

## ГЛАВА 3. ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДЕНИЯ

Наружные ограждения зданий предохраняют помещения от непосредственных атмосферных воздействий, а также выполняют функции защиты и регулирования воздушного, теплового и влажностного режимов помещения. Через них происходит передача теплоты, влаги и воздуха, но этот процесс не должен приводить к переохлаждению и переувлажнению конструкций, поскольку повышение влажности ограждений снижает их теплозащитные свойства и долговечность. Поэтому при проектировании наружных ограждений необходимо принимать меры для предотвращения возможного увлажнения материалов ограждающей конструкции, применять материалы с минимальной влажностью, учитывать не только тепло-технический, но и влажностный режим ограждений.

### 3.1 Причины увлажнения и изменения влажностного состояния ограждения

Различают несколько видов влаги, которые вызывают нежелательное повышение влагосодержания материалов, входящих в состав ограждающих конструкций зданий. Такова *технологическая* (начальная) *влага*, вносимая в конструкцию при ее бетонировании или при применении увлажненных материалов; *грунтовая влага*, всасываемая капиллярами фундаментов и стен после утраты непроницаемости гидроизоляции или при ее отсутствии; *атмосферная влага* в виде косых дождей или инея, выпадающего и при повышении температуры тающего на наружной поверхности стен; *конденсирующаяся влага*, увлажняющая внутреннюю часть ограждений в помещениях с повышенной влажностью; *парообразная влага*, диффундирующая сквозь ограждения отапливаемых помещений и при неблагоприятных условиях конденсирующаяся в их толще.

Любой из этих видов влаги может оказаться причиной повышенного влажностного состояния ограждающих конструкций; увеличение влагосодержания материалов в конструкциях эксплуатируемых зданий всегда нежелательно, а для ограждений отапливаемых зданий с нормальным влажностным режимом просто недопустимо. В результате длительных и постепенно затухающих процессов влагообмена вновь осуществленной и введенной в эксплуатацию ограждающей конструкции с окружающей воздушной средой, ее конструктивные слои приобретают равновесное влаго-

содержание; в правильно запроектированных конструкциях установившееся влагосодержание должно быть возможно близким к воздушно-сухому состоянию и сравнительно незначительно изменяться в различные периоды года.

Конструкции с воздушно-сухим состоянием материалов обладают достаточно высокими теплозащитными свойствами; относительная, неизменность воздушно-сухого состояния в течение годового цикла является необходимой предпосылкой для обеспечения постоянства эксплуатационных качеств и достаточной долговечности конструкции.

Избыточное влажностное состояние ограждающих конструкций в особенности характерно в первые годы эксплуатации вновь выстроенных зданий и в большой степени зависит от начальной (технологической) влажности материала конструкции. Наибольшее количество начальной влаги (например, вносимой при бетонировании) отмечается в конструкциях из легких бетонов, укладываемых на месте, а также в крупноблочных и массивных кирпичных стенах (избыточное влагосодержание крупных блоков, смачивание кирпича и кладка его на растворах с большим количеством влаги, штукатурка мокрым способом и т. д.).

В слоях ограждающих конструкций, граничащих с достаточно сухой воздушной средой, влажность материала быстро уменьшается и достигает верхнего предела гигроскопичности (предела сорбционного увлажнения). Этим заканчивается первый период естественной сушки; в дальнейшем процесс высыхания, завершением которого является достижение конструкцией равновесной (нормальной) влажности, существенно замедляется. Продолжительность естественной сушки, а также и величина равновесной (нормальной) влажности конструкции, зависят от температуры и ее колебаний, влажностного состояния окружающей воздушной среды, характерного размера высыхающей конструкции и свойств материала, из которого она выполнена.

Наружные стены, выполненные из быстро высыхающих материалов и обладающие ограниченной толщиной, а также бесчердачные покрытия, достигают влажностного состояния, приближающегося к нормальному, в течение одного достаточно жаркого летнего периода. Массивные стены, выполненные из медленно высыхающего материала, сохнут в течение ряда лет, причем и после естественного завершения этого процесса влажность их слоев, удаленных от поверхности, может оказаться достаточно высокой даже в помещениях с влажностью воздуха не выше нормальной. При использовании пустотных

изделий для таких стен их нормальная влажность обычно снижается (например, до 4-5%), а теплозащитные свойства повышаются.

Для обеспечения удовлетворительного влажностного состояния многослойной конструкции важно, чтобы возможные эпизодические увлажнения внешних слоев (например, атмосферной влагой) не влекли за собой распространения жидкой влаги по всей толщине конструкции.

В конструкциях многослойных стен это обеспечивается применением материалов с различной влагоемкостью и крупностью пор. Влага, содержащаяся во внешнем увлажненном слое с мелкими порами, не сможет распространиться внутрь стены с заполнением из крупнопористых невлагоемких материалов.

Если средняя часть стены выполнена из таких материалов (пеностекло, ячеистая керамика с остеклованной поверхностью и т. д.), ее влажность будет меньше (рис.3.1, а), чем во внешних слоях, обычно выполняемых из плотных материалов с более мелкими порами (конструктивный бетон и т. д.). Такое распределение влажности в стенах благоприятно для жилых помещений во влажном климате, влажность воздуха в которых не должна превышать нормальной, несмотря на то, что стены подвергаются увлажнению атмосферной влагой. Эта же конструктивная схема в случае ее применения для стен влажных помещений с пониженной температурой внутреннего воздуха предотвратит перемещения влаги изнутри наружу, происходящие преимущественно в жидкой фазе, и обеспечит относительно сухое состояние стен.

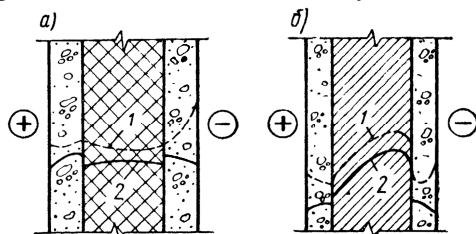


Рис. 3.1 – Распределение влажности в слоистых стенах со средней частью, выполненной из материалов с различными свойствами: а – из крупнопористых невлагоемких материалов; б – из гигроскопических, влагоемких, медленно высыхающих; 1– при увлажнении конструкции; 2– при высыхании конструкции.

Наоборот, если средняя часть стены выполнена из легко смачиваемых и медленно высыхающих мелкопористых материалов с повышенной влагоемкостью (например, глинистых и грунтовых), ее влажность будет выше, чем во внешних облицовочных слоях (рис.3.1, б).

В других случаях и особенно при ограниченной толщине и стойкости внешних слоев высокая влажность средней части стены может привести к преждевременному разрушению конструкции. В частности, устройство стен из легких бетонов, укладываемых между

плотным отделочным слоем (например, листами сухой гипсовой штукатурки) и наружным конструктивным слоем (например, кирпичной или бетонной облицовкой), используемыми в качестве опалубки, не может быть рекомендовано. Применение таких стен, помимо повышенной влажности, приводит к их постепенному разрушению, проявляющемуся в короблении, выпучивании и отслоении отделки или в сокращении срока службы наружной части конструкции.

Таким образом, использование в смежных конструктивных слоях материалов с различными потенциалами переноса влаги может вызвать улучшение или, наоборот, снижение теплофизических свойств ограждения, в зависимости от особенностей, внешних воздействий и условий эксплуатации. Такие особенности в большой степени зависят от параметров воздушной среды, соприкасающейся с ограждениями здания.

### 3.2 Влага воздуха помещения

При расчете влагопередачи через ограждения необходимо знать влажностное состояние воздуха в помещении, определяемое выделением влаги и воздухообменом. Источниками влаги в жилых помещениях являются бытовые процессы (приготовление пищи, мытье полов и пр.), в общественных зданиях находящиеся в них люди, в промышленных зданиях технологические процессы. Воздух может ассимилировать избыточную влагу и при вентиляции помещения удалять ее.

Количество влаги в воздухе определяется его влагосодержание  $d$ , г влаги на 1 кг сухой части влажного воздуха. Кроме того, его влажностное состояние характеризуют упругостью или парциальным давлением водяных паров  $e$ , Па (мм.рт.ст), или относительной влажностью  $\varphi$ , %.

Воздух обладает определенной влагоудерживающей способностью. Например, при  $20^{\circ}\text{C}$  каждый 1кг.сухого воздуха удерживает при полном насыщении около 15г водяных паров. При низкой температуре способность воздуха удерживать влагу становится совершенно незначительной (1,5г при  $12^{\circ}\text{C}$ ), с повышением температуры она возрастает (50г при  $400^{\circ}\text{C}$ ).

Чем суше воздух, тем с большей силой удерживается в нем водяной пар, тем больше энергия связи влаги с воздухом. При высокой относительной влажности влага удерживается воздухом слабо, а при его перенасыщении она начинает выпадать, образуя микрокапли воды, которые находятся в воздухе во взвешенном состоянии в виде тумана. При увеличении влаж-

ности микрокапли сливаются, образуя крупные капли, осаждающиеся из воздуха. Упругость водяного пара  $e$  качественно отражает свободную энергию влаги в воздухе. Величина  $e$  возрастает от нуля до максимальной упругости  $E$ , соответствующей полному насыщению воздуха и максимальной величине свободной энергии влаги. Упругость  $e$  в этой связи можно рассматривать как измеритель энергетического потенциала водяных паров в воздухе.

Диффузия влаги происходит в воздухе от мест с большей упругостью водяных паров к местам с меньшей упругостью, т.е. от среды с более высоким потенциалом к среде с низким потенциалом.

Влагосодержание  $d$  возрастает с увеличением упругости водяного пара  $e$  воздуха. Изменение  $d$  от  $e$  определяет (по аналогии с теплоемкостью) влагоемкость воздуха. Влагоемкость воздуха  $\eta_{\text{возд}}$  г/(кг·Па) [г/(кг·мм.рт.ст.)], показывает, насколько возрастает влагосодержание воздуха  $\Delta d$ , г/кг, при увеличении упругости  $\Delta e$  на 1 Па (1 мм.рт.ст.)

$$\eta_{\text{возд}} = \frac{\Delta d}{\Delta e} \quad (3.1)$$

На рис. 3.2 показана зависимость  $d$  от  $e$  и кривая локальных значений влагоемкости воздуха.

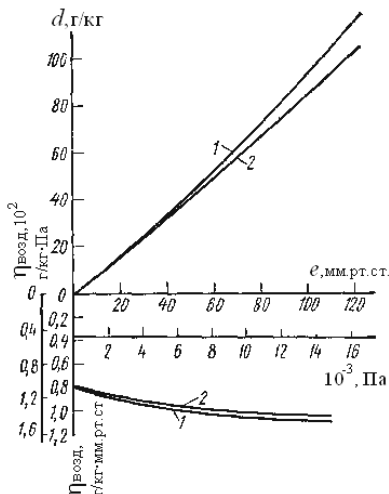


Рис. 3.2 – Зависимость содержания влаги в воздухе и влагоемкости воздуха от упругости водяного пара на 1 кг сухого (1) и влажного (2) воздуха.

Упругость полного насыщения воздуха  $E$ , Па (мм.рт.ст.), зависит от температуры  $t_{нас}$ . С возрастанием температуры насыщения величина  $E$  увеличивается. Приближенную зависимость  $E$ , Па (мм.рт.ст.), от  $t_{нас}$  (при  $t_{нас} > 0$ ) можно найти из выражения

$$E = 476 + (11,5 + 1,61 \cdot t_{нас})^2 \quad (3.2)$$

В расчетах необходимо знать температуру  $t_{нас}$ , которой соответствует то или иное значение  $E$ . эту зависимость можно определить в виде

$$t_{нас} = 37,2 - (7 - 0,0015E)^2 \quad (3.3)$$

Уравнение баланса влаги в воздухе помещения имеет вид

$$\sum G_{пр,i} d_{пр,i} + \sum W_j - \sum G_{ух,i} d_{ух,i} = 0, \quad (3.4)$$

где  $G$  – массовый расход отдельных составляющих (по притоку «пр» и вытяжке «ух») воздухообмена, кг/ч;

$d_{пр}$  и  $d_{ух}$  – влагосодержание приточного и уходящего воздуха, г/кг. сух.возд.;

$W$  – интенсивность отдельных влаговыделений, кг/ч.

В результате конвективного перемешивания воздух имеет приблизительно одинаковую влажность в объеме помещения.

Величина  $d_v$  изменяется в течение суток и года. Поверхности строительных конструкций, обращенные в помещение, обладают способностью воспринимать и отдавать влагу соответственно при повышении и понижении влажности воздуха. При суточных и сезонных изменениях влажности воздуха поглощение и выделение влаги поверхностями ограждений можно учесть в уравнении (3.4) в форме дополнительных источников и стоков влаги. Водяной пар передается во влажном неподвижном воздухе к поверхностям посредством диффузии. Если поверхность сорбирует водяной пар, то в слое воздуха около поверхности концентрация водяного пара уменьшается. За счет разности концентраций происходит диффузия водяного пара.

Диффузию водяных паров в воздухе удобнее определять в зависимости от градиента упругости водяных паров. Миграцию влаги под влиянием перепада упругостей называют паропроницаемостью. Коэффициент паро-

проницаемости  $\mu$ , г/(м·ч·МПа), аналогичен коэффициенту теплопроводности и равен массе влаги, г, проникающей через  $m^2$  сечения воздуха в час при перепаде упругости водяных паров в воздухе в 1 МПа на 1 м.

Поток пара, проходящий через пограничный слой воздуха около поверхности, соответствует интенсивности  $i$ , г/( $m^2 \cdot ч$ ), влагообмена поверхности с воздухом, которую в инженерных расчетах принято определять в виде

$$i = \beta_e (e_g - e_n) \quad (3.5)$$

где  $\beta_e$  – коэффициент влагообмена на поверхности, г/( $m^2 \cdot ч \cdot МПа$ );

$e_g$  и  $e_n$  – упругость водяных паров в воздухе объема помещения и на поверхности, МПа.

Величина  $\beta_e$  зависит от температуры, влажности, подвижности воздуха в помещении и температуры поверхности. В условиях естественной конвекции  $\beta_e$  может быть рассчитана по формуле

$$\beta_e = 42,9 \Delta t^{1/3} \Delta e^{2/5}, \quad (3.6)$$

где  $\Delta t$  и  $\Delta e$  – разности температур и упругостей водяных паров в воздухе и на поверхности.

### 3.3 Связь влаги со строительными материалами

По характеру своего взаимодействия с водой твердые материалы могут быть разделены на смачиваемые (гидрофильные) и несмачиваемые (гидрофобные).

К первым относятся, например, гипс, вяжущие на водной основе, силикатный кирпич, большинство разновидностей бетона; ко вторым – битумы, смолы, минераловатные изделия на основе несмачиваемых вяжущих, асбест и т. д.

Для большинства строительных материалов (например, бетонов, кирпича и т. д.) характерна капиллярно-пористая структура, особенности которой, наравне со степенью смачивания, определяют характер взаимодействия материала с влагой при пребывании его в воздушно-влажной среде или непосредственном контакте с водой.

В результате такого взаимодействия изменяются физико-механические свойства материалов, изделий из них и отдельных конструкций зда-

ний. Кроме того, для материалов гидрофильных, получаемых на основе структурирования водных растворов вяжущих или других материальных дисперсных частиц, сами свойства стабилизовавшейся структуры материала, т.е. строение и геометрические размеры пор и капилляров, зависят от начального влагосодержания и взаимодействия вещества с влагой, в процессе технологии производства строительных деталей или изделий.

Следовательно, особенности взаимодействия материалов с влагой важны при эксплуатации любых строительных конструкций, соприкасающихся с влажной средой, а для гидрофильных материалов эти особенности и начальное влагосодержание исходных растворов влияют на технологию производства и определяют уровень структурно-механических свойств материала и изделий из него.

По природе энергии связывания влаги с веществом или материалом и величине энергетического уровня этой связи различаются следующие виды влаги:

*1. Влага, химически связываемая, необходимая для возникновения и завершения химических реакций, образования нового вещества и формирования физико-механических свойств материала в изделии или конструкции.*

Эта влага входит в состав структурной решетки материала в виде вновь возникших химических соединений и кристаллогидратов и отличается высоким энергетическим уровнем ионной и молекулярной связи с веществом.

Естественные колебания температуры, происходящие в течение года на поверхности ограждающих конструкций, не в состоянии нарушить эту связь и выделить химически связанную влагу; из физических методов воздействий она частично может быть удалена только прокаливанием.

*2. Влага физико-химической связи, адсорбированная на внутренней поверхности пор и капилляров сформировавшейся структурной решетки материала.*

Адсорбированная влага может быть подразделена на влагу первичных мономолекулярных слоев, отличающуюся высоким энергетическим уровнем связи с поверхностью гидрофильных материалов, и влагу последующих полимолекулярных слоев, постепенно переходящую в пленку объемной воды, удерживаемой капиллярными силами. Адсорбированная влага мономолекулярных и частично полимолекулярных слоев не может быть удалена путем естественной сушки материала ограждающих конструкций, поскольку для ее отрыва от гидрофильных поверхностей не-



обходима высокая температура и малая относительная влажность окружающей воздушной среды, которые не могут быть достигнуты в условиях внешнего климата и микроклимата помещений с отсутствием больших выделений теплоты.

При естественных колебаниях температуры и влагосодержания наружных ограждающих конструкций, выполненных из гидрофильных материалов, часть влаги физико-химической связи может переходить в химически связанную влагу, результатом чего является повышение прочности бетонов и других гидрофильных неорганических материалов в первые годы эксплуатации зданий.

Для древесины и других органических материалов растительного происхождения характерно, кроме адсорбированной, присутствие в растительных клетках осмотически связанной влаги, постепенно удаляемой в процессе естественной сушки строительных конструкций в воздушной среде с изменяющейся температурой и низкой относительной влажностью. Следствием этого является усушка и изменение геометрических размеров изделий и деталей, отмечаемые, например, в первые годы эксплуатации зданий для элементов деревянных конструкций, даже в том случае, если они выполнены из древесины, считающейся, в соответствии со строительными правилами, воздушно-сухой (18–20% повесу).

3. *Влага физико-механической связи*, удерживаемая в порах и капиллярах силами капиллярного давления и смачивания гидрофильных материалов.

Эта влага перемещается внутри материала при возникновении давлений, превышающих капиллярное и легко испаряется из поверхностных слоев изделия или конструкции, в процессе естественной сушки.

Относительно большей связью с материалом характеризуется влага, заполняющая микрокапилляры и удерживаемая повышенными силами капиллярного давления.

Влага, содержащаяся в макрокапиллярах (за исключением микрослоя у стенок, связанного адсорбционно) приближается по своим физическим свойствам к свободной воде, отличается весьма слабой связью с материалом и наиболее легко испаряется из поверхностных слоев изделия.

Рассмотренные виды влаги обладают различной энергией связи с поверхностью пор и капилляров материала. Наибольшей величиной энергии связи отличается влага химически связываемая, наименьшей – влага, связь которой с поверхностью материала зависит главным образом от физико-механических параметров.

### 3.4 Диффузия водяного пара в сорбирующей среде и влагопроводность

В практике строительного проектирования и в нормативных методах в настоящее время используется теория диффузии пара в сорбирующей среде и влагопроводности. Для них в справочных пособиях имеются необходимые характеристики материала и другие данные. Разработаны расчетные приемы, которые дают удовлетворительное совпадение с наблюдениями и удобны в инженерной практике.

Теория диффузии пара в сорбирующей среде рассматривает процессы влагопередачи только при гигроскопической влажности строительных материалов. Предполагается, что перемещение влаги происходит посредством диффузии под влиянием градиента упругости водяного пара во влажном воздухе, заполняющем поры материала. За потенциал влажности в этой теории принимают упругость водяных паров, предполагая, что сорбированная материалом влага прочно связана с ним и в жидком состоянии неподвижна.

Поток влаги  $i, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , в произвольном сечении материала принимают равным

$$i = -\mu \nabla e, \quad (3.7)$$

где  $\mu$  – коэффициент паропроницаемости,  $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ ;

$\nabla e$  – градиент упругости водяных паров,  $\text{Па}/\text{м}$ .

Процесс паропроницаания осложнен поглощением (сорбцией) влаги материалом при увеличении упругости водяных паров в порах материала и отдачей (десорбцией) влаги при уменьшении упругости.

Предполагается, что изменение влажности материала происходит мгновенно следом за изменением упругости пара в его порах (равенство потенциалов пара и воды) и зависимость между ними полностью определяется соответствующими изотермами сорбции и десорбции.

С увеличением упругости водяного пара на величину  $\Delta e$  влажность материала увеличивается на  $\Delta u$ , т.е.

$$\Delta u = \xi \cdot e, \quad (3.8)$$

где  $\Delta u$  – изменение влажности в произвольном сечении материала,  $\text{г}/\text{кг}$ ;

$\xi$  – удельная пароемкость материала,  $\text{г}/(\text{кг} \cdot \text{Па})$ ;

$\Delta e$  – изменение парциального давления водяного пара в этом сечении, Па.

Уравнения (3.7) и (3.8) полностью аналогичны основным закономерностям процесса теплопроводности и дифференциальное уравнение диффузии пара в сорбирующей среде имеет вид

$$\xi\rho \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial e}{\partial x} \right). \quad (3.9)$$

Решая уравнение (3.9), определяют значения упругости водяного пара в различных сечениях конструкции на некоторые моменты времени и, пользуясь изотермами сорбции (десорбции), переводят их в соответствующие равновесные влажности.

В процессе расчета может оказаться, что к некоторому моменту времени в отдельных сечениях ограждения упругость водяного пара достигает значений, соответствующих максимальным при температуре в этих сечениях. Это определяет начало выпадения конденсата. Расчет по уравнению (3.9) можно установить количество выпадающего конденсата в предположении, что жидкая влага остается неподвижной. Для расчета перемещения влаги при сверх гигроскопической влажности обычно пользуются уравнениями теории влагопроводности.

В теории влагопроводности в качестве потенциала влажности принимают влагосодержание материала. В общем случае в изотермических условиях считают, что поток влаги  $i$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч), при любом соотношении между парообразным и жидкостным перемещениями пропорционален градиенту влагосодержания  $\nabla u$ , кг влаги на 1 кг сухого материала, т.е.

$$i_u = -k\rho \nabla u, \quad (3.10)$$

где  $k$  – коэффициент проводимости влаги в материале, м<sup>2</sup>·ч;  
 $\rho$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>.

В неизотермических условиях во влажном материале предполагают поток влаги  $i_t$ , вызванный градиентом температуры. Это явление называют термовлагопроводностью. Поток влаги  $i_t$  пропорционален градиенту температуры и равен

$$i_t = -k\rho_0 \delta \nabla t. \quad (3.11)$$

Из уравнений (3.10) и (3.11) следует, что в сечении, где равен и противоположен по знаку потоку  $i$ , коэффициент термовлагопроводности  $\delta$  определится зависимостью

$$\delta = \frac{\nabla u}{\nabla t}. \quad (3.12)$$

Дифференциальное уравнение термовлагопроводности имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right). \quad (3.13)$$

Температурный градиент в конструкциях обычно небольшой, поэтому уравнение влажностного поля при сверхгигроскопической влажности принимают в виде

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial u}{\partial x} \right). \quad (3.14)$$

Влияние температуры на интенсивность перемещения влаги учитывают, принимая численные значения коэффициента  $k$  в зависимости не только от влажности материала, но и от температуры.

### 3.5 Сопротивление паропроонианию ограждающих конструкций

При эксплуатации ограждающих конструкций зданий, имеющих расчетные значения сопротивления теплопередаче, должны соблюдаться соответствующие температурно-влажностные условия, зависящие от параметров воздушной среды внутри и снаружи помещения и сопротивление паропроонианию ограждающей конструкции.

В соответствии с требованиями нормативного документа [2] сопротивление паропроонианию ограждающей конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации  $R_{п}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ , должно быть не менее требуемого сопротивления паропроонианию  $R_{п,тр.}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ , определяемого по соотношению

$$R_{п,мп} = R_{п.н.} \cdot \frac{e_{в} - E_{к}}{E_{к} - e_{н.от}}, \quad (3.15)$$

где  $R_{п.н.}$  – сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции в пределах от плоскости возможной конденсации до наружной поверхности ограждающей конструкции,  $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ ;

$e_e = 0,01 \cdot \phi_e \cdot E_e$  – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетной температуре и относительной влажности воздуха, здесь  $j_e$  – расчетная относительная влажность воздуха, %;  $E_e$  – максимальное парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетной температуре воздуха, принимаемое по табл. 3.1;

$E_k$  – максимальное парциальное давление водяного пара в плоскости возможной конденсации, Па, принимаемое по табл. 3.1, при температуре в плоскости возможной конденсации  $t_k, ^\circ C$ , определяемое по формуле

$$t_k = t_e - \frac{t_e - t_{н.от}}{R_T} \left( \frac{1}{\alpha_e} + \sum R_{Ti} \right), \quad (3.16)$$

здесь  $t_e$  – расчетная температура внутреннего воздуха;

$t_{н.от}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период;

$R_T$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции,  $m^2 \cdot ^\circ C/Вт$ ;

$\alpha_e$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$\sum R_{Ti}$  – термическое сопротивление теплопроводности слоев ограждающей конструкции от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации,  $m^2 \cdot ^\circ C/Вт$ ;

$e_{н.от} = 0,01 \cdot \phi_{н.от} \cdot E_{н.от}$  – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре наружного воздуха за отопительный период,  $t_{н.от}$ ;

здесь  $\phi_{н.от}$  – средняя относительная влажность наружного воздуха за отопительный период, %;

$E_{н.от}$  – максимальное парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, принимаемое по табл. 3.1 при температуре  $t_{н.от}$ .

Таблица 3.1

**Максимальное парциальное давление водяного пара во влажном воздухе**

Температура воздуха t, °С	Парциальное давление водяного пара E <sub>п</sub> , Па	Температура воздуха t, °С	Парциальное давление водяного пара E <sub>п</sub> , Па	Температура воздуха t, °С	Парциальное давление водяного пара E <sub>п</sub> , Па
-25	63	-5	402	15	1705
-24	69	-4	437	16	1817
-23	77	-3	476	17	1937
-22	85	-2	517	18	2064
-21	93	-1	563	19	2197
-20	103	0	611	20	2338
-19	113	1	657	21	2488
-18	125	2	705	22	2644
-17	137	3	759	23	2809
-16	151	4	813	24	2984
-15	165	5	872	25	3168
-14	181	6	935	26	3363
-13	199	7	1001	27	3567
-12	217	8	1072	28	3782
-11	237	9	1148	29	4005
-10	260	10	1228	30	4243
-9	284	11	1312		
-8	310	12	1403		
-7	338	13	1497		
-6	369	14	1599		

Примечание.1. Максимальное парциальное давление водяного пара E<sub>п</sub>,Па, приведено при давлении воздуха 0,1МПа.

2. Для промежуточных значений температуры максимального парциального давления следует определять интерполяцией.

Для расчета требуемого сопротивления паропрооницанию ограждающей конструкции принимают, что плоскость возможной конденсации в однородной (однослойной) конструкции находится на расстоянии равном 0,66 толщины конструкции от ее внутренней поверхности, а в многослойной конструкции – совпадает с поверхностью теплоизоляционного слоя, ближайшей к наружной поверхности ограждающей конструкции.

Сопротивление паропрооницанию слоя ограждающей конструкции R<sub>п</sub>, м<sup>2</sup>·°С/Вт, следует определять по соотношению

$$R_n = \frac{\delta}{\mu}, \quad (3.17)$$

где  $\delta$  – толщина слоя, м;

$\mu$  – расчетный коэффициент паропроницаемости материала слоя ограждающей конструкции, мг/(м·ч·Па).

Сопrotивление паропроницанию многослойной ограждающей конструкции равно сумме значений сопротивления паропроницанию составляющих ее слоев. Сопrotивление паропроницанию воздушных прослоек принимается равным нулю независимо от толщины и расположения этих прослоек.

В случае, если наружное ограждение не отвечает требованию [2] по сопротивлению паропроницанию, т.е.  $R_n < R_{n,mp}$ , то необходимо предусмотреть в слое ограждения от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации пароизоляцию с сопротивлением паропроницанию  $R_{n,из} \geq R_{n,mp} - R_n$ .

Не требуется определять сопротивление паропроницанию следующих наружных ограждающих конструкций помещений с сухим или нормальным режимом:

– однородных (однослойных);

– двухслойных – при выполнении условия  $\frac{\mu_g}{\lambda_g} \leq \frac{\mu_n}{\lambda_n}$ ,

где  $\mu_v, \lambda_v$  – коэффициенты паропроницаемости и теплопроводности материала внутреннего слоя ограждающей конструкции;

$\mu_n, \lambda_n$  – то же, материала наружной конструкции.

### 3.6 Учет влажностного режима при расчете теплопередачи через ограждение

Влажностное состояние ограждения может быть условно разделено на эксплуатационное, соответствующее основному периоду продолжительной и регулярной эксплуатации зданий, и начальное, соответствующее первым годам после заселения здания (рис. 3.3).

Эксплуатационное влажностное состояние ограждения наступает, когда влагосодержание материалов приближается к некоторому стабильному состоянию, равновесному относительно воздействующих на ограж-

дение внутренней и наружной сред. Влажосодержание в этот период циклически изменяется в течение года, возрастая к концу зимы и снижаясь к концу лета. В середине зимы (декабрь – январь) значения влажности близки к средним за год. Теплотехнический расчет ограждений и подсчет теплотерь помещениями производится для этого периода, поэтому выбор теплофизических характеристик материалов конструкций должен проводиться, исходя изданных о среднегодовой влажности материалов в ограждении.

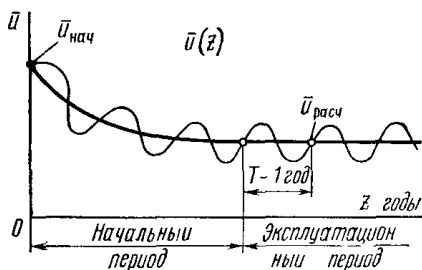


Рис. 3.3 – Схема изменения средней влажности материалов в ограждении с начала эксплуатации здания.

В соответствии с требованиями нормативного документа [2] влажностный режим помещений и условия эксплуатации ограждающих конструкций зданий и сооружений в зимний период следует принимать по таблице 3.2 в зависимости от температуры и относительной влажности внутреннего воздуха.

Таблица 3.2

**Влажностный режим помещений и условия эксплуатации зданий и сооружений в зимний период**

Относительная влажность внутреннего воздуха, %, при температуре $t_v$			Режим помещений	Условия эксплуатации ограждений
до 12 <sup>0</sup> С	св. 12 до 24 <sup>0</sup> С	св. 24 <sup>0</sup> С		
до 60 вкл.	до 50 вкл.	до 40 вкл.	Нормальный	Б
св.60 до 75включ.	св.50 до60включ.	св.40до50включ.	Влажный	Б
более 75	св.60до75включ.	св.50до60включ.	Мокрый	Б
–	св. 75	св. 60		Б
Примечание: Внутренние ограждающие конструкции, перекрытия чердачные, перекрытия над неотапливаемыми подвалами и техническими подпольями помещений с нормальным влажностным режимом следует рассчитывать для условий эксплуатации ограждений «А»				



### 3.7 Предотвращение конденсации влаги в ограждении

Основной мерой против конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения является снижение влажности воздуха в помещении, что может быть достигнуто усилением вентиляции его.

Во избежание конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения достаточно повысить температуру его поверхности выше точки росы. Это повышение температуры может быть достигнуто или увеличением сопротивления теплопередаче ограждения  $R_T$  или уменьшением сопротивления теплоотдачи  $R_B$ . Уменьшение величины  $R_B$  зависит от интенсивности движения воздуха около поверхности ограждения; чем более интенсивно это движение, тем меньше будет  $R_B$ . На этом основано применение вентиляторов около наружных стекол витрин в магазинах для устранения конденсации влаги на их поверхности. Наоборот, повышение  $R_B$  может стать причиной появления конденсата на внутренней поверхности ограждения.

Если влажность воздуха в помещении оказывается очень высокой, например бани, оранжереи и т. д., где эта влажность может достигать 90–95%, температура точки росы в этом случае оказывается близкой к температуре внутреннего воздуха, и избежать конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения увеличением его сопротивления теплопередаче  $R_T$  не удастся. В этом случае приходится мириться с тем, что влага будет конденсироваться на поверхности ограждения, однако необходимо принимать меры к тому, чтобы эта влага не могла проникнуть в толщу ограждения и повысить его влажность. Для этого внутреннюю поверхность ограждения делают водонепроницаемой.

Наилучшим способом защиты ограждения от проникания в него влаги с внутренней поверхности является облицовка этой поверхности стеклянными или глазурованными плитками на цементном растворе с добавками, делающими его водонепроницаемым. Хорошие результаты дают: нанесение на внутреннюю поверхность ограждения цементной штукатурки с водоизоляционными добавками, покрытие поверхности масляной краской с тщательной подготовкой, смоляными лаками и т.д. Влага, конденсирующаяся при этом на внутренней поверхности ограждения, не сможет повысить его влажность.

На характер конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения кроме температуры ее оказывает влияние также обработка этой поверхности. Например, на некрашеных деревянных поверхностях конден-

сация влаги начинается при температуре более низкой, чем точка росы. Структура внутренней штукатурки также оказывает большое влияние на появление видимой конденсации на поверхности ограждения. В то время как на поверхности, покрытой плотной цементной штукатуркой или масляной краской, капли росы появляются сразу же с понижением температуры ниже точки росы, на поверхности, покрытой пористой известковой штукатуркой, это явление начинается значительно позднее. Объясняется это тем, что при наступлении процесса конденсации влага впитывается штукатуркой и на поверхности ограждения нет видимого стекания конденсата. Только после того как штукатурка достаточно увлажнится, на поверхности ограждения появится сырость. Таким образом, пористая штукатурка является как бы автоматическим регулятором влажностного режима внутренней поверхности ограждения. В этом отношении пористый материал на внутренней поверхности ограждения имеет преимущество перед плотной штукатуркой. Однако, если конденсация влаги продолжается долго, пористая штукатурка становится сырой и для высыхания ее требуется много времени.

Основным конструктивным мероприятием для обеспечения ограждения от конденсации в нем влаги является рациональное расположение в ограждении слоев различных материалов. Материалы ограждения должны располагаться в следующем порядке: к внутренней поверхности – материалы плотные, теплопроводные и малопаропроницаемые, а к наружной поверхности, наоборот, пористые, малотеплопроводные и более паропроницаемые. При таком расположении слоев в ограждении падение упругости водяного пара будет наибольшим в начале ограждения, а падение температуры, наоборот, в конце ограждения. Это не только обеспечит ограждение от конденсации в нем влаги, но и создаст условия, предохраняющие от сорбционного увлажнения.

Если по техническим или конструктивным соображениям такое расположение материалов в ограждении невозможно, то для обеспечения его от внутренней конденсации применяют «пароизоляционные слои», т. е. слои, состоящие из паронепроницаемых материалов или обладающих очень малой проницаемостью. Из строительных материалов абсолютной паронепроницаемостью обладают только стекло и металлы, применение которых, однако, для этой цели нерационально – стекла вследствие его хрупкости, а металла вследствие подверженности коррозии. Очень небольшую паропроницаемость имеют битумные мастики, лаки, смолы, хорошо выполненная масляная покраска и разного рода изоляционные бума-

ги (рубероид, пергамин, толь и пр.). Слои из таких материалов, имея очень малую паропроницаемость, оказывают значительное сопротивление потоку водяного пара, проходящему через ограждение, уменьшают количество его и изменяют самый характер падения упругости водяного пара в ограждении.

Пароизоляционный слой должен располагаться первым в направлении потока водяного пара, т.е. в наружных ограждениях отапливаемых зданий на их внутренней поверхности. При таком расположении пароизоляционного слоя водяной пар будет поступать в ограждение с пониженной упругостью (вследствие падения упругости в пароизоляционном слое) и в значительно меньшем количестве, т.е. в этом случае влияние пароизоляционного слоя будет аналогичным понижению влажности внутреннего воздуха, что значительно улучшит влажностный режим ограждения.

Кроме того, положительное влияние пароизоляции состоит в том, что конденсация пара в стене при этом прекратится при более низких температурах наружного воздуха, т.е. сократится период, в течение которого в стене будет конденсироваться влага.

Если пароизоляционный слой расположить на наружной поверхности ограждения, то влажностный режим ограждения значительно ухудшится. При этом количество водяного пара, поступающего в ограждение, останется тем же, что и без пароизоляционного слоя, а количество пара, уходящего из ограждения, резко сократится вследствие большого сопротивления пароизоляционного слоя, расположенного на наружной поверхности ограждения.

Ухудшение влажностного режима будет главным образом состоять в том, что конденсация пара в таком ограждении прекратится при более высоких температурах наружного воздуха, т.е. резко удлинится период, в течение которого в ограждении будет конденсироваться влага. Кроме того, дальнейшее испарение влаги, накопившейся в ограждении за зимний период, будет затруднено, поскольку на его наружной поверхности есть пароизоляционный слой. Следовательно, пароизоляционный слой на наружной поверхности ограждений отапливаемых зданий недопустим.

Уплотненный внутренний переплет окна является пароизолятором по сравнению с неуплотненным наружным переплетом, что гарантирует наружное остекление от конденсации влаги. В наружных стальных переплетах витрин магазинов специально для этой цели делаются отверстия, обеспечивающие вентиляцию витрин наружным воздухом.

Таким образом, для того чтобы обеспечить нормальный влажностный режим ограждений, необходимо располагать пароизоляционный слой в нем у внутренней поверхности не глубже той плоскости, температура которой равна точке росы внутреннего воздуха. При расположении пароизоляционного слоя глубже этой плоскости пар из внутреннего воздуха может конденсироваться на внутренней поверхности этого слоя. Обычно пароизоляционный слой располагается под внутренней штукатуркой.

Применение в ограждении двух пароизоляционных слоев, одного на внутренней, а другого на наружной поверхности ограждения, гарантируя его от конденсации влаги, будет в то же время препятствовать испарению строительной влаги. Следовательно, это мероприятие допустимо только в том случае, если будет гарантирована тщательная просушка ограждения перед нанесением этих слоев, в противном случае в таком ограждении окажется неблагоприятный влажностный режим вследствие оставшейся в нем строительной влаги.

Большое влияние на влажностный режим бесчердачных покрытий оказывает гидроизоляционный ковер, назначение которого предохранять покрытие от увлажнения его дождевой или талой водой. Гидроизоляционный ковер является в то же время и хорошим пароизоляционным слоем, а расположение его на наружной поверхности покрытия является причиной конденсации влаги под ковром.

Устройство в таком случае второго пароизоляционного слоя у внутренней поверхности покрытия, например внутренней штукатурки по толю или пергамину, не вполне достигает цели, т.к. этот слой всегда будет более паропроницаем, чем рулонный ковер, и, уменьшив интенсивность конденсации, совсем ее не устранил.

Единственной целесообразной мерой для устранения конденсации влаги в таких покрытиях является устройство в них воздушной прослойки или продухов, расположенных над теплоизоляционным слоем и вентилируемых наружным воздухом. При такой конструкции покрытия наружный воздух, проникая в прослойку, имеющую более высокую температуру, будет нагреваться, отнимать влагу от материала покрытия и испарять ту влагу, которая может конденсироваться из внутреннего воздуха на верхней поверхности прослойки. Особенно большое значение имеет вентиляция воздушной прослойки в первое время эксплуатации покрытия, если материалы его имеют повышенную влажность.

## **Методические указания**

Влажностное состояние наружных ограждений оказывает существенное влияние на их теплозащитные свойства и долговечность. Необходимо знать причины увлажнения и изменения влажностного состояния ограждений, баланс влаги в помещении, формы связи влаги с материалом, диффузию водяного пара в сорбирующей среде и влагопроводность, как методы расчета перемещения влаги в строительных конструкциях, методику выбора теплофизических характеристик материалов в зависимости от температуры и относительной влажности внутреннего воздуха, усвоить методику расчета сопротивления паропрооницанию ограждающих конструкций, а также меры для предотвращения конденсации влаги в ограждениях.

## **Вопросы для самопроверки**

1. Чем опасно переувлажнение наружных ограждений?
2. Как определяется влажностное состояние воздуха в помещении?
3. Для чего составляется уравнение баланса влаги в воздухе помещения?
4. Какие формы связи влаги с материалом ограждения?
5. Что такое диффузия водяного пара в сорбирующей среде и влагопроводность?
6. Как рассчитывается сопротивление паропрооницаемости многослойного ограждения?
7. Как учитывается влажностный режим ограждения при расчете теплопередачи?
8. Какие меры принимаются для предотвращения конденсации влаги в ограждениях?