно выпадение конденсата на участках поверхности с пониженными температурами: углах наружных стен, местах теплопроводных включений.

Температура внутренних поверхностей наружных ограждений здания, где имеются теплопроводные включения (диафрагмы, сквозные включения цементно-песчаного раствора или бетона, межпанельные стыки, жесткие соединения и гибкие связи в многослойных панелях, оконные обрамления и т.д.), в углах и на оконных откосах не должна быть ниже, чем температура точки росы воздуха внутри здания t_d при расчетной относительной влажности φ_{int} и расчетной температуре внутреннего воздуха t_{int} .

Предотвратить образование конденсата на внутренней поверхности ограждения возможно с помощью следующих мероприятий:

а) снижения влажности внутреннего воздуха посредством естественной или искусственной вентиляции;

б) повышения температуры внутренней поверхности за счет увеличения сопротивления теплопередаче R_o ограждения или за счет повышения температуры внутреннего воздуха t_{int} .

Отсутствие конденсации водяных паров на внутренней поверхности не исключает увлажнения ограждения ввиду возможности конденсации водяных паров внутри конструкции при их перемещении от внутренней поверхности ограждающей конструкции к наружной поверхности ограждения.

Процесс диффузии водяного пара через ограждение называется **паропроницаемостью**.

Паропроницаемость ограждающей конструкции – это свойство материалов конструкции пропускать влагу под действием разности парциальных давлений водяного пара на ее наружной и внутренней поверхностях.

Законы и характеристики процесса паропроницания аналогичны законам и характеристикам теплопередачи и аналитически выражаются подобными математическими формулами и величинами (раздел 4 пособия).

Так, при стационарном процессе диффузии водяных паров количество водяного пара, проходящего через 1 м^2 однородного ограждения толщиной δ в единицу времени равно

$$P = \mu / \delta \cdot (e_{int} - e_{ext}), \quad (4.58)$$

где P – поток водяных паров, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
 $(e_{int} - e_{ext})$ – разность парциальных давлений водяного пара внутреннего и наружного воздуха, Па;
 δ – толщина стены, м;
 μ – коэффициент паропроницаемости материала, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$.

Коэффициент паропроницаемости материала – это величина, равная плотности стационарного потока водяного пара, проходящего через слой материала толщиной в один метр в единицу времени при разности парциального давления на границах слоя в один Паскаль.

Коэффициенты паропроницаемости для материалов рыхлых и с открытыми крупными порами имеют большие значения (например, для пенобетона плотностью $\rho_0 = 300 \text{ кг}/\text{м}^3$ – $\mu = 0,26 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$), а для плотных материалов – малые (например, для железобетона плотностью $\rho_0 = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$ – $\mu = 0,03 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$). Значения коэффициентов паропроницаемости материалов приведены в [12, приложение Т].

При диффузии водяного пара через слой материала ограждения последний оказывает потоку пара сопротивление, которое называют **сопротивлением паропроницанию**.

При стационарном потоке водяных паров, диффундирующих через ограждение, сопротивление паропроницанию R_{vp} , $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$, одного конструктивного слоя определяется по формуле

$$R_{vp} = \delta / \mu, \quad (4.59)$$

где δ – толщина слоя ограждающей конструкции, м;

Сопротивление паропроницанию многослойного ограждения равно сумме сопротивлений паропроницанию отдельных слоев:

$$R_{vp} = R_{vp1} + R_{vp2} + \dots + R_{vpn}, \quad (4.60)$$

где R_{vp1} , R_{vp2} , R_{vpn} – сопротивления паропроницанию отдельных слоев.

С учетом (4.58) поток водяных паров, определяемый по формуле (4.61), может быть представлен в виде

$$P = (e_{int} - e_{ext}) / R_{vp} \quad (4.62)$$

При стационарной диффузии пара через ограждающую конструкцию парциальное давление водяного пара понижается от величины e_{int} до величины e_{ext} за счет общего сопротивления ограждения паропрооницанию. В случае однородного ограждения изменение парциального давления происходит по линейному закону.

Величина e_x в произвольном сечении x ограждающей конструкции (например, на границах конструктивных слоев) определяется по формуле

$$e_x = e_{int} - (e_{int} - e_{ext}) / R_{vp} \cdot \sum R_{vp\ x} \quad (4.63)$$

где e_{int} и e_{ext} – парциальные давления водяного пара внутреннего и наружного воздуха;

$R_{vp\ x}$ – сумма сопротивлений паропрооницанию слоев конструкции, расположенных между внутренней поверхностью и рассматриваемым сечением.

Характер распределения парциального давления водяного пара по сечению многослойной стены можно определить графическим способом. Для этого следует многослойное ограждение привести к виду однородного, изобразив его в масштабе сопротивлений паропрооницанию. Отложив на внутренней и наружной поверхностях стены значения парциальных давлений e_{int} и e_{ext} и соединив эти точки прямой линией, получаем график распределения давления водяного пара по сечению многослойной стены (рисунок 4.16).

Возможность образования конденсации влаги внутри ограждающей конструкции проверим графическим методом, заключающимся в следующем:

1. На разрезе ограждения, изображенного в масштабе сопротивлений паропрооницанию, строится график изменения фактического парциального давления водяного пара e в толще ограждающей конструкции (прямая линия).

2. На том же чертеже строится график давления насыщенного водяного пара E , соответствующий распределению температур в толще конструкции. Если линии e и E не пересекаются (рис.4.17а), конденсация водяного пара в толще ограждающей конструкции отсутствует, т.к. в любой плоскости внутри ограждения давление водяного пара ниже насыщенного, при

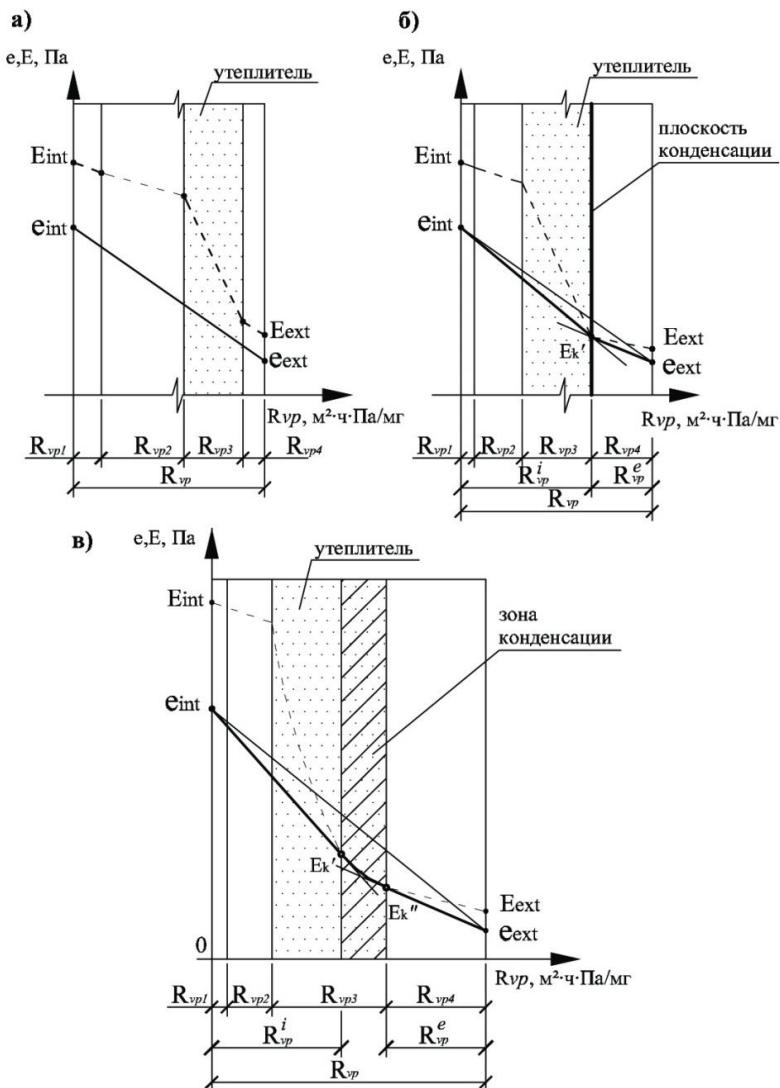


Рисунок 4.17 – График изменения давления в многослойной стене:
 а – отсутствие конденсации; б – возможность образования плоскости конденсации; в – возможность образования зоны конденсации.

Внутри ограждающей конструкции легко установить плоскость или зону, в которой конденсация влаги наиболее вероятна и происходит раньше, чем в других сечениях. В слоистых конструкциях отапливаемых зданий таким опасным сечением будет плоскость примыкания пористых материалов к более плотным слоям, расположенным в наружной части конструкции. В однородных ограждениях плоскость вероятной конденсации располагается примерно на расстоянии $2/3$ толщины от внутренней поверхности конструкции. В однородных ограждениях плоскость вероятной конденсации располагается примерно на расстоянии $2/3$ толщины от внутренней поверхности конструкции. Расположение плоскости вероятной конденсации влаги в ограждающих конструкциях отапливаемых зданий показано на рис. 4.18 а,б,в,г.

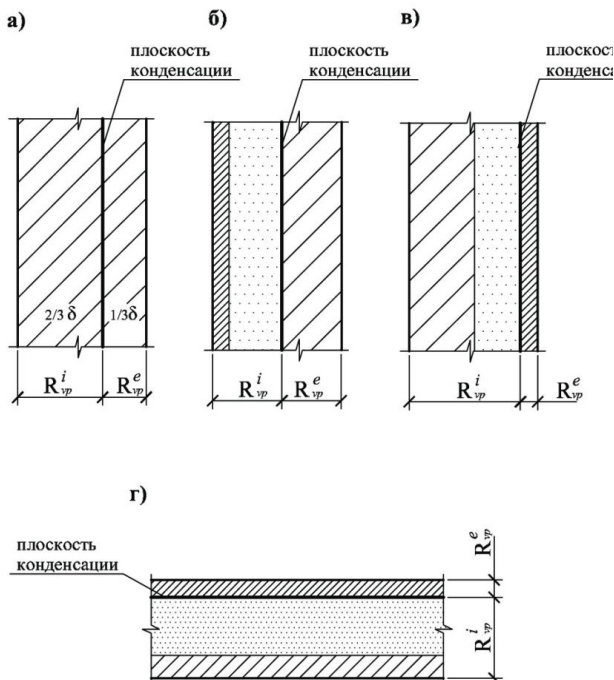


Рисунок 4.18 – Схемы расположения плоскости вероятной конденсации в наружных ограждающих конструкциях: а – однородная стена; б – стена, утепленная с внутренней стороны; в – то же с наружной стороны; г – покрытие.

В слоистых ограждающих конструкциях порядок расположения слоев из пористых и плотных материалов очень важен для

предупреждения конденсации влаги внутри конструкции. Если внутренняя часть ограждающей конструкции выполнена из пористого материала, а наружная – из плотного, то на границе раздела этих материалов может возникнуть конденсация влаги (рис.4.19б). Использование же для внутренней части конструкции плотных малопроницаемых материалов, а для наружной – более пористых предохраняет ограждающую конструкцию от возможного увлажнения (4.19а).

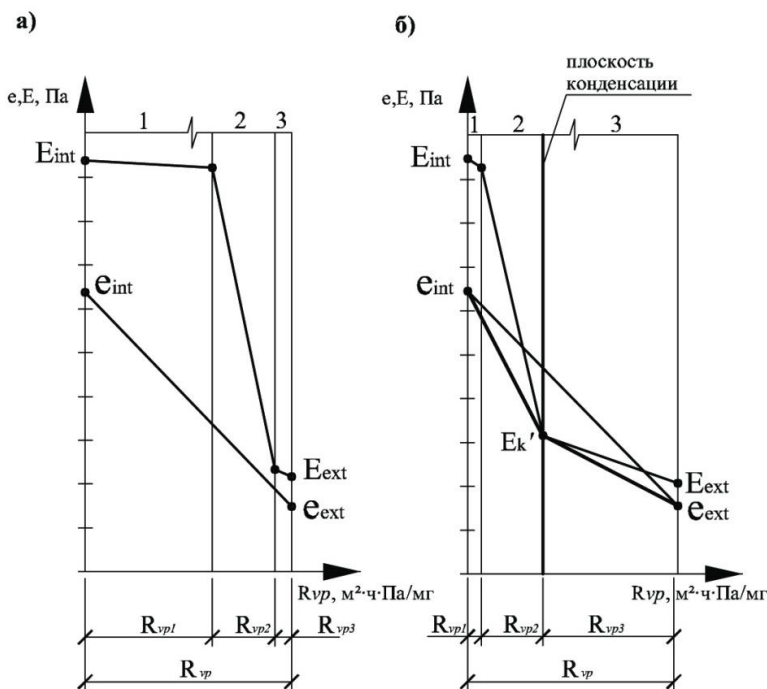


Рисунок 4.19 – Оценка влажностного состояния ограждений при различном расположении конструктивных слоев

а – стена с внутренним конструктивным слоем из плотного материала: 1 – плотный конструктивный слой; 2 – утеплитель; 3 – наружная фактура;

б – стена с наружным плотным конструктивным слоем: 1 – внутренняя фактура; 2 – утеплитель; 3 – плотный конструктивный слой.

При плотном наружном конструктивном слое (рисунок 4.19 б) графики e и E пересекаются. Проведенные из точек e_{int} и e_{ext}

касательные к графику E фиксируют плоскость конденсации на границе керамзитобетон-железобетон.

При расположении слоя железобетона с внутренней стороны (рисунок 4.19а) влага не конденсируется. Такое расположение слоев, кроме того, повышает теплоустойчивость ограждающей конструкции в летнее время.

4.5.4 Паропроницаемость материалов ограждающих конструкций

Для обеспечения предусмотренных нормами теплозащитных и санитарно-гигиенических параметров ограждающих конструкций необходимо путем расчета установить возможные изменения их влажностного состояния при эксплуатации зданий и предусмотреть мероприятия по предупреждению увлажнения ограждений выше допустимого предела.

Согласно [12] рекомендуется осуществлять проверку влажностного режима ограждающих конструкций исходя из двух условий:

- недопустимости накопления влаги в ограждении за годовой период эксплуатации;
- ограничения накопления влаги в ограждающей конструкции за период влагонакопления.

На практике, для проведения такой проверки следует определить сопротивление паропроницанию внутренней части ограждающей конструкции (от внутренней поверхности до плоскости конденсации) – R_{vp}^i . Эта величина определяет поток водяных паров, подходящих к плоскости конденсации: чем больше R_{vp}^i , тем меньше поток.

В соответствии с требованиями [12] это сопротивление паропроницанию должно быть не меньше нормативных значений, определяемых двумя условиями, приведенными выше.

Получим выражения для требуемых значений сопротивления паропроницанию R_{vp1}^{req} и R_{vp2}^{req} .

1. Расчет влажностного состояния из условия недопустимости накопления влаги в ограждении за годовой период эксплуатации.

Рассмотрим ограждающую конструкцию с расположением утепляющего слоя с внутренней стороны. Плоскость вероятной конденсации находится на границе утеплителя и плотного наружного слоя ограждения. Пусть e_{int} и e_{ext} – парциальные давления водяного пара внутреннего и наружного

воздуха, а E – парциальное давление водяного пара в плоскости вероятной конденсации, среднее за годовой период.

Предполагаем процесс диффузии водяных паров через ограждающую конструкцию стационарным. Тогда поток водяных паров, перемещающихся от внутренней поверхности ограждения к плоскости вероятной конденсации будет равен

$$P_i = (e_{int} - E) / R_{vp}^i, \quad (4.64)$$

где R_{vp}^i – сопротивление паропрооницанию части ограждающей конструкции, расположенной между внутренней поверхностью и плоскостью вероятной конденсации.

Поток водяных паров, перемещающихся от плоскости вероятной конденсации наружу равен

$$P_e = (e_{ext} - E) / R_{vp}^e \quad (4.65)$$

где R_{vp}^e – сопротивление паропрооницанию части ограждающей конструкции, расположенной между плоскостью вероятной конденсации и наружной поверхностью ограждения.

Чтобы в течение годового периода не происходило систематического накопления влаги в ограждающей конструкции, необходимо выполнение условия: $P_i = P_e$.

Приравнивая правые части уравнений (4.64) и (4.65), находим требуемое сопротивление паропрооницанию части ограждающей конструкции, расположенной между внутренней поверхностью и плоскостью вероятной конденсации

$$R_{vp1}^{req} = (e_{int} - E) R_{vp}^e / (E - e_{ext}), \quad (4.66)$$

R_{vp1}^{req} – нормируемое сопротивление паропрооницанию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ (из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации).

Давление насыщенного водяного пара в плоскости вероятной конденсации среднее за годовой период эксплуатации E определяется по формуле:

$$E = (E_1 \cdot z_1 + E_2 \cdot z_2 + E_3 \cdot z_3) / 12, \quad (4.67)$$

где E_1, E_2, E_3 – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, принимаемое по температуре в плоскости возможной конденсации, устанавливаемой при средней температуре наружного воздуха соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов; определяются по средним температурам соответствующих периодов года;

z_1, z_2, z_3 — продолжительность в месяцах зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов года; определяются по [11, таблица 5.1] с учетом следующих условий:

- к зимнему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха ниже минус 5 °С;
- к весенне-осеннему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха от минус 5 до плюс 5 °С;
- к летнему периоду относятся месяцы со средними температурами воздуха выше плюс 5 °С.

Продолжительность периодов z_1, z_2, z_3 и их средняя температура определяются по [11, таблица 5.1], а значения температур в плоскости возможной конденсации t_k , соответствующие этим периодам, по формуле

$$t_k = t_{int} - (t_{int} - t_i) \cdot (1/\alpha_{int} + \Sigma R) / R_o, \quad (4.68)$$

где t_{int} – расчетная температура внутреннего воздуха °С;
 t_i – расчетная температура наружного воздуха i -го периода, °С, принимаемая равной средней температуре соответствующего периода;

α_{int} – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, Вт/м²·°С;

ΣR — термическое сопротивление слоя ограждения в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации.

R_o — сопротивление теплопередаче ограждения, м²·°С/Вт.

Итак, расчетное сопротивление паропроницанию R_{vp}^i должно быть не менее нормируемого сопротивления паропроницанию

R_{vp1}^{req} :

$$R_{vp}^i \geq R_{vp1}^{req} \quad (4.69)$$

2. Расчет влажностного режима из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период влагонакопления.

Допустимым верхним пределом влагосодержания конструкции является полное сорбционное насыщение материала.

Количество влаги, которое может поглотить 1 м^2 материала до своего полного сорбционного увлажнения, $\text{мг}/\text{м}^2$, может быть выражено из (5.7):

$$\Delta m = \Delta w \cdot P_c / 100\%,$$

где Δw – предельно допустимое приращение относительной массовой влажности в материале, %;

m_c – масса 1 м^2 сухого материала, $\text{мг}/\text{м}^2$, определяется по формуле:

$$m_c = \rho_w \cdot \delta_w \cdot 10^6, \quad (4.70)$$

где ρ_w – плотность материала увлажняемого слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$, принимаемая равной ρ_0 ;

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

10^6 – коэффициент перевода из кг в мг.

Используя выражения (4.66), представим ΔP , в виде

$$\Delta m = 10^4 \cdot \rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta w, \quad (4.71)$$

Степень увлажнения материала внутри ограждающей конструкции, достигаемая в течение периода влагонакопления, зависит от количества водяных паров, проникающих путем диффузии в опасную зону конструкции и определяется как разность между потоком, поступающим в ограждение P_i и удаляющимся от него P_e и будет равно Δm :

$$(P_i - P_e) \cdot z_o \cdot 24 = \Delta m, \quad (4.72)$$

где z_o – продолжительность периода влагонакопления, принимаемая равной периоду с отрицательными среднесуточными температурами наружного воздуха, сутки;

24 – количество часов в сутках.

Поток водяных паров, $\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, направленный от внутренней поверхности ограждения к плоскости вероятной конденсации будет иметь вид

$$P_i = (e_{int} - E_o) / R_{vp}^i, \quad (4.73)$$

а поток водяных паров, перемещающихся от плоскости вероятной конденсации наружу, будет равен

$$P_e = (E_o - e_0^{ext}) / R_{vp}^e, \quad (4.74)$$

где E_o – парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости возможной конденсации, определяемое при средней температуре наружного воздуха за период месяцев с отрицательными среднемесячными температурами;

e_0^{ext} – среднее значение парциального давления водяного пара наружного воздуха за период с отрицательными среднемесячными температурами, определяемыми согласно [11].

Используя выражения (4.67) – (4.70), получаем требуемое сопротивление паропрооницанию части ограждающей конструкции, расположенной между внутренней поверхностью и плоскостью вероятной конденсации

$$R_{vp2}^{req} = \frac{0,0024 z_0 (e_{int} - E_o)}{\rho_w \delta_w \Delta w_{av} + \eta}, \quad (4.75)$$

где R_{vp2}^{req} – нормируемое сопротивление паропрооницанию, $m^2 \cdot ч \cdot Па / мг$ (из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха);
 η – коэффициент, определяемый по формуле

$$\eta = 0,0024 (E_o - e_0^{ext}) z_0 / R_{vp}^e, \quad (4.76)$$

где Δw_{av} – предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, %, за период влагонакопления z_0 , принимаемое по таблице 4.10.

Итак, расчетное сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции R_{vp}^i должно быть не менее нормируемого со-

противления паропрооницанию R_{vp2}^{req}

$$R_{vp}^i \geq R_{vp2}^{req} \quad (4.77)$$

Таблица 4.10 – Предельно допустимые значения коэффициента ΔW_{av}

Материал ограждающей конструкции	Предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале ΔW_{av} , %
1. Кладка из глиняного кирпича и керамических блоков	1,5
2. Кладка из силикатного кирпича	2,0
3. Легкие бетоны на пористых заполнителях (керамзитобетон, шугизитобетон, перлитобетон, шлакопемзобетон)	5
4. Ячеистые бетоны (газобетон, пенобетон, газосиликат и др.)	6
5. Пеногазостекло	1,5
6. Фибролит и арболит цементные	7,5
7. Минераловатные плиты и маты	3
8. Пенополистирол и пенополиуретан	25
9. Фенольно-резольный пенопласт	50
10. Теплоизоляционные засыпки из керамзита, шунгизита, шлака	3
11. Тяжелый бетон, цементно-песчаный раствор	2

Вывод: расчетное сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции R_{vp}^i должно быть не менее наибольшего из нормируемых сопротивлений паропрооницанию R_{vp1}^{req} , R_{vp2}^{req} , т. е. должны выполняться условия (4.65) и (4.73).

Если одно из условий или оба условия не выполняются, то ограждающая конструкция нуждается в применении дополнительного слоя пароизоляции.

4.5.5 Защита от переувлажнения ограждающих конструкций

Сопротивление паропроницанию дополнительного пароизоляционного слоя должно удовлетворять условию

$$\Delta R_{vp} \geq R^{req}_{vp} - R^i_{vp}, \quad (4.78)$$

При нарушении обоих условий, проверяемых в (4.69) и (4.77), сопротивление пароизоляции ΔR_{vp} определяется дважды. Из двух величин ΔR_{vp} принимается большая.

В качестве пароизоляции употребляются тонкие листовые и рулонные материалы, обладающие малой паропроницаемостью. В таблице 4.11 приведены сопротивления паропроницанию пароизоляционных материалов.

Пароизоляция устраивается с целью уменьшить количество водяных паров, поступающих в плоскость или зону возможной конденсации и, следовательно, должна располагаться до увлажняемого теплоизоляционного слоя с внутренней стороны ограждения.

Располагается пароизоляция, обычно, на внутренней поверхности ограждения отапливаемых зданий или же за ней (например, под внутренней штукатуркой).

Дополнительная пароизоляция у внутренней поверхности ограждения повышает расчетное сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции R^i_{vp} , и тем самым, ограничивает поступление водяных паров в ограждение.

Таблица 4.11 – Сопротивление паропроницанию листовых материалов и тонких слоев пароизоляции

№ п.п.	Материал	Толщина слоя, мм	Сопротивление паропроницанию R_{vp} , м ² ·ч·Па/мг
1	Картон обыкновенный	1,3	0,016
2	Листы асбестоцементные	6	0,3
3	Листы гипсовые обшивочные (сухая штукатурка)	10	0,12
4	Листы древесно-волокнистые жесткие	10	0,11
5	Листы древесно-волокнистые мягкие	12,5	0,05
6	Окраска горячим битумом за один раз	2	0,3
7	Окраска горячим битумом за два раза	4	0,48
8	Окраска масляная за два раза с предварительной шпатлевкой и грунтовкой	—	0,64
9	Окраска эмалевой краской	—	0,48
10	Покрытие изольной мастикой за один раз	2	0,60
11	Покрытие битумно-кукерсольной мастикой за один раз	1	0,64
12	Покрытие битумно-кукерсольной мастикой за два раза	2	1,1
13	Пергамин кровельный	0,4	0,33
14	Полиэтиленовая пленка	0,16	7,3
15	Рубероид	1,5	1,1
16	Толь кровельный	1,9	0,4
17	Фанера клееная трехслойная	3	0,15

Значительной ошибкой является применение пароизоляции на наружной поверхности теплоизоляционного слоя, так как она препятствует свободному отводу водяного пара наружу. Поэтому волокнистые теплоизоляционные материалы в вентилируемых покрытиях должны быть защищены от воздействия вентилируемого воздуха паропроницаемыми пленочными покрытиями, не мешающими водяному пару выходить наружу.

4.6 Воздухопроницаемость ограждающих конструкций

Опыт эксплуатации зданий показывает, что в холодное время года большое влияние на эксплуатационные качества помещений оказывает фильтрация воздуха через ограждающие конструкции. Воздухопроницаемость обусловлена неплотностями в элементах наружных ограждений (прежде всего в межпанельных стыках, в стыках окон с панелями, неплотностями в притворах окон и дверей), пористостью материалов, наличием трещин и отверстий в строительных конструкциях.

Воздухопроницаемость или фильтрация воздуха через ограждающие конструкции имеет свои положительные и отрицательные стороны. Небольшую воздухопроницаемость ограждений с санитарно-гигиенической точки зрения принято рассматривать как положительный фактор, создающий в помещениях естественный воздухообмен и регулирующий влажностный режим ограждающих конструкций. Однако чрезмерная воздухопроницаемость ограждения крайне нежелательна, так как в зимнее время приток холодного воздуха вызывает дополнительные теплопотери, ухудшает микроклимат, снижает теплозащитные качества ограждающих конструкций, охлаждает помещения. Мероприятия по увеличению толщины конструкции или повышению температуры воздуха во избежание ухудшения теплового режима помещения приводят, в первом случае, к увеличению капитальных затрат на конструкции, а во втором – к тепловым потерям и прибавлению энергии на отопление. Вытяжка теплого воздуха через конструкцию во внешнюю среду ухудшает влажностный режим конструкции и может быть причиной повышенной конденсации водяных паров в ее толще, что вызывает множество проблем – от переувлажнения и бактериального заражения до разрушения ограждающей конструкции. Кроме того, воздухопроницаемость способствует переносу дыма, запахов, пыли и других загрязнений как извне, так и между помещениями в здании.

Фильтрация воздуха через ограждающие конструкции происходит под влиянием разности давлений воздуха на противоположных поверхностях конструкции. Разность общих давлений воздуха по обе стороны ограждения может возникнуть как под воздействием теплового напора, обусловленного разностью температур внутреннего и наружного воздуха, так и под влиянием ветрового напора.

Величина теплового напора зависит от разности температур, а также от высоты помещения или здания.

В нижней зоне здания или помещения через любые неплотности и отверстия в ограждающих конструкциях происходит приток тяжелого холодного наружного воздуха внутрь помещения (инfiltrация), а в верхней зоне или в верхних этажах – удаление легкого теплого воздуха наружу (экcфилтpация). Эти явления, вызывающие естественный воздухообмен в помещении или здании, в особенности заметны при сильных морозах, когда разность температур наружного и внутреннего воздуха отапливаемых помещений особенно велика. В связи с этим сильнее всего подвержены охлаждению в холодное время комнаты первых этажей, где наблюдается наиболее активная инfiltrация.

Можно представить, что между нижней и верхней частями помещения на некоторой высоте располагается нейтральная зона – условная горизонтальная плоскость, для которой внутреннее давление в рассматриваемый момент времени соответствует внешнему, в связи с чем на уровне этой поверхности филтpации не происходит (рисунок 4.20).

Удельный вес холодного наружного воздуха γ_{ext} , Н/м³, больше удельного веса теплого внутреннего воздуха γ_{int} , и величина разности давлений, возникающая под влиянием теплового напора Δp_t , Па, может быть определена по формуле

$$\Delta p_t = h(\gamma_{ext} - \gamma_{int}), \quad (4.79)$$

где h – вертикальное расстояние рассматриваемого участка ограждающей конструкции от нейтральной поверхности, м.

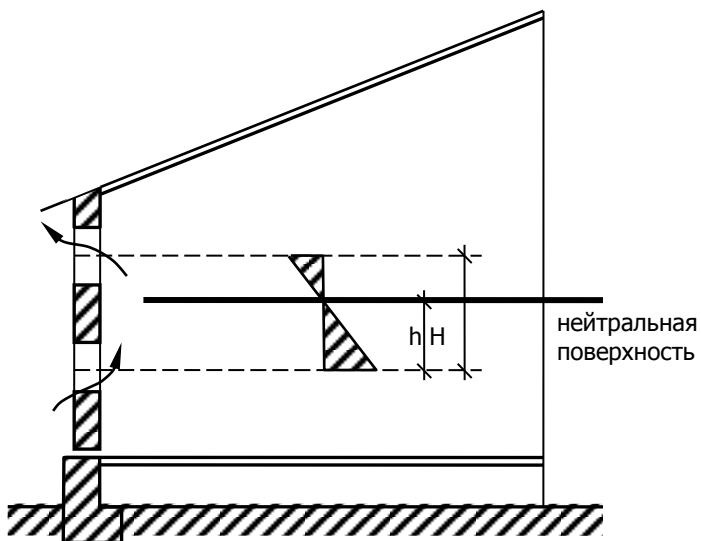


Рисунок 4.20 – Положение нейтральной поверхности в помещении

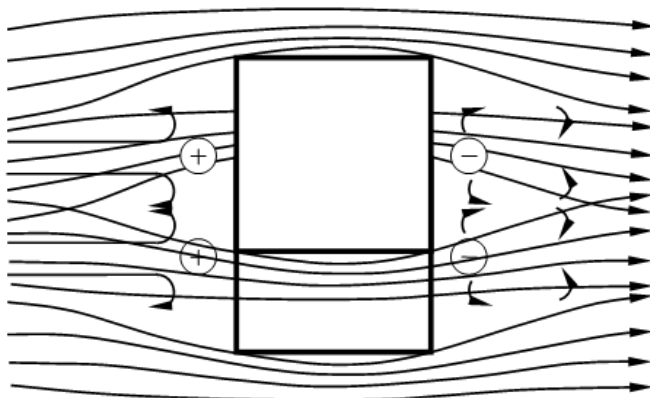


Рисунок 4.21 – Движение воздушного потока, огибающего здание



– зона повышенного давления;



– зона пониженного давления.

Значения вычисляются γ_{ext} и γ_{int} вычисляются по формулам:

$$\gamma_{ext} = \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{ext}}; \quad (4.80)$$

$$\gamma_{int} = \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{int}}, \quad (4.81)$$

где t_{ext} – расчетная температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$, принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 ;

t_{int} – расчетная температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

γ_0 – удельный вес воздуха при температуре 0 $^{\circ}\text{C}$,

$$\gamma_0 = 12,65 \text{ Н/м}^3 .$$

При тепловом напоре и отсутствии ветра высота расположения нейтральной поверхности h над приточными проемами составляет $h \approx 0,55H$,

где H – наибольшее расстояние между центрами приточных и вытяжных проемов (или общая высота здания). С учетом этого разность давлений, возникающая под влиянием теплового напора

$$\Delta p_t = 0,55H(\gamma_{ext} - \gamma_{int}) . \quad (4.82)$$

В холодный период года положение нейтральной поверхности в зданиях, использующих только естественную вентиляцию, смещается в верхнюю часть здания и $h \approx 0,7H$.

В общем случае в жилых зданиях предусматривают так называемую смешанную вентиляцию, то есть одновременно естественную и механическую вентиляцию. В помещениях обычно применяются системы вентиляции двух типов: приточно-вытяжная и вытяжная. В первом случае в квартиру подается и из нее извлекается одинаковое количество воздуха, поэтому расположение нейтральной поверхности от действия вентиляции не меняется, а следовательно, и естественный воздухообмен

через неплотности остается тем же. Во втором случае воздух из квартиры только удаляется. Это повышает уровень расположения нейтральной зоны, а, следовательно, влияет на воздухообмен через неплотности ограждений.

По мере увеличения перепада температур внутреннего и наружного воздуха, а также числа этажей в здании растет разность давлений, вызываемая тепловым напором.

Кроме теплового напора на интенсивность воздухопроницаемости влияет ветровой напор, который обуславливается действием на здание ветра. Разность давлений воздуха, вызываемая ветровым напором, зависит от его скорости и от аэродинамических характеристик здания. В случае бесконечно высокого препятствия, расположенного перпендикулярно направлению ветра, разность давлений воздуха по обе его стороны определяется только скоростью ветра

$$\Delta p_v = \frac{\gamma_{ext} v^2}{2g}, \quad (4.83)$$

где γ_{ext} – удельный вес наружного воздуха, Н/м^3 ;

v – скорость ветра, м/с ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

В случае конечных размеров здания ветровой поток, огибая здание, создает повышенное давление с наветренной стороны здания и пониженное давление (так называемую «ветровую тень») с подветренной стороны (рисунок 4.21).

Перепад давления в этом случае определяется аэродинамическими коэффициентами K_1 и K_2 (для наветренного и подветренного фасадов), зависящими от формы здания и направления ветра. Аэродинамический коэффициент с наветренной стороны всегда имеет положительное значение, превышающее аэродинамический коэффициент с подветренной стороны, значение которого чаще бывает отрицательным, достигая $-(0,7-0,85)$, следовательно, и давление на наветренную ограждающую поверхность будет больше, чем на подветренную. Для вертикальных плоских ограждений при направлении ветра перпендикулярно к их поверхности значения аэродинамических коэффициентов прибли-

женно равны: для наветренной стороны $K_1 = 0,8$, для подветренной $K_2 = -0,4$. Тогда величина избыточного давления за счет ветрового напора

$$\Delta p_v = \frac{K_1 - K_2}{2} \cdot \frac{\gamma_{ext} v^2}{2g} = 0,03 \gamma_{ext} v^2. \quad (4.84)$$

При расчетах ветрового напора скорость ветра v принимается по [11], равной максимальной из средних скоростей ветра по румбам за январь, повторяемость которых составляет 16% и более. Для типовых проектов скорость ветра принимается равной 5 м/с.

При совместном воздействии ветра и теплового напора разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции определяется как сумма соответствующих разностей давлений по формуле

$$\Delta p = 0,55H(\gamma_{ext} - \gamma_{int}) + 0,03 \gamma_{ext} v^2 \quad (4.85)$$

Можно провести математическую аналогию между процессами теплопроводности (теплопереноса) и фильтрации воздуха (массопереноса). **Воздушный поток** или **воздухопроницаемость** G – количество воздуха в кг, проходящего через 1 м² однородной ограждающей конструкции за 1 ч.

В случае стационарного процесса воздухопроницаемости воздушный поток определяется по формуле

$$G = \frac{i \cdot \Delta p}{\delta}, \quad (4.86)$$

где G – воздушный поток (воздухопроницаемость), кг/(м²·ч);

Δp – разность давлений воздуха у наружной и внутренней поверхности, Па;

δ – толщина слоя, м;

i – коэффициент воздухопроницаемости.

Под **коэффициентом воздухопроницаемости** i , кг/(м·ч·Па), понимается количество воздуха в кг, проходящего через слой однородного материала толщиной 1 м и площадью 1 м² за 1 ч при разности давлений на противоположных поверхностях слоя в 1 Па.

Значения коэффициента воздухопроницаемости изменяются в широких пределах. Причиной воздухопроницаемости материалов является наличие пор, дефектов, каналов для проникновения воздуха. Воздухопроницаемость зависит от структуры материала и его влажности. Влажные материалы содержат в порах капиллярную влагу и поэтому имеют меньшую воздухопроницаемость. Некоторые плотные материалы с очень мелкими порами, однородной структурой и без трещин практически не пропускают молекул воздуха. Поэтому для таких предельно плотных материалов, как стекло, листовой алюминий, плотная керамика, многослойные рулонные кровли и др., коэффициент воздухопроницаемости практически равен нулю. В то же время, если в плотном материале имеются тончайшие трещины, иногда не различимые глазом, его воздухопроницаемость резко возрастает. Поэтому коэффициент воздухопроницаемости является гораздо менее строгим понятием, чем коэффициент теплопроводности.

При прохождении воздушного потока через слой однородного материала последний оказывает воздушному потоку сопротивление, называемое **сопротивлением воздухопроницанию**

R_{inf} .

Для сплошных слоев материала сопротивление воздухопроницанию R_{inf} , м²·ч·Па/кг, определяется по формуле

$$R_{inf} = \frac{\delta}{i}, \quad (4.87)$$

где δ и i – то же, что и формуле (4.82).

Сопротивление воздухопроницанию численно равно разности давлений воздуха на противоположных поверхностях конструктивного слоя, при которой через 1 м² слоя за 1 ч проникает 1 кг воздуха.

С учетом (4.87) воздушный поток G ,

определяемый по формуле (4.86), равен

$$G = \frac{\Delta p}{R_{inf}}. \quad (4.88)$$

Сопротивление воздухопроницанию многослойной ограждающей конструкции R_{inf} определяется как сумма сопротивлений воздухопроницанию отдельных конструктивных слоев ограждения

$$R_{inf} = R_{inf 1} + R_{inf 2} + \dots + R_{inf n}, \quad (4.89)$$

где $R_{inf 1}, R_{inf 2}, \dots, R_{inf n}$ – сопротивления воздухопроницанию слоев ограждающей конструкции.

Воздухопроницаемость ограждений обуславливается воздухопроницаемостью материала и проникновением воздуха через швы конструкции, трещины, щели и т.п. Она, как правило, отличается по величине от воздухопроницаемости материалов конструкции. Воздухопроницание сопряжений между отдельными элементами ограждающей конструкции часто во много раз больше воздухопроницания материалов, из которых выполнены эти элементы. Так, для каменной или кирпичной кладки более воздухопроницаемыми оказываются швы кладки, недостаточно плотно заполненные раствором. В связи с этим при расчетах воздухопроницаемости надежнее пользоваться не величинами толщины δ и коэффициента воздухопроницаемости материала i , а экспериментально установленными сопротивлениями воздухопроницанию отдельных конструктивных слоев. В [12] приведены расчетные величины сопротивлений воздухопроницанию наиболее распространенных материалов и конструктивных элементов.

В целях устранения недопустимого охлаждения ограждающей конструкции при воздухопроницании нормами ограничивается воздушный поток, проникающий через ограждающие конструкции зданий и сооружений. Нормируемая воздухопроницаемость G_n для различных ограждающих конструкций приведена в [12].

Расчетное сопротивление воздухопроницанию ограждаю-

щих конструкций R_{inf} , за исключением заполнений световых проемов, должно быть не менее требуемого сопротивления воздухопроницанию R_{inf}^{req} ($R_{inf} \geq R_{inf}^{req}$), определяемого из формулы (4.84)

$$R_{inf}^{req} = \frac{\Delta p}{G_n}. \quad (4.90)$$

Нормирование сопротивления воздухопроницанию имеет целью ограничить дополнительные потери тепла, вызываемые фильтрацией воздуха через ограждающую конструкцию при расчетной разности давлений Δp .

Следует отметить, что воздухопроницаемость ограждений в значительной степени зависит от качества выполняемых работ. При использовании в жилых и общественных зданиях стен из сборных элементов (крупноразмерных панелей, блоков) необходимо обеспечивать малую проницаемость воздуха в стыках и сопряжениях между сборными элементами. Так, экспериментально установлено, что сопротивление воздухопроницанию стыков, заполненных обычным цементным раствором, уменьшается примерно в 10 раз в течение первых 2,5 лет эксплуатации. Это объясняется образованием трещин в затвердевшем цементном камне под влиянием атмосферных воздействий и температурной деформации. Эти процессы значительно замедляются при уплотнении стыков упругими прокладками или защите их специальными эластичными герметизирующими покрытиями.

В наибольшей степени подвержены воздухопроницанию конструкции окон и дверей. Теплофизическими особенностями светопрозрачных ограждений являются их низкие по сравнению со стенами теплозащитные качества и повышенная воздухопроницаемость, что обуславливает неравномерную инфильтрацию воздуха через неплотности оконных проемов по высоте здания. Установлено, что проникание холодного воздуха через неплотности оконных проемов снижает их теплозащиту в среднем в два раза. Наибольшая воздухопроницаемость окон, отрицательно сказывающаяся на микроклимате помещений, наблюдается в холод-

ное время года. Струи холодного воздуха, попадая в помещение через щели окон, вызывают понижение температуры внутри помещения в первую очередь в непосредственной близости от окон, создавая там зону дискомфорта. Коэффициент воздухопроницаемости швов традиционных конструкций окон с деревянными переплетами достигает $10 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. Для уменьшения их воздухопроницаемости и повышения звукоизолирующей способности целесообразно в сопряжениях между сборными и глухими переплетами, а также в притворах дверей предусматривать уплотняющие упругие прокладки из резины, эластичной пористой пластмассы, пенополиуретана, полушерстяного шнура и др., а также заделку паклей, шлаковатой и другими уплотняющими материалами зазоров между оконной коробкой и поверхностью проема.

Современное поколение наружных светопрозрачных ограждающих конструкций, выполняемых по евростандарту, обладают более низкой воздухопроницаемостью, (более герметичны) по сравнению с окнами и дверями прежнего времени, и в закрытом положении они даже в нижних этажах не только не пропускают излишнюю инфильтрацию, но и не обеспечивают нормативного воздухообмена, что позволяет при определении расхода тепла на отопление независимо от этажа принимать равномерную инфильтрацию через окна в объеме нормативного воздухообмена (с учетом приоткрывания створок окна или установки воздухопропускных клапанов). Современные окна имеют коэффициент воздухопроницаемости швов менее $0,1 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. С одной стороны это позволяет значительно сократить теплопотери, но с другой стороны, самовентиляция за счёт неплотностей в окне перекрыта, а значит, и для естественного воздухообмена поставлена преграда. Поскольку в проектах зданий естественная вентиляция помещений рассчитывается в соответствии с нормами определенного притока воздуха для жизнеобеспечения людей и безопасной работы бытовых газовых приборов, то снижение воздухопроницаемости окон может привести к небезопасным последствиям. Кроме того, следствием нарушения воздухообмена является увеличение влажности в помещениях. В результате при слабой теплоизоляции стен зданий может происходить образование конденсата на внутренних частях конструкций. Таким образом, здесь вступают в противоречие сопротивление теплопередаче и сопротивление воздухопроницаемости окон,

т.к., с одной стороны, современные окна должны обладать теплоизолирующими свойствами, а с другой — определенной воздухопроницаемостью. Решением этой проблемы является использование системы самовентиляции через каналы камер профилей или через встроенные в оконные блоки специальные климатические клапаны. Эффективным средством обеспечения нормального микроклимата также является регулярное проветривание жилых помещений с помощью открывания форточек (или створок).

Расчетное сопротивление воздухопроницанию окон и балконных дверей жилых и общественных зданий, а также окон и фонарей производственных зданий должно быть не менее требуемого

($R_{inf} \geq R_{inf}^{req}$), определяемого по формуле

$$R_{inf}^{req} = \left(\frac{1}{G_n} \right) \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right)^{2/3}, \quad (4.91)$$

где G_n – нормируемая воздухопроницаемость светопрозрачной конструкции, определяемая по [12] при $\Delta p_0 = 10 \text{ Па}$;

Δp – расчетная разность давлений;

$\Delta p_0 = 10 \text{ Па}$ – разность давления воздуха на наружной и внутренней поверхностях светопрозрачной конструкции, при которой определяется расчетное сопротивление воздухопроницанию R_{inf} .

Величину сопротивления воздухопроницанию выбранного типа светопрозрачной конструкции определяют по формуле

$$R_{inf} = \left(\frac{1}{G_s} \right) \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right)^n, \quad (4.92)$$

где G_s – воздухопроницаемость светопрозрачной конструк-

ции при $\Delta p_0 = 10 \text{ Па}$, полученная в результате сертификационных исследований;

n – показатель режима фильтрации светопрозрачной конструкции, полученный в результате сертификационных испытаний.

В случае отсутствия сертификационных данных расчетное сопротивление воздухопроницанию R_{inf} для различных конструкций окон с деревянными переплетами и с различными типами уплотняющих прокладок допускается принимать по табл. 4.12.

В наибольшей степени подвержены воздухопроницанию конструкции окон и дверей. Теплофизическими особенностями светопрозрачных ограждений являются их низкие по сравнению со стенами теплозащитные качества и повышенная воздухопроницаемость, что обуславливает неравномерную инфильтрацию воздуха через неплотности оконных проемов по высоте здания. Установлено, что проникание холодного воздуха через неплотности оконных проемов снижает их теплозащиту в среднем в два раза. Наибольшая воздухопроницаемость окон, отрицательно сказывающаяся на микроклимате помещений, наблюдается в холодное время года. Струи холодного воздуха, попадая в помещение через щели окон, вызывают понижение температуры внутри помещения в первую очередь в непосредственной близости от окон, создавая там зону дискомфорта. Коэффициент воздухопроницаемости швов традиционных конструкций окон с деревянными переплетами достигает $10 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. Для уменьшения их воздухопроницаемости и повышения звукоизолирующей способности целесообразно в сопряжениях между сборными и глухими переплетами, а также в притворах дверей предусматривать уплотняющие упругие прокладки из резины, эластичной пористой пластмассы, пенополиуретана, полушерстяного шнура и др., а также заделку паклей, шлаковатой и другими уплотняющими материалами зазоров между оконной коробкой и поверхностью проема.

Современное поколение наружных светопрозрачных ограждающих конструкций, выполняемых по евростандарту, обладают более низкой воздухопроницаемостью, (более герметичны) по сравнению с окнами и дверями прежнего времени, и в закрытом положении они даже в нижних этажах не только не пропускают излишнюю инфильтрацию, но и не обеспечивают нормативного

воздухообмена, что позволяет при определении расхода тепла на отопление независимо от этажа принимать равномерную инфильтрацию через окна в объеме нормативного воздухообмена (с учетом приоткрывания створок окна или установки воздухопропускных клапанов). Современные окна имеют коэффициент воздухопроницаемости швов менее $0,1 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. С одной стороны это позволяет значительно сократить теплотери, но с другой стороны, самовентиляция за счёт неплотностей в окне перекрыта, а значит, и для естественного воздухообмена поставлена преграда. Поскольку в проектах зданий естественная вентиляция помещений рассчитывается в соответствии с нормами определенного притока воздуха для жизнеобеспечения людей и безопасной работы бытовых газовых приборов, то снижение воздухопроницаемости окон может привести к небезопасным последствиям. Кроме того, следствием нарушения воздухообмена является увеличение влажности в помещениях. В результате при слабой теплоизоляции стен зданий может происходить образование конденсата на внутренних частях конструкций. Таким образом, здесь вступают в противоречие сопротивление теплопередаче и сопротивление воздухопроницаемости окон, т.к., с одной стороны, современные окна должны обладать теплоизолирующими свойствами, а с другой — определенной воздухопроницаемостью. Решением этой проблемы является использование системы самовентиляции через каналы камер профилей или через встроенные в оконные блоки специальные климатические клапаны. Эффективным средством обеспечения нормального микроклимата также является регулярное проветривание жилых помещений с помощью открывания форточек (или створок).

Таблица 4.12 – Сопротивление воздухопроницанию заполнений световых проемов

Заполнение светового проема	Число уплотнений притворов заполнения	Сопротивление воздухопроницанию R_{inf} , $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ (при $\Delta p_0 = 10 \text{Па}$) заполнений световых проемов с деревянными переплетами с уплотнением прокладками из		
		пенополиуретана	губчатой резины	полушерстяного шнура
Одинарное или двойное остекление в спаренных переплетах	1	0,26	0,16	0,12
Двойное остекление в отдельных переплетах	1	0,29	0,18	0,13
	2	0,38	0,26	0,18
Тройное остекление в раздельно-спаренных переплетах	1	0,30	0,18	0,14
	2	0,44	0,26	0,20
	3	0,56	0,37	0,27

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кувшинов Ю.Я. «Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения». М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. 184 с.
2. Полушкин В.И., Русак О.Н., Бурцев С.И., Анисимов С.М., Васильев В.Ф. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Теоретические основы создания микроклимата в помещении. С.–П.: Профессия, 2002. 160 с.
3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. –С.–П.:Изд. «АВОК Северо-Запад»,2006. 400 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88 . Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
5. СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
6. ГОСТ 30494 . Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
7. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях.
8. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.
9. ГН 2.2.5.686-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
10. ГОСТ Р ЕН 13779-2007. Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования.
11. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99.
12. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
13. Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
14. Закон №261 – ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности.»
15. Малявина Е.Г. Теплопотери здания: справочное пособие – М.: АВОК-ПРЕСС,2007.144с.
16. Малявина Е.Г. Строительная теплофизика. Учебное пособие – М.: МГСУ,2011. 152 с.
17. В.Блази. Справочник проектировщика. Строительная физика. – М.: Техносфера, 2005. 536 с.