В. М. ИЛЬИНСКИЙ

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

(ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И МИКРОКЛИМАТ ЗДАНИЙ)

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов инженерно-строительных вузов и факультетов

МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1974

72
И46
УДК 72.(0.75)

Ильинский В. М.

И46 Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). Уч. пособие для инж.-строит. вузов. М., «Высш. школа», 1974

320 с. с ил.

В книге изложены теплофизические основы проектирования зданий и ограждающих конструкций, удовлетворяющих требованиям нормального теплового состояния помещений в различных климатических условиях СССР.

Рассмотрены инженерные методы теплофизических расчетов ограждающих конструкций в целях определения требуемого сопротивления теплопередаче и воздухопроницанию, а также необходимых свойств теплоустойчивости и влажностного состояния.

В книге содержатся примеры расчета и приложены таблицы, карты и другие справочные данные, необходимые в процессе проектирования или самостоятельной работы студентов.

И $\frac{\textbf{0323—491}}{\textbf{001(01)—74}}$ **БЗ-25-16—73** **72**

Рецензенты:
кафедра архитектуры Полтавского инженерно-строительного института
(зав. кафедрой проф. — докт. техн. наук **А. Н. Могилат**);
докт. техн. наук **Ф. В. Ушков**.

© Издательство «Высшая школа», 1974 г.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство, развивающееся на индустриальной основе, все большее распространение получает в восточных, северных и юго-восточных районах Советского Союза. Опыт эксплуатации вновь выстроенных в этих районах зданий свидетельствует о том, что многие виды внешних воздействий на них (в зависимости от различия климатических условий) существенно отличаются от природных влияний, характерных для умеренного климата центральных районов европейской части СССР. Методы проектирования и строительства, обогащенные этим опытом, весьма необходимы для разработки наиболее целесообразных объемно-планировочных решений зданий и выбора типов ограждающих конструкций.

Одна из актуальных задач строительства связана с разработкой и применением жилых и общественных зданий, наиболее отвечающих условиям нормальной эксплуатации и требованиям защиты человека от неблагоприятных влияний внешней среды, что является первой ступенью необходимых мероприятий по обеспечению нормальных условий пребывания в здании.

В промышленном строительстве разработка более совершенных типов зданий осложняется, кроме того, требованиями технологического процесса и необходимостью устранения или ограничения вредных влияний некоторых видов производства на человека.

Инженерные решения зданий и ограждающих конструкций непрерывно совершенствуются. В последние годы наметилось сближение между научно обоснованными гигиеническими требованиями к тепловому состоянию жилых и других зданий и степенью выполнения этих требований в практике строительства. Об этом, в частности, свидетельствует более широкое применение конструктивных решений, обеспечивающих повышение эксплуатационных качеств зданий.

Все реже находят применение совмещенные невентилируемые крыши в жилищном строительстве, приводящие к перегреву помещений верхних этажей летом и переохлаждению зимой. Расширено внедрение в строительство ограждающих конструкций с отсутствием теплопроводных включений, что наиболее необходимо в суровых климатических условиях. Применение сдвоенных оконных переплетов используется в относительно мягких климатических условиях, в холодных районах (с продолжительностью отопительного периода более 8—9 месяцев) практическое применение начинает получать тройное остекление, позволяющее уменьшить теплопотери через окна на 30—35% по сравнению с теплопотерями при сдвоенных оконных переплетах.

Реализуются дифференцированные нормы теплового состояния жилых помещений в зависимости от суровости зимних условий. Расчетная температура воздуха помещений принимается более высокой в условиях суровых зим, вызывающих длительное охлаждение наружных ограждений зданий, близкое к предельному.

Научно-технический прогресс в области строительства и повышение гигиенических требований к новым зданиям, обусловили большой интерес к изучению проблем строительной теплофизики, развивающейся на основе всестороннего изучения климатических данных отдельных районов СССР и совершенствования имеющихся расчетных методов.

Эта прикладная область знания является особенно важной для совершенствования проектирования и выполнения ограждающих конструкций зданий, назначенных для эксплуатации в специфических климатических условиях.

В данной книге излагаются сведения, относящиеся к теплофизике зданий и их отдельным конструктивным элементам.

В первой главе рассматриваются основные закономерности и необходимые константы процессов теплообмена и массообмена в зданиях и их конструкциях. Изложение особенностей формирования и изменений температурного поля в элементах зданий, а также основных измерителей теплозащитных свойств материалов и конструкций составляет преимущественное содержание этой главы. Этому изложению предпосланы понятия об основных физических различиях процессов переноса тепла и вещества в материальных средах. В конце главы даны элементарные сведения о закономерностях процессов влагообмена.

Вторая глава рассматривает влияние внешних физико-климатических воздействий на особенности проектирования зданий. В специфических климатических условиях большое значение имеют метелевые, штормовые и другие виды погоды с интенсивным переносом воздуха и содержащихся в нем взвешенных частиц.

В любых условиях климатическими характеристиками, необходимыми для выяснения особенностей эксплуатации зданий и целесообразных направлений их типизации, являются характерные и достаточно длительные (в течение года) погодные условия, устанавливаемые по среднемесячным температурам с учетом их повышения в дневное время суток. Деление видов погоды на «очень холодную», «холодную», «прохладную», «теплую», «жаркую» и «очень жаркую» производится по температурным градациям, характерным для соответствующих тепловых ощущений человека, пребывающего в здании.

Для оценки совместного охлаждающего действия на ограждающие конструкции зданий мороза и ветра вводится понятие о зимней суммарной расчетной температуре.

Дифференциация видов погоды по влажностному состоянию воздушной среды становится менее актуальной при использовании описываемого в главе деления территории СССР на влажные, умеренные и сухие зоны. Продолжительность характерных видов пого-

ды предопределяет естественные направления типизации зданий; в районах, где отопительный период (суммарная длительность очень холодной и холодной погоды) продолжается более девяти месяцев, целесообразно увеличивать ширину зданий, что особенно важно при необходимости развития площади и расширения номенклатуры подсобных помещений. Кроме того, необходим комплекс мероприятий по повышению теплозащитных свойств и герметичности наружных ограждений. При многолетнемерзлых грунтах нежелательно использование цокольного этажа под жилье.

В районах, где длительность периодов теплой и жаркой погоды превышает пять месяцев, целесообразно возводить здания таких типов, которые наиболее надежно защищают человека от перегрева. Из многоэтажных наиболее приемлемыми являются здания с экранированными и интенсивно вентилируемыми стенами и покрытием, с нормальной высотой этажей ($h \geqslant 3$ *м*), с лоджиями, верандами и другими летними помещениями и обязательной солнцезащитой проемов.

В небольших южных населенных пунктах, а также в отдельных районах крупных городов уместно шире использовать строительство малоэтажных зданий, для которых характерны теплоотдача в грунт из помещений первого этажа и возможность защиты от перегрева озеленением и обводнением прилегающей территории, что при активном сквозном проветривании квартир и хороших теплотехнических свойствах вентилируемой крыши создает достаточные предпосылки для обеспечения теплового состояния жилых помещений, близкого к комфортному.

В третьей главе излагаются особенности микроклимата помещений. Распределение тепла и влаги в объеме помещений связано с разностью внешних давлений на оболочку здания и особенностями естественного воздухообмена в нем, что и нашло отражение в последовательности рассмотрения этих физических процессов. Наиболее существенно влияет эта взаимосвязь на микроклимат многоэтажных зданий, а также производственных комплексов с выделениями тепла и влаги.

Целесообразное использование естественного воздухообмена и органическое сочетание его особенностей с механической вентиляцией является одним из эффективных средств обеспечения необходимых микроклиматических условий в помещениях.

Четвертая глава рассматривает основные теплофизические свойства ограждающих конструкций, определяемые расчетом по установившемуся потоку тепла для условий холодного периода года.

Объем излагаемых сведений в отношении процессов теплопередачи через однородные и неоднородные конструкции, расчета двумерных температурных полей, теплопроводных включений и воздухопроницаемости ограждений соответствует учебным программам факультета промышленного и гражданского строительства в технических вузах.

В пятой главе излагаются теплофизические данные, необходимые для расчета ограждающих конструкций по неустановившимся

условиям теплообмена, главным образом при периодических тепловых воздействиях (солнечном нагреве ограждений, колебаниях температуры наружного воздуха в течение суток и т. д.). Основой таких расчетов остается теория теплоустойчивости, разработанная в СССР еще в двадцатых годах, основательно развитая в конце сороковых и обеспечившая достаточно достоверные и удобные для строительной практики методы расчета, несмотря на некоторую их приближенность.

Практические методы расчета, основанные на этой теории, применимы, в частности, к летнему прогреву ограждающих конструкций и изменениям теплового состояния помещений в холодный и жаркий периоды года.

Шестая глава рассматривает влажностное состояние ограждающих конструкций и его изменения.

Влажностное состояние ограждающих конструкций измеряется влагосодержанием капиллярно-пористых материалов, входящих в состав этих конструкций. Чем меньше влагосодержание материала, тем выше теплозащитные свойства конструкции.

Для многих ограждающих конструкций, выполненных из легких бетонов и других материалов с избыточным содержанием влаги, характерно повышенное влагосодержание в первый период времени после выполнения конструкции.

Наибольшая возможность сокращения этого периода возникает в том случае, если в первые месяцы после монтажа конструкций они подвергаются летней естественной сушке, которая в большинстве районов строительства связана с частым солнечным облучением, имеющим высокую иссушающую эффективность, объясняемую особенностями периодических воздействий лучистого тепла на продолжительно высыхающие конструкции.

Если во время дальнейшей службы здания не происходит увлажнения наружных ограждений конденсирующейся влагой, а также не отмечается смачивания наружной поверхности стен косыми дождями, единственной причиной эксплуатационного увлажнения наружных ограждающих конструкций здания может явиться влага внутреннего воздуха, стремящаяся диффундировать из отапливаемых помещений наружу сквозь толщу ограждений. Через ограждающие конструкции, отличающиеся сухим состоянием капиллярно-пористых материалов (бетонов, кирпича, фактурных слоев и т. д.) внутренней части ограждения, интенсивность диффузии водяного пара замедляется, так как сухой материал гигроскопически поглощает диффундирующую влагу, не давая ей достигнуть охлажденной наружной части конструкции.

Помимо соответствующего уменьшения коэффициентов переноса влаги внутри таких материалов, на поверхности конструкции, ограждающей сухое помещение, возникает сопротивление влагообмену, ограничивающее в некоторых случаях процесс диффузии. Сухой конструкции, находящейся в воздушной среде, свойственно оставаться в сухом состоянии; влажной (при возникновении увлаж-

няющих процессов) — свойственно увлажняться еще более и хронически засыревать.

С влажностным состоянием и его изменениями непосредственно связаны сохранность эксплуатационных качеств ограждающих конструкций и предельные сроки их полноценной службы, т. е. их долговечность.

Об этом свойстве ограждающих конструкций в книге даны лишь самые краткие сведения.

Если исключить влияние стихийных бедствий и других аварийных ситуаций, вызывающих немедленное разрушение, предельный срок полноценной службы конструкции определится длительностью ее сопротивления постепенному износу от периодических воздействий внешней и внутренней среды.

Такая длительность сокращается при повышении интенсивности этих воздействий, вызывающих резкие колебания температуры и влагосодержания отдельных слоев ограждающей конструкции.

Почти все наиболее хорошо изученные в настоящее время виды стойкости материалов против внешних разрушающих воздействий (т. е. морозостойкость, влагостойкость, биостойкость, стойкость против коррозии) прямо или косвенно связаны с величиной и изменениями влагосодержания капиллярно-пористых строительных материалов, входящих в состав ограждающих конструкций.

Постепенное изменение структуры материалов под воздействием внешних природных факторов является следствием длительных физико-химических и механических процессов. Скорость этого изменения, а также вероятность возникновения разрывов и трещин в материале могут быть выражены математическими соотношениями, аналогичными устанавливающим скорость химических реакций или закономерность возникновения зародышей новой фазы в материальной среде.

Длительность эксплуатации конструкции, характерные изменения температуры и уровень напряжений, вызывающих постепенное разрушение наиболее слабых участков структуры материала, функционально связаны между собой.

В области изучения предельных сроков службы конструкций, т. е., иначе говоря, ее долговечности, строительная теплофизика наиболее тесно соприкасается с разделами строительной механики, изучающими проблемы прочности сооружений.

ГЛАВА I

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА И МАССООБМЕНА В ЗДАНИЯХ И ИХ КОНСТРУКЦИЯХ

§ 1. РАЗЛИЧИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ВЕЩЕСТВА

Основными физическими процессами, рассматриваемыми в строительной теплофизике, являются процессы переноса тепла, влаги и воздуха, происходящие в конструкциях и помещениях зданий.

Тепло является одним из видов энергии, а влага и воздух — конкретными видами вещества. Физический механизм переноса энергии и вещества различен. Для количественного изучения особенностей, вытекающих из этих различий, необходимо знать константы переноса, а также внешние движущие силы или термодинамические параметры, вызывающие перенос.

Эти параметры, определяющие направление и интенсивность процессов теплообмена и массообмена, называют потенциалами переноса.

Потенциалом переноса тепла является температура, а потенциалом переноса вещества, в частности влаги и воздуха, уместно считать энергию, отнесенную к единице массы; эту энергию часто выражают в размерности соответствующего вида давления. Так, например, при изучении молекулярных процессов переноса влаги, диффундирующей преимущественно в парообразной фазе, рассматривается парциальное давление водяного пара, а при молярном переносе жидкой влаги или влажного воздуха — общее давление, вызываемое соответствующими причинами (например, силой ветра, тяжести и т. д.). Возникновение процессов переноса тепла и вещества (например, влаги) в конструкциях или воздушной среде помещений возможно только при разности температур или давлений в отдельных зонах или участках рассматриваемой материальной системы. Однако поскольку физический механизм переноса тепла в материальных средах и, в частности, в капиллярно-пористых строительных материалах, существенно отличен от процесса переноса вещества, конкретные условия возникновения, а также кинетика этих видов переноса также различны.

В металлах тепло переносится потоком электронов, и теплопроводность является функцией электропроводности. Наиболее электропроводные металлы в то же время и наиболее теплопроводны (медь, алюминий). В диэлектриках, где электропроводность отсутствует, перенос тепла осуществляется колебаниями атомов (или их групп) в структурной решетке материала.

Поскольку преобладающее большинство наиболее распространенных капиллярно-пористых строительных материалов (бетон, кирпич и т. д.) обладает ограниченной электропроводностью, основное значение для их теплопроводности имеют колебания атомных групп, происходящие в структурной решетке. В связи с этим, перенос энергии происходит и в идеально плотных материалах, и в капиллярно-пористых. Этот процесс не связан с проницаемостью материалов для потоков вещества. Перенос тепла в твердых материалах возникает при любой разности температур Δt, и количество переносимого тепла Q всегда пропорционально разности потенциалов независимо от того, велика или мала эта разность (т. е. $Q \sim \Delta t$).

Механизм переноса массы вещества и, в частности, влаги или воздуха связан с проницаемостью и особенностями пористой структуры материала, внутри которого происходит процесс переноса; в материалах абсолютно плотных или отличающихся ультра-мелкой пористостью в поверхностном слое, непосредственно подвергающемся внешним воздействиям, возникают сопротивления, ограничивающие перенос вещества. Эти сопротивления при малой разности потенциалов переноса могут превышать энергетический уровень последней и тогда оказываются непреодолимыми. При этих условиях перенос массы сквозь достаточно плотный материал не возникает, однако такой перенос может происходить в некотором другом направлении, где сопротивления окажутся меньшими, чем энергия разности давлений. Так, например, поток холодного воздуха при ветре может обтекать здание, не проникая внутрь, поскольку сопротивление прониканию плотного отделочного слоя наружных стен весьма значительно. Лишь при наличии щелей и неплотностей этот поток проникает в помещение.

Аналогичные сопротивления потоку воздуха возникают во влажных капиллярно-пористых материалах, в порах которых вода удерживается силами связи влаги с материалом, например, силами адгезии или капиллярного давления. Энергетический уровень, необходимый для преодоления этих сопротивлений, может быть значительным, и при малой разности внешних потенциалов переноса будет превосходить энергию этой разности. В этом случае переноса массы вещества (например, воздуха, газа или водяного пара) через пористый материал происходить не будет; несмотря на наличие разности внешних потенциалов, масса вещества, содержащегося в капиллярно-пористой системе, будет находиться в равновесии.

Перенос массы, в частности, влаги возникнет только при разности давлений ΔP, превышающей давление $P_{кр}$, равное энергетическому уровню сопротивления переносу вещества (на поверхности или внутри материала). Иначе говоря, количество переносимого вещества $Q_м$ будет пропорционально разности между энергетическими уровнями внешнего потенциала и сопротивления переносу внутри системы, т. е. $Q_м \sim (\Delta P - P_{кр})$. При разности потенциалов меньшей, чем $P_{кр}$, количество вещества, которое могло бы быть перенесено в направлении, требующем преодоления соответствующего сопротивления, будет равно нулю. В этом случае конструкции

здания из систем, обменивающихся с внешней средой энергией и массой, например, теплом и влагой (в термодинамике такие системы называются открытыми), превращаются в системы ограниченно закрытые, в которых процессы теплообмена происходят при любой разности температур, а процессы массообмена при ограниченной разности давлений могут быть погашены сопротивлениями переносу вещества.

С учетом этих энергетических ограничений, естественное течение физических процессов связано с переносом тепла или вещества от участков с более высокими потенциалами переноса к участкам с более низкими значениями этих термодинамических параметров. В результате такой направленности процессов происходит возможная (при имеющихся внутри конструкции или материальной среды сопротивлениях переносу) стабилизация значений температуры или давления на отдельных участках рассматриваемой системы. Система, в которой устанавливается постоянное распределение значений температур или давлений, приходит в состояние постоянного равновесного обмена теплом или веществом с окружающей средой. Установившийся процесс такого постоянного обмена называют стационарным. Если количественное выражение обмена равно нулю, говорят, что система находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой.

Поскольку процессы переноса тепла и вещества взаимно связаны между собой (например, при разности температур перемещения влаги и потоков воздуха происходят в направлении изменения температуры), возникает необходимость сопоставления величин потенциалов переноса энергии и массы в единой шкале. Любые процессы переноса требуют затраты энергии, а потому такой единой шкалой может быть только шкала энергетическая. Такой шкалой температуры является шкала Кельвина, нулевое значение которой совпадает с абсолютным нулем (—273,16° С), т. е. такой температурой, при которой происходит полное затухание энергии молекулярного движения в идеальной материальной среде (идеальном газе), а давление последнего становится равным нулю.

Используемое для косвенных измерений температуры физическое свойство термометрической среды (например, изменения объема ртути или давления газа) находится в определенной (чаще всего линейной) зависимости от энергетического уровня этой среды, а потому изменяется по простейшему закону вместе с изменениями теплового состояния. В этом случае температура является однозначной линейной функцией от энергетического уровня P термометрической среды (рис. I.1, *а*).

Каждый условный градус температурной шкалы Кельвина соответствует определенному изменению молекулярной энергии или давления.

Многие задачи из области теплообмена связаны с рассмотрением установившегося теплового состояния материальных систем или конструкций; при этом, количество тепла, переносимого в неизотермических условиях из более нагретой зоны конструкции в более

охлажденную, пропорционально разности температур в рассматриваемых зонах.

Во всех случаях, когда при изучении процессов переноса тепла можно ограничиться рассмотрением разности температур, шкала Цельсия (°С) является столь же приемлемой, как и шкала Кельвина; так как градусы этих шкал равны одной и той же величине, значения разности температур не отличаются друг от друга. Следовательно, практической энергетической шкалой для процессов переноса тепла является температурная шкала, отражающая энергетический уровень или разность этих уровней в рассматриваемых материальных средах.

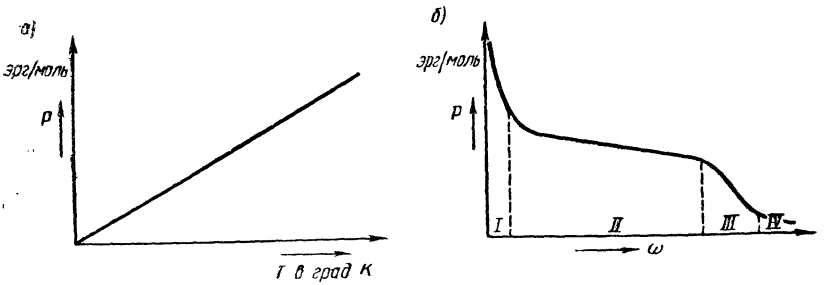


Рис. I.1. Изменения энергетических уровней материальных сред и термодинамических параметров, характеризующих эти уровни:

а — линейное изменение энергетического уровня термометрической среды в зависимости от температуры; *б* — нелинейное изменение энергетического уровня связи влаги с поверхностью пор и капилляров гидрофильного материала в зависимости от влагосодержания последнего и линейной шкалы потенциала переноса, влаги; ω — влагосодержание материала;

I — первичные слои молекул влаги, прочно удерживающиеся на твердой поверхности; *II* — монотонное увеличение числа слоев, сопровождающееся постепенным понижением их сцепления; *III* — возникновение в порах и капиллярах материала свободной воды с обычной плотностью; *IV* — дальнейшее водонасыщение материала

Для процессов переноса вещества (массы) наукой не установлено такой универсальной и точной шкалы потенциалов переноса, которая могла бы быть выражена градусами одинаковой величины, подобно тому, как это осуществлено в шкале температур. Например, любая практическая шкала потенциала переноса влаги должна зависеть от энергетического уровня связи влаги с поверхностью пор и капилляров материала, а следовательно, и от влагосодержания последнего. Между тем изменения этого энергетического уровня неравномерны на различных стадиях увлажнения и не могут быть выражены линейным путем, подобно тому, как выражается энергетический уровень термометрической среды в зависимости от температуры. Энергетический уровень связи влаги с материалом падает с увеличением влагосодержания (рис. I.1, *б*) по нелинейной зависимости, различной для каждого вида материала; изменения этого уровня для воздушно-сухого материала связаны с его свойствами гигроскопичности (сорбции) и могут быть выражены лишь довольно сложной математической зависимостью,

В связи с этим осложняется задача разработки практических шкал потенциала переноса влаги, поскольку эти шкалы оказываются очень приближенными. Изучение энергетического уровня потенциалов переноса вещества в капиллярно-пористых материалах может быть проведено только на основе глубокого обобщения особенностей поглощения ими влаги как в воздушно-сухом состоянии, так и на более высоких стадиях увлажнения.

§ 2. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

Распространение тепла в материальных средах, в частности, в конструкциях зданий, всегда связано с различным тепловым состоянием отдельных зон или участков пространства, вызванным природными условиями или деятельностью человека (например, теплый воздух в отапливаемом помещении и холодный снаружи, нагретые участки помещения у приборов отопления и охлажденные у окон и т. д.). Происходящие процессы теплопередачи приводят к постоянному или изменяющемуся во времени распределению температур в рассматриваемой материальной среде или конструкции. **Одновременное распределение температур** в рассматриваемой материальной системе называется **температурным полем.** Закономерности теплопередачи непосредственным образом связаны с распределением температур и особенностями температурного поля.

При определенных теплофизических свойствах рассматриваемой конструкции или материальной среды и установившейся (т. е. не изменяющейся во времени) разности температур, вызывающей процесс теплопередачи, значение температуры в любой произвольной точке конструкции является функцией только координат пространства, т. е. $t=f(x, y, z)$ *. При изменяющихся во времени внешних условиях, вызывающих процесс теплопередачи, температура в произвольной точке зависит не только от координат пространства, но и от времени $t=f(x, y, z, \tau)$ **.

В строительной теплофизике пространственные температурные поля рассматриваются сравнительно редко, поскольку для практических целей в большинстве случаев достаточно изучить двумерное температурное поле, возникающее в одной из проекций, т. е. в плане или разрезе конструкций. В этом случае, при установившихся условиях теплопередачи, температура в каждой точке проекции конструкции является функцией двух координат: $t=f(x, y)$.

Третья координата (т. е. высота или длина конструкции) предполагается достаточно протяженной, а потому не влияющей на распределение температур в плоском сечении.

Закономерность изменений температурного поля наиболее наглядно можно представить, нанеся линии равных температур (изотермы) в изучаемой проекции конструкции. Наиболее резкое изме-

---

* Эта функциональная зависимость раскрывается в дифференциальном уравнении Лапласа, см. стр. 18.

** См. дифференциальное уравнение Фурье на стр. 17.

нение температуры отмечается по нормали к изолиниям (рис. I.2). Эта нормаль совпадает с направлением температурного градиента (повышения температур) между изолиниями и противоположна (обратна на 180°) наиболее вероятному направлению теплового потока Q, переносящего тепло от более высокой температуры к более низкой. В однородной плоской бесконечно протяженной стене с постоянной разностью температур на противоположных поверхностях эти изолинии параллельны друг другу и поверхностям ограждения; направление потока тепла возможно для этой конструкции только в одном направлении (рис. I.3), а функциональная зависимость изменений температуры наиболее проста: $t=f(x)$. Это случай наиболее элементарного одномерного температурного поля в установившихся (стационарных) условиях теплопередачи.

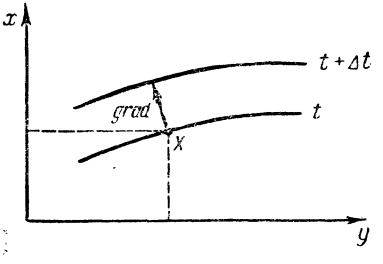


Рис. I.2. Изолинии температур двумерного поля:
x, y — направления координат; $t=f(x, y)$

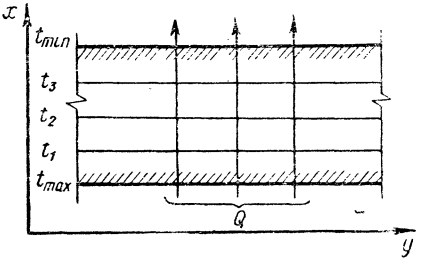


Рис. I.3. Однородное температурное поле в плоской протяженной стене:
$t=f(x)$; t — изолинии температур; Q — направление потока тепла

Изолинии температур в конструкциях с более сложной геометрической формой выражаются двумерным температурным полем и обычно не параллельны поверхностям ограждения, а криволинейны. При криволинейном очертании изотерм пути распространения тепла Q (нормальные к изотермам) также не могут быть параллельными друг другу, как это видно из рис. I.4, на котором показано двумерное температурное поле простенка наружной стены, выполненного из трехслойных панелей.

При установившихся условиях теплопередачи внешние тепловые воздействия (значения и разность температур) постоянны (или принимаются таковыми в целях упрощения расчетов процессов передачи тепла, которые без особых погрешностей можно свести к установившимся условиям).

В действительных условиях внешние тепловые воздействия (например, наружные температуры) изменяются во времени, что приводит к нестационарной теплопередаче и изменчивости температурного поля.

В теплофизических расчетах ограждающих конструкций зданий важное значение имеет рассмотрение температурного поля этих конструкций при периодических изменениях внешних воздействий (например, периодическое охлаждение или прогрев, вызванные ци-

клическим режимом производства, периодической теплоотдачей отопительных систем, ежедневным облучением солнцем и т. д.). Такое нестационарное температурное поле, для которого характерны закономерные периодические изменения, называют квазистационарным.

Рассмотрение квазистационарного температурного поля позволяет найти расчетные методы, более конкретные и удобные для практики, чем общие методы расчета нестационарного поля. Объясняется это тем, что при квазистационарном теплообмене, кроме значения средней температуры, достаточно знать лишь величину амплитуды и запаздывания во времени температурных колебаний в рассматриваемой точке конструкции для того, чтобы иметь пол-

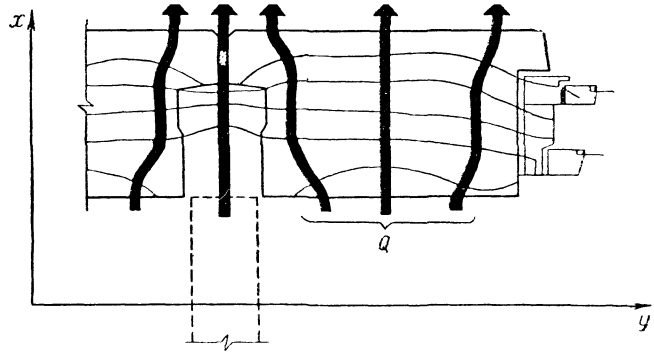


Рис. I.4. Изолинии двумерного температурного поля и направления потоков тепла в простенке из трехслойных панелей

ное представление об изменениях температурного поля за период колебаний внешних тепловых воздействий. В частности, теплофизический расчет ограждающих конструкций для летних условий, характеризующихся периодичностью прогрева при солнечном облучении и циклических повышениях температуры наружного воздуха, выполняется с учетом квазистационарных изменений температурного поля.

Во всех возможных случаях разработки приближенных инженерных методов расчета предпочтение отдается более простым и, в частности, основанным на рассмотрении закономерностей стационарного температурного поля. Иногда это приводит к некоторому повышению запасов теплофизической надежности рассчитываемых ограждающих конструкций, поскольку внешние воздействия, влияющие на распределение температур, приходится принимать наиболее неблагоприятными из числа закономерно возможных.

Так, например, теплофизический расчет ограждающих конструкций для холодного периода года проводится по условиям предельно возможного охлаждения конструкции, наступающего при

таком наиболее низком значении температуры наружного воздуха, которое в соответствии с климатическими условиями может не изменяться в течение времени, необходимого для постепенной стабилизации наиболее неблагоприятного температурного поля в рассматриваемой конструкции.

§ 3. ВИДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА

Как было установлено ранее, разностью потенциалов переноса тепла в материальной среде является разность температур в отдельных зонах, сечениях или точках этой среды.

Тепло распространяется от более высокой температуры к более низкой; распространение может происходить **топлопроводностью, конвекцией и излучением.** Как известно, теплопроводностью называется теплообмен между частицами или элементами структуры материальной среды, находящимися в непосредственном соприкосновении друг с другом. Передача тепла в ограждающих конструкциях, выполненных из твердых материалов, от более теплой поверхности конструкции к более холодной, происходит главным образом путем теплопроводности.

В общем виде количество тепла Q_1, передаваемого теплопроводностью, выражается как

$$Q_1 = -\lambda \operatorname{grad} t F \tau, \qquad (I.1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала конструкции, *ккал/м·ч·град*; grad t — градиент температуры в направлении x, обратном потоку тепла, °С; F — площадь, $м^2$; τ — время, *ч*. Знак минус соответствует тому положению, что поток тепла всегда направлен в сторону понижения температур.

Конвекция — это распространение тепла, происходящее в результате перемещения в пространстве воздуха (в общем виде жидкости или газа), обладающего определенным теплосодержанием. Распространение тепла конвекцией происходит, например, в отапливаемых или имеющих тепловыделения помещениях, а также в конструкциях с воздушными прослойками, в которых возникают потоки воздуха под влиянием неравномерного нагрева отдельных участков и поверхностей.

Количество тепла, передаваемого конвекцией, является функцией от разности температур Δt, скорости потока воздуха v, площади F и времени передачи τ, т. е.

$$Q_2 = f(\Delta t,\ v,\ F,\ \tau). \qquad (I.2)$$

Излучение — это теплообмен, происходящий между различно нагретыми поверхностями твердых тел, разделенными лучепрозрачной средой, например, воздухом. Излучение является преобладающим видом общего переноса тепла при действии солнечной радиации, а также при процессах теплообмена в металлургических и других цехах, где происходит плавка металла и остывание раскаленных изделий.

Количество тепла Q_3, передаваемого излучением, при разности абсолютных температур T_1—T_2 между излучающей и облучаемой поверхностями, устанавливается в соответствии с законом Стефана — Больцмана, как

$$Q_3 = C\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]F\tau, \qquad (I.3)$$

где $C = \alpha_н \cdot 4{,}96$ *ккал/м²·ч·град* — относительная излучательная *способность поверхности* ($\alpha_н$ — *коэффициент теплопоглощения*, выраженный в долях единицы от излучательной способности абсолютно черного тела, т. е. степень черноты поверхности).

Процессы передачи тепла в зданиях и их ограждающих конструкциях связаны со всеми тремя видами теплообмена. Однако в воздушной среде у поверхностей конструкции, а также в воздушных прослойках и пустотах преобладает теплообмен конвекцией и излучением, тогда как в твердых материалах конструкций основным видом передачи тепла является теплопроводность. Включающий все виды теплообмена перенос тепла из одной более нагретой воздушной среды в другую более охлажденную, через разделяющую эти среды ограждающую конструкцию, называется теплопередачей. Процесс теплообмена между поверхностью ограждающей конструкции и прилегающей к ней нагретой или охлажденной воздушной средой, называют соответственно тепловосприятием или теплоотдачей.

§ 4. УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Количество тепла Q_1 (в *ккал*), распространяющееся путем теплопроводности в направлении x, в течение единицы времени составит:

$$Q_1 = -\lambda \frac{dt}{dx}. \qquad (I.4)$$

Минус в выражении (I.4) означает, что для получения положительной величины Q_1 температура в направлении x должна уменьшаться, а не возрастать. Величина $\frac{dt}{dx}$, называемая градиентом температуры, выражается в *град/м*; λ — представляет коэффициент теплопроводности материала в *ккал/м·ч·град*.

При неустановившихся условиях количество тепла Q_1, распространяющееся в направлении x, изменяется, что связано с поглощением или отдачей тепла частицами материальной среды при изменении их температуры с течением времени τ (т. е. наличии величины $\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0$).

Изменение потока тепла $\frac{\partial Q_1}{\partial x}$ пропорционально теплоемкости материала $c\gamma$ (c — удельная теплоемкость в *ккал/кг·град*; γ — объемный вес материала в *кг/м³*); тогда

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x} = -c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau}. \qquad (I.5)$$

Знак минус в правой части уравнения означает, что повышение температуры материала связано с поглощением им тепла и соответствующим уменьшением теплового потока Q_1.

Величина изменения потока тепла Q_1 в направлении x может быть получена также дифференцированием уравнения (I.4), т. е.

$$\frac{dQ_1}{dx} = -\lambda \frac{d^2t}{dx^2}. \qquad (I.6)$$

При отсутствии внутренних источников или стоков тепла, изменение величины теплового потока связано только с поглощением тепла материалом, и выражения (I.5) и (I.6) должны быть равны. Из этого равенства выводится дифференциальное уравнение теплопроводности при одномерном распространении тепла в направлении x, а именно:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \qquad (I.7)$$

Это выражение известно как дифференциальное уравнение Фурье. Величина $\frac{\lambda}{c\gamma} = a$ называется коэффициентом температуропроводности материала, имеет кинематическую размерность, в которую не входят измерители массы и энергии, и характеризует скорость перераспределения температуры, выражаемую обычно в $м^2/ч$ или $см^2/сут$ при нагреве или охлаждении материальной среды.

Материалы и конструкции с высоким коэффициентом температуропроводности быстро нагреваются или охлаждаются до температуры, соответствующей равновесному состоянию с окружающей средой.

В самом общем виде, при неустановившемся распространении тепла по всем трем осям координат, дифференциальное уравнение теплопроводности приобретает трехмерный вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right] = a\nabla^2 t, \qquad (I.7а)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа.

Путем интегрирования одномерного (I.7), двухмерного или трехмерного уравнения теплопроводности могут быть получены любые конкретные решения, раскрывающие закономерности распространения тепла в материальных средах, в частности, ограждающих конструкциях зданий.

Чтобы получить из множества возможных конкретное решение, соответствующее определенному рассматриваемому процессу распространения тепла, необходимо располагать дополнительными условиями, не содержащимися в исходном дифференциальном уравнении. Эти дополнительные условия, которые вместе с исходным

уравнением однозначно определяют все особенности рассматриваемого процесса, называются условиями однозначности *.

Условия однозначности разделяются на временные (характеризующие рассматриваемый физический процесс во времени) и пространственные, относящиеся к поверхностям, ограничивающим изучаемый объект или конструкцию, и особенностям физического процесса, происходящего на этих граничных поверхностях

Различают три вида граничных условий:

1) граничное условие I рода, устанавливающее распределение температуры на поверхности и ее изменения во времени;

2) граничное условие II рода, устанавливающее величину потока тепла, проходящего через поверхность, и его изменения во времени;

3) граничное условие III рода, определяющее температуру окружающей среды и закон теплообмена между поверхностью и этой средой.

В строительной теплофизике обычно задаются граничные условия III рода, устанавливаемые значениями температуры среды t и коэффициентов теплообмена α **.

При рассмотрении теплопередачи в однородной среде и в установившихся условиях $\left(\text{когда } \frac{\partial t}{\partial \tau}=0\right)$, временные условия исключаются и значение имеют только пространственные.

В этих случаях, поскольку $a \neq 0$, уравнение (I.7а) приобретает вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}=0, \qquad \text{(I.8)}$$

Уравнение относится к температурному полю в установившихся условиях. Выражение (I.8) известно как уравнение Лапласа. Физический смысл этого уравнения состоит в том, что сумма изменений количеств тепла, поступающего к любой рассматриваемой точке конструкции, равна нулю. Следовательно, температуры ее неизменны и имеют установившиеся значения, отвечающие постоянным условиям воздействий внешней среды, окружающей конструкцию. При практических расчетах температурного поля проектируемых конструкций на основе уравнения (I.8) расчетные температуры внешней среды принимаются соответствующими возможности завершения процесса предельного охлаждения рассматриваемой конструкции. Этот процесс происходит постепенно и требует определенного времени: незначительного для легких конструкций и длительного — для массивных, поэтому расчетные значения температуры наружного воздуха в наиболее холодные зимние периоды зависят от степени массивности конструкции и связаны с возможностью более или менее длительной стабилизации теплового состояния во времени.

---

* Иногда условия однозначности называют краевыми условиями.

* В теплотехнической литературе эти коэффициенты часто называют коэффициентами теплоотдачи, имея в виду особенности теплообмена материальных систем нагретых выше температуры окружающей среды.

Для многих практических случаев достаточно исследования плоского температурного поля (в плане или разрезе конструкции). Для двумерных условий уравнение (I.8) имеет вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}=0. \qquad \text{(I.8a)}$$

Исследование на основе уравнения (I.8а) температурных полей неоднородных в теплофизическом отношении облегченных конструкций (панелей с контурными ребрами, сопряжений крупных элементов ограждающих конструкций и т. д.) имеет весьма важное значение при проектировании индустриальных конструкций зданий, особенно в достаточно суровых климатических условиях, когда низкие температуры наружного воздуха длительны во времени и вызывают полное охлаждение, для которого характерно неизменное установившееся распределение предельно низких температур.

Порядок проведения подобных практических расчетов и применение для этих целей счетно-решающих устройств типа электроинтегратора, изложены далее в гл. IV.

Дифференциальное уравнение Фурье (I.7) в обобщающем смысле является уравнением нестационарного поля любого потенциала переноса (в данном случае — поля потенциала переноса тепла, т. е. температуры). С определенными ограничениями это уравнение может быть использовано и для изучения процессов влагообмена, происходящих в материальных системах при неизменной температуре.

Если рассматривать какую-либо материальную систему, например, ограждающую конструкцию, выполненную из влажного капиллярно-пористого материала и находящуюся в изотермической * воздушной среде *, то за потенциал переноса влаги может быть принято влагосодержание материала (ω, *г/кг*). Уравнение (I.7), записанное применительно к исследованию одномерного поля потенциала переноса влаги называют уравнением влагопроводности. Оно имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau}=a_m\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, \qquad \text{(I.9)}$$

где ω — влагосодержание материала (часто выражаемое через весовую влажность материала); a_m — коэффициент нестационарной влагопроводности **, зависящий от природы материала и его влажностного состояния.

Уравнение влагопроводности, в частности, используется для обоснования простейших приближенных сравнительных расчетов длительности естественной сушки ограждающих конструкций из капиллярно-пористых материалов.

---

* То есть в среде с неизменной постоянной температурой.

** Аналог коэффициента температуропроводности: $a_m=D=\frac{\varkappa}{\varepsilon\gamma}$ ($м^2/ч$) где $\varkappa$ — коэффициент влагопроводности (*г/кг · ед. потенц.*) в установившихся условиях переноса, при заданном среднем влагосодержании материала; ξ — удельная влагоемкость материала (*г/кг · ед. потенц.*); γ — объемный вес ($кг/м^3$).

§ 5. ПОНЯТИЯ О КРИТЕРИЯХ ПОДОБИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Дифференциальные уравнения теплообмена дают принципиальную возможность решения многообразных задач, связанных с распространением тепла в проектируемых конструкциях. Однако конкретные решения для многих частных случаев сложны и требуют большой затраты труда или применения специальных счетно-решающих и моделирующих устройств.

В практике проектирования иногда важно знать, будут ли отличаться в рассматриваемом конкретном случае условия теплообмена или других физических процессов от уже известных и изученных ранее для сходных условий теоретическими методами или условиями экспериментальных исследований.

Теория подобия физических процессов устанавливает, что процессы, выражаемые одинаковыми дифференциальными уравнениями и подобными условиями однозначности, приобретают подобие во времени и пространстве в том случае, если равны безразмерные комплексы характерных физических величин, определяющих этот процесс и входящих в дифференциальные уравнения или условия однозначности. К условиям однозначности, конкретизирующим рассматриваемую задачу, относятся геометрические и физические характеристики формы, размеров и свойств рассматриваемой конструкции (или материальной системы) и окружающей ее среды, условия, устанавливающие явления на границах системы (поверхностях конструкции), а также определяющие особенности изучаемого процесса во времени.

Безразмерные комплексы физических величин, характеризующих процесс, называются критериями подобия. Эти критерии устанавливаются путем анализа физических размерностей величин, входящих в соответствующие дифференциальные уравнения, описывающие рассматриваемые процессы. Так, например, при изучении нагрева и остывания твердых тел, в частности строительных конструкций, важное значение имеет вытекающий из уравнения (I.7) критерий Фурье $\mathrm{Fo}=\frac{a\tau}{l^2}$ [б/р], где a — коэффициент температуропроводности, $м^2/ч$; τ — время, $ч$; l — характерный размер, $м$ (например, толщина или половина толщины), конструкции, внутри которой изучается теплообмен.

При подобии начального распределения температуры и условий теплообмена на поверхностях, граничащих с окружающей воздушной средой, кинетики остывания или нагрева сравниваемых конструкций будут близки между собой, если критерии Фурье равны.

Процессы перемещений влаги внутри конструкций, находящихся в изотермических условиях, выражаются уравнением влагопроводности, имеющим ту же математическую форму, что и уравнение (I.7) (с заменой коэффициента температуропроводности a, осред-

ненным значением коэффициента нестационарной влагопроводности a_m, имеющим аналогичную физическую размерность) *.

При рассмотрении процессов перемещения влаги, происходящих в изотермических условиях (например, естественной сушки влажных конструкций), важен гигрометрический критерий Фурье $Fo' = \frac{a_m \tau}{l^2}$ [б/р].

Если начальная влажность материала и условия влагообмена на поверхностях сравниваемых конструкций будут одни и те же, то сроки естественной сушки будут сопоставимы, при равенстве гигрометрических критериев Фурье. Критерий Лыкова $Lu = \frac{a_m}{a}$ [б/р], представляющий отношение коэффициентов нестационарной влагопроводности и температуропроводности, характеризует кинетику процессов перемещения влаги по отношению к процессам нестационарного переноса тепла. Величина этого критерия важна, в частности, при оценке эффективности различных вариантов температурных режимов и характерных периодов естественной сушки ограждающих конструкций. При малых значениях критерия Lu, которые характерны для длительных завершающих этапов естественного высыхания ограждающих конструкций, эффективны режимы сушки с многократно повторяющимися периодическими повышениями температур на поверхности конструкций.

Если $Lu = 0$, явления переноса влаги при процессах нестационарной теплопередачи отсутствуют, что объясняется применительно к закономерностям естественной сушки в воздушной среде предельно низким влагосодержанием капиллярно-пористых материалов и возникновением значительных сопротивлений влагообмену в толще и на поверхности конструкции.

Распределение температур в конструкциях связано с величиной критерия Био $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$, где α — коэффициент теплообмена на поверхности, *ккал/м²·ч·град*; l — толщина или половина толщины конструкции, *м*; λ — коэффициент теплопроводности материала, *ккал/м·ч·град*.

Этот критерий важен, в частности, при изучении температурных полей в местах сопряжений крупнопанельных стен и других индустриальных конструкций. В физическом отношении критерий Bi может быть представлен как отношение термического сопротивления l/λ рассматриваемой стенки к сопротивлению теплообмену на ее поверхности $\left(\frac{1}{\alpha_в} = R_в\right)$.

Если изучаются условия теплообмена у поверхностей помещения, принципиальное значение имеет критерий Нуссельта

---

* Введение осредненного (в пределах рассматриваемых значений начального и конечного влагосодержаний) значения a_m необходимо, поскольку величины этого коэффициента резко изменяются на различных стадиях сушки или увлажнения конструкций.

$\mathrm{Nu}=\frac{\alpha l_0}{\lambda}$, где l_0 — характерный размер помещения, *м*; λ — коэффициент теплопроводности пограничного слоя воздуха, прилегающего к поверхности, *ккал/м·ч·град*; α — коэффициент теплообмена, *ккал/м²·ч·град*.

Теплообмен в этом случае зависит от размеров помещения и скорости движения воздуха. Он протекает иначе в высоких производственных помещениях и отличается от теплообмена в помещениях с малоподвижной воздушной средой. Критерий Nu характеризует увеличение интенсивности теплообмена из-за возникающих конвекционных потоков воздуха по сравнению с теплопроводностью в неподвижной среде.

При рассмотрении условий теплообмена на поверхности конструкций, граничащих с воздушной средой, важны критерий Прандтля $\mathrm{Pr}=\frac{\nu}{a}$ [б/р] и критерий Грасгофа $\mathrm{Gr}=\beta\frac{gl^3}{\nu^2}\Delta t$ [б/р], где ν — кинематическая вязкость воздуха, *м²/сек*; a — коэффициент температуропроводности, *м²/сек*; Δt — разность температур воздуха и поверхности, *град*; β — коэффициент объемного расширения смеси воздуха с водяным паром, *1/град*; g — ускорение силы тяжести, *м/сек²*; l — характерный размер помещения.

Для изучения закономерностей структуры аэродинамических потоков у поверхности ограждающих конструкций зданий, используется критерий Рейнольдса $\mathrm{Re}=\frac{vl}{\nu}$, где v — скорость движения воздуха, *м/сек*; l — характерный размер поверхности, *м*; ν — кинематическая вязкость воздуха, *м²/сек*.

Критерий Рейнольдса может быть при замене $\nu=\frac{\eta}{\rho}$, (где η — динамическая вязкость; ρ — плотность) записан в виде:

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho v^2}{\eta\frac{v}{l}}.$$

Из этой записи ясно, что критерий Re характеризует величину отношения сил инерции к силам трения, имеющего место в аэродинамическом потоке.

Экспериментально установленные зависимости между определяющими критериями какого-либо физического процесса позволяют (при равенстве соответствующих критериев в других процессах) распространить эти зависимости на целую группу подобных явлений и определить константы, необходимые в этих случаях для теплофизических расчетов. В частности, это относится к таким сильно изменяющимся константам, как коэффициенты теплообмена на поверхностях конструкций.

Кроме определяющих физических критериев (некоторые из них были указаны ранее), в строительной теплофизике часто используются простейшие безразмерные величины, обычно представляю-

щие отношение одноименных параметров (в рассматриваемых точках или в различные периоды времени), например температур или геометрических размеров. Такие безразмерные величины называют параметрическими критериями или симплексами (т. е. величинами, упрощающими получаемые зависимости). Наиболее широкое распространение параметрические критерии получают при изучении температурных полей в неоднородных конструкциях и зонах теплопроводных включений. В этих и других случаях введение симплексов позволяет упростить расчетные формулы и сократить вычислительную работу.

§ 6. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

При рассмотрении особенностей теплообмена между поверхностью ограждающей конструкции и воздушной средой помещения наиболее существенное значение имеет передача тепла конвекцией и излучением.

В практических расчетах обычно пользуются следующей зависимостью теплообмена:

$$Q=\alpha(t_{в}-t_{пов})F\tau, \qquad (I.10)$$

где Q — количество тепла, *ккал*; α — коэффициент теплообмена, *ккал/м²·ч·град*; $t_{в}-t_{пов}$ — разность температур воздуха и поверхности ограждения, *град*; F — площадь поверхности, *м²*; τ — время, *ч*.

Величина, обратная коэффициенту теплообмена $R_{пов}=\frac{1}{\alpha}$ *град·м²·ч/ккал*, называется сопротивлением теплообмену. Коэффициент теплообмена может быть представлен как сумма коэффициентов передачи тепла излучением $\alpha_{л}$ и конвекцией $\alpha_{к}$, т. е. $\alpha=\alpha_{л}+\alpha_{к}$. При передаче тепла от внутреннего воздуха к поверхности ограждений величина α может существенно изменяться в зависимости от температурного режима поверхностей и воздушной среды в помещении, его размеров и особенностей воздухообмена; изменения этих факторов влияют на долю участия лучистого и конвективного тепла в общем теплообмене.

В отапливаемых помещениях передача лучистого тепла к поверхности наружных ограждений происходит (в холодный период года) от более нагретых поверхностей внутренних конструкций и предметов (перегородок, потолка, пола, отопительных приборов и т. д.). В производственных помещениях с выделениями тепла основное и иногда исключительно важное для практических целей значение имеет излучение от поверхностей агрегатов, печей и нагретого металла.

В сельскохозяйственных зданиях с постоянным содержанием скота (коровниках, свинарниках и т. п.) некоторый эффект вызывается тепловым излучением поверхности кожи животных.

Количество лучистого тепла $Q_{1,2}$, отдаваемого более нагретой поверхностью F_1 — поверхности F_2 определяется из выражения:

$$Q_{1,2} = C' F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \psi_{1,2} \ ккал/м^2 \cdot ч, \qquad (I.11)$$

где $C' = \dfrac{1}{\dfrac{1}{c_1} + \dfrac{1}{c_2} - \dfrac{1}{c_0}}$ — приведенный коэффициент излучения (c_1 и c_2 — коэффициенты излучения поверхностей; c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела); T_1, T_2 — температуры поверхностей, °К; $\psi_{1,2}$ — угловой коэффициент облучения, зависящий от геометрических размеров и взаимного расположения поверхностей.

Угловой коэффициент облучения определяет долю тепловой энергии, излучаемой поверхностью F_1 и падающей на поверхность F_2. Определение угловых коэффициентов облучения очень важно при исследовании теплообмена и значений температур на поверхностях ограждений (особенно в тех помещениях, где излучение велико), но связано с известными трудностями в отношении геометрических построений.

Величина ψ равна единице лишь в тех случаях, когда все лучи, излучаемые одной поверхностью, падают на вторую (например, две параллельные поверхности с большими размерами или замкнутые поверхности, одна из которых окружает другую). В других случаях величина ψ меньше единицы и может изменяться в широких пределах.

Необходимо иметь в виду, что угловой коэффициент облучения и широко известный в практике строительного проектирования коэффициент естественной освещенности являются одним и тем же геометрическим понятием с точки зрения закономерностей распространения лучистой энергии в пространстве (рис. I.5).

Угловой коэффициент облучения (ψ) и коэффициент естественной освещенности (к.е.о.) устанавливают: какая доля лучей, исходящих от излучающей поверхности F_1, падает на площадку dF_2 облучаемой поверхности F_2. Для опре-

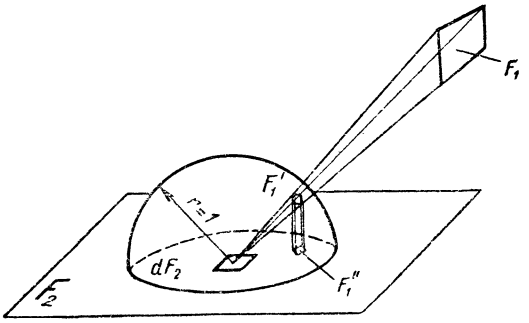


Рис. I.5. Пространственная схема определения коэффициента углового излучения:

F_1 — облучающая поверхность; F_2 и dF_2 — поверхность и площадка на ней, воспринимающие облучение; коэффициент углового излучения $\psi_{1,2} = F_1''/\pi$, равный коэффициенту естественной освещенности

деления величины ψ на полусфере единичного радиуса, центр которой расположен в середине площадки dF_2, строится изображение излучающей поверхности F_1' и его проекция F_1'' на облучаемой поверхности F_2. Отношение площади проекции F_1'' ко всей площади проекции полусферы, равной π, и есть угловой коэффициент облучения для площадки dF_2, равный коэффициенту естественной освещенности этой площадки.

Поскольку законы распространения лучистого тепла и видимой части лучистого спектра совершенно аналогичны, техника определения углового коэффициента облучения ничем не отличается от расчета естественной освещенности, если принять излучающую поверхность за светящуюся, а облучаемую поверхность ограждения — за освещаемую.

Так, например, при использовании графиков Данилюка, применяемых в светотехнических расчетах, для каждой исследуемой точки облучаемой поверхности $\psi = 0{,}0001\ n_1 n_2$, где n_1 — число делений, отсчитываемых по шкале графика I для поперечного разреза здания; n_2 — число делений по шкале графика II для продольного разреза или плана.

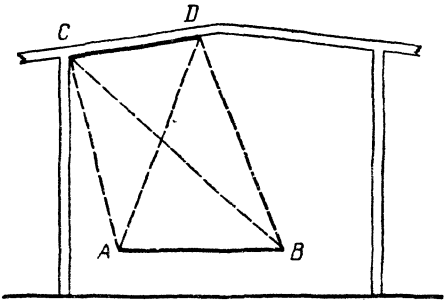


Рис. I.6. Определение коэффициента углового излучения при большой длине взаимооблучающихся поверхностей:

$$\psi = \frac{(AD + BC) - (AC + BD)}{2CD}$$

При определении общего среднего значения углового коэффициента облучения для больших поверхностей в достаточно длинных помещениях более удобен метод светового потока. В этом случае коэффициент углового облучения для двух взаимооблучающихся поверхностей AB и CD (рис. I.6) представляет разность сумм диагоналей и замыкающих сторон, разделенную на удвоенный размер облучаемой поверхности. Например, если в производственном помещении излучающей поверхностью является пол (имея в виду, что на последнем расположено большое число ванн электролиза, слитков остывающего металла и т. д.), то при размерах здания, указанных на рис. I.7, коэффициент углового облучения для покрытия будет

$$\psi = \frac{(27{,}0 + 14{,}4) - (20{,}4 + 10{,}0)}{2 \cdot 8{,}20} = 0{,}67.$$

Методы светотехнического расчета оказываются во многих случаях полезными при определении коэффициента углового облучения, особенно если иметь в виду, что в теплофизической литературе для определения этой величины обычно предлагаются графики и номограммы, полезные лишь для отдельных частных случаев.

При определении коэффициента передачи тепла излучением к внутренней поверхности ограждений отапливаемых гражданских зданий, приближенно принимают $\psi = 1{,}0$ и вычисляют $\alpha_л$ по формуле:

$$\alpha_л = C' \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}, \qquad (I.12)$$

где C' — приведенный коэффициент излучения (см. I.11); T_1 — принимается равной температуре внутреннего воздуха; T_2 — температуре внутренней поверхности ограждений.

Коэффициент передачи тепла излучением от наружной поверхности ограждения определяется по той же формуле; при этом T_1 принимается равной температуре наружной поверхности, а T_2 — температуре наружного воздуха.

Особенности передачи тепла конвекцией связаны с размерами и расположением в пространстве поверхностей ограждающих кон-

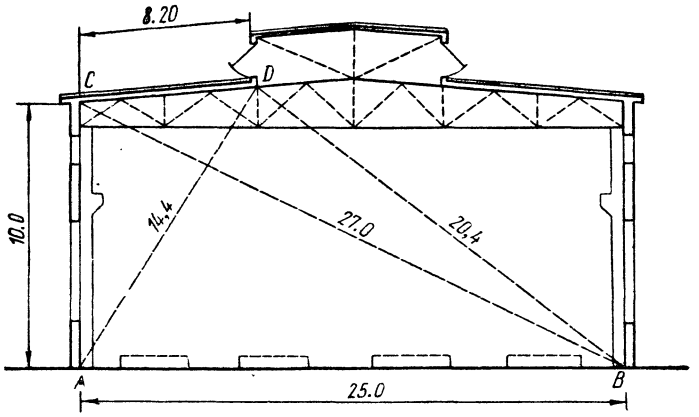


Рис. I.7. Определение коэффициента углового излучения между полом и покрытием в середине длины производственного здания

струкций. Кроме того, эти особенности существенно различны для внутренней и наружной поверхностей конструкций. На внутренней поверхности чаще всего происходит естественная конвекция, вызванная разностью температур воздуха и конструкции, а для наружной поверхности характерна вынужденная конвекция при обдувании ветром.

В связи с этим, формулы для определения $\alpha_к$ различны для внутренней и наружной поверхностей ограждающих конструкций.

На основе методов теории подобия величины $\alpha_к$ могут быть определены, как это предложено М. А. Михеевым, из критериальной зависимости:

$$Nu = 0{,}135\,(Gr \cdot Pr)^{1/3}. \qquad (I.13)$$

Эта обобщающая многие экспериментальные данные зависимость, справедлива в области турбулентного движения воздуха

вдоль поверхностей ограждений, что обычно соответствует действительным аэродинамическим условиям в помещениях зданий.

Для температуры 0°, указанное соотношение для поверхности стен, выражается формулой *

$$\alpha_к = 1{,}45\sqrt[3]{t_в - t_{пов}}, \qquad (I.14)$$

или в общем виде

$$\alpha_к = B\sqrt[3]{t_в - t_{пов}} = B\sqrt[3]{\Delta t}. \qquad (I.15)$$

Можно принять, что для потолка $B=1{,}86$, а для пола $B=1{,}0$.

В таблице I.1 приведены, в зависимости от величины Δt, значения $\alpha_к$ (*ккал/м²·ч·град*) для вертикальных поверхностей

Таблица I.1

Значения $\alpha_к$ в зависимости от величины Δt, *град*								
1	2	3	4	5	6	8	10	20
1,45	1,83	2,09	2,31	2,48	2,64	2,90	3,12	3,9

Значения $\alpha_к$ для вертикальных поверхностей при наличии ветра могут быть определены по данным, относящимся к вынужденной конвекции.

На основе методов теории подобия М. А. Михеевым установлена следующая зависимость между безразмерными критериями, определяющими особенности процесса вынужденной конвекции:

$$Nu = 0{,}032Re^{0{,}8}. \qquad (I.16)$$

Для сухого воздуха при температуре 0° $\lambda=0{,}0204$ *ккал/м·ч·град* и $\nu=13{,}7\cdot10^{-6}$ *м²/сек*. Из этой зависимости можно вывести формулу:

$$\alpha_к = 5{,}07\frac{v^{0{,}8}}{l^{0{,}2}}, \qquad (I.17)$$

где v — расчетная скорость ветра, *м/сек*; l — характерный (наименьший) размер поверхности ограждающей конструкции, *м*.

Если неизвестны размеры здания (например, при разработке типовых ограждающих конструкций), величина $\alpha_к$ определяется по формуле Франка

$$\alpha_к = 6{,}31v^{0{,}656} + 3{,}25e^{-1{,}91v}, \qquad (I.18)$$

где e — основание натуральных логарифмов (e=2,718).

Значения $\alpha_к$, в зависимости от v (*м/сек*), приведены ниже.

---

* Поправочные коэффициенты к этой формуле при других определяющих температурах равны 0,99 при 10° С; 0,98 при 20° С и 1,04 при —20° С.

Таблица I.

Значения $\alpha_к$, *ккал/м²·ч·град* в зависимости от скорости ветра

0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
3,10	5,42	7,50	9,45	13,05	16,4	19,65	22,70	28,60	34,2

Пример I.1. Определить величину коэффициента теплообмена у внутренней поверхности наружной стены отапливаемого гражданского здания.

Температура внутреннего воздуха +18°; температура поверхности стены ±12°. При оштукатуренных поверхностях стен коэффициент излучения $c=4{,}5$. Коэффициент передачи тепла излучением на основе формулы (I.12).

$$\alpha_л = \frac{1}{\frac{1}{4{,}5}+\frac{1}{4{,}5}-\frac{1}{4{,}96}} \cdot \frac{2{,}91^4-2{,}85^4}{18-12} = 4{,}13\cdot 0{,}95 = 3{,}92.$$

Коэффициент передачи тепла конвекцией для разности температур $t_в - t_{пов} = 6°$, по табл. I.1 с поправочным коэффициентом 0,99 (для температуры 12°), будет

$$\alpha_к = 2{,}65\cdot 0{,}99 = 2{,}62.$$

Коэффициент теплообмена на внутренней поверхности стены (коэффициент тепловосприятия) $\alpha_в = \alpha_л + \alpha_к = 3{,}92+2{,}62=6{,}54$ *ккал/м²·ч·град*, а сопротивление тепловосприятию

$$R_в = \frac{1}{6{,}54} = 0{,}152 \text{ } град\cdot м^2\cdot ч/ккал.$$

Величина сопротивления теплоотдаче на наружной поверхности стены зависит прежде всего от скорости ветра. Чем больше скорость ветра, тем меньше сопротивление теплоотдаче. При скорости ветра 5 *м/сек*, что характерно для осредненных неблагоприятных

Таблица I.3

Расчетные значения коэффициентов теплообмена и сопротивлений теплообмену

Поверхности конструкций	Коэффициент теплообмена α, *ккал/м²·ч·град*	Сопротивление теплообмену $R_{пов}$, *град·м²·ч/ккал*
Поверхности стен, полов и гладких потолков, обращенных в отапливаемые помещения	7,5*	0,133
Наружные поверхности конструкций, граничащие непосредственно с наружным воздухом	20,0	0,05
Наружные поверхности, обращенные в чердачное пространство или неотапливаемое помещение	10,0	0,10

* Значения $\alpha_в = 7{,}5$ соответствуют достаточно высоким помещениям. Для жилых помещений фактические значения $\alpha_в$ близки к 7,0 и даже 6,5.

зимних условий на преобладающей территории равнинных районов европейской части СССР, сопротивление теплоотдаче равно 0,04—0,05 *град·м²·ч/ккал*.

При практических расчетах теплофизических свойств ограждающих конструкций, величины коэффициентов теплообмена и сопротивлений теплообмену принимаются в соответствии с табл. I.3.

§ 7. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наибольшее значение для практических результатов теплофизических расчетов ограждающих конструкций имеют изменения теплопроводности материалов от их объемного веса (пористости), химического состава (природы материала) и влажностного состояния.

Зависимость теплопроводности от температуры становится практически значимой лишь при воздействии высоких температур (например, при высокотемпературной теплоизоляции); если рассматриваются колебания положительных температур в пределах от 0 до 60°, как это имеет место для ограждений зданий, этой зависимостью обычно пренебрегают. Однако при отрицательных температурах, вызывающих замерзание и перераспределение влаги во влажных пористых материалах, теплопроводность последних может существенно меняться.

Изменения объемного веса различным образом влияют на теплопроводность воздушно-сухих материалов. Для пористых материалов (кирпич, бетоны и др.) эти различия связаны с характером пористости и особенностями передачи тепла в порах различной величины.

Увеличение количества мелких замкнутых пор всегда существенно понижает теплопроводность. В крупных, а особенно сообщающихся между собой порах возникают конвективные токи воздуха, снижающие теплоизолирующий эффект пористости. Поэтому увеличение количества крупных замкнутых и полузамкнутых пор уменьшает теплопроводность в меньшей степени, а при сквозных, сообщающихся порах и кавернах может ее повысить. По мере общего уменьшения объемного веса одноименных материалов (например, бетонов) количество крупных пор обычно возрастает и уменьшение теплопроводности замедляется. Представление об этом дает табл. I.4, в которой приведены значения коэффициентов теплопроводности для керамзитобетона; уменьшение объемного веса бетона дано в графах таблицы с градациями в 200 *кг/м³*, а соответствующее уменьшение теплопроводности падает от 0,10 до 0,03 *ккал/м·ч·град*.

В таблице указаны средние ориентировочные значения теплопроводности воздушно-сухих бетонов *.

---

* Приведенные в таблице значения теплопроводности при равновесном эксплуатационном влагосодержании, используемые в практических теплофизических расчетах, превышают на 10—25% и более (см. приложения) теплопроводность совершенно сухих бетонов.

Таблица I.4

Характерные значения коэффициентов теплопроводности для керамзитобетонов в воздушно-сухом состоянии

Объемный вес γ, *кг/м*^{3}, воздушно-сухого бетона	1400	1200	1000	800	600
Коэффициент теплопроводности λ, *ккал/м·ч·град* . . .	0,45	0,35	0,25	0,20	0,17
$\Delta\lambda$	0,10	0,10	0,05	0,03	

Однако величину теплопроводности сухого материала нельзя точно установить только на основании объемного веса.

Она зависит также от аморфной или кристаллической структуры материала и даже от формы и крупности кристаллов.

Теплопроводность кристаллических материалов неоднородна: в направлении, перпендикулярном оси кристалла, она меньше, а вдоль кристалла в 2—3 раза больше.

Такая же неоднородность характерна для слоистых и волокнистых материалов; например теплопроводность сосновой древесины поперек волокон равна в воздушно-сухом состоянии 0,15 *ккал/м·ч·град*, а вдоль волокон — возрастает в два раза.

Существенное значение имеет химическая природа веществ, входящих в состав материала.

Во многих строительных материалах (бетоны, кирпич и др.) сочетаются два вида теплопроводности: 1) λ_1, вызванная упругими тепловыми колебаниями групп атомов в структурной решетке материала; 2) λ_2 зависящая от диффузии электронов внутри материала, т. е. от электропроводности последнего. Общая теплопроводность равна сумме этих двух отдельных проводимостей, т. е.

$$\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2. \qquad (I.19)$$

Второй вид теплопроводности имеет для многих неметаллических строительных материалов гораздо меньшее значение, поскольку их электропроводность мала. Основное влияние на теплопроводность каменных материалов оказывают тепловые колебания атомов.

Чем тяжелее атомы или атомные группы, образующие кристаллы материала (т. е. чем больше атомный вес химических компонентов, входящих в его состав) и чем слабее они между собой связаны, тем меньше теплопроводность материала.

Экспериментальными исследованиями установлена, например, меньшая теплопроводность шлакобетонов на металлургических шлаках, по сравнению со шлакобетонами такого же объемного веса, но на топливных (котельных) шлаках. Например, при $\gamma =$

$=1600$ *кг/м*^{3} для первого вида шлакобетона (в сухом состоянии) $\lambda=0{,}40$, а для второго $\lambda=0{,}50$ *ккал/м·ч·град*.

Это может быть объяснено тем, что в составе металлургических шлаков находятся кальций (Ca), марганец (Mn), железо (Fe), атомный вес которых более значителен по сравнению с атомным весом углерода (C) и серы (S), входящих в состав топливных шлаков.

Примерно также можно характеризовать и силикатные бетоны на карбонатных песках по сравнению с силикатными бетонами на кварцевом песке. В состав карбонатного песка входит кальций (Ca), атомный вес которого больше, чем у кремния (Si), содержащегося в кварцевом песке. Более значительная количественная разница теплопроводности в этом случае объясняется превалирующим количеством песка в бетоне, по сравнению с крупными заполнителями (шлаками), рассмотренными в предыдущем примере *.

Большое значение для теплопроводности материалов имеет их влажностное состояние. Для определения коэффициента теплопроводности влажного материала λ_ω по величине теплопроводности материала, сопоставимого, но сухого λ_0 часто используют приближенную формулу:

$$\lambda_\omega=\lambda_0+\beta_\omega, \qquad (I.20)$$

где ω — весовая влажность материала, %; β — коэффициент приращения теплопроводности на 1% влажности (например, по данным НИИСФ, для керамзитобетона $\beta\approx0{,}005$; для пенобетона $\beta\approx0{,}011$; для газобетона с преобладанием закрытой пористости $\beta\approx0{,}007$).

Этой формулой зависимость теплопроводности от влажности предполагается линейной, что не отвечает действительности, по крайней мере, на первых стадиях сорбционного увлажнения сухого материала.

Количественную значимость изменений теплопроводности материала от его влажности часто объясняют тем, что теплопроводность воды, вытесняющей воздух из пор при увлажнении материала, существенно высока (0,5 *ккал/м·ч·град*). Однако увеличение теплопроводности материала при его последовательном увлажнении превосходит величину, ожидаемую на основе разницы в теплопроводности воды и вытесняемого ей воздуха. Для многих материалов наибольшее увеличение теплопроводности на каждый процент повышения влажности отмечается на первых стадиях увлажнения материала. Такое более высокое увеличение теплопровод-

---

* Влияние химического состава каменных материалов, а также отсутствие атмосферы весьма заметным образом сказалось при исследованиях теплопроводности базальтовых пород лунных морей, содержащих минералы с значительным количеством химических веществ, обладающих большим атомным весом (например, ильменит $FeTiO_3$). Теплопроводность этих пород при довольно большом объемном весе (1000—2000 *кг/м*^{3}) характеризуется чрезвычайно низкими значениями.

ности по сравнению с происходящим на последующих стадиях увлажнения может быть объяснено различной проводимостью влаги, связанной с материалом (адсорбированной) и свободной воды; заполнением водой прежде всего мелких пор, а также сосредоточением влаги в местах контакта отдельных частиц материала, через которые преимущественно происходит передача тепла.

Кривые зависимости теплопроводности от влажности для тех материалов, в которых в соответствии с характером их природы, структуры и пористости перечисленные особенности проводимости и распределения влаги имеют наибольший эффект, отличаются более значительным изменением теплопроводности на начальных стадиях увлажнения.

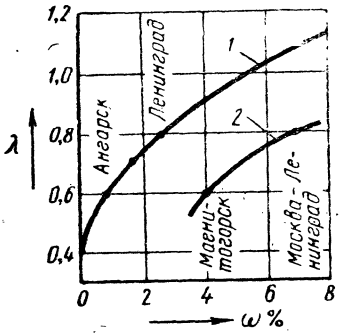


Рис. I.8. Изменения коэффициентов теплопроводности от влажности материала:

1 — для стен жилых зданий из обожженного кирпича; *2* — то же, из шлакобетона на топливных шлаках (γ=1600 *кг/м*³)

Поскольку в ограждающих конструкциях многих зданий с достаточно сухими помещениями равновесная влажность материала зависит от внешних метеорологических воздействий, климатические условия приобретают важное значение при определении расчетной величины коэффициента теплопроводности.

На рис. I.8 приведены изменения коэффициентов теплопроводности в зависимости от климатических условий для стен жилых зданий из обожженного кирпича и шлакобетонных блоков. Как видно из рисунка, такие изменения значительны для городов, расположенных в сухих восточных районах СССР, и более влажных — западных.

В соответствии с особенностями климатических воздействий, влияющих на естественную сушку ограждающих конструкций, территория районов строительства может быть подразделена (как это принято в нормах строительной теплотехники СНиП) на три зоны: сухую, с умеренным климатом (нормальную) и влажную (см. карту на стр. 000) *.

В сухой зоне средняя многолетняя равновесная влажность правильно спроектированных ограждающих конструкций зданий с нормальной влажностью близка к максимальной гигроскопической, а в устойчиво-сухих районах этой зоны еще более низка.

В зоне с умеренным климатом средняя равновесная влажность ограждающих конструкций даже при их ограниченной толщине может превышать максимальную гигроскопическую; коэффициенты

---

* При нормировании изменений коэффициентов теплопроводности строительных материалов, в зависимости от их влагосодержания использованы зоны, приведенные на карте, без подразделения на соответствующие районы

теплопроводности материалов для этой зоны принимаются более высокими, чем для сухой.

Во влажной зоне целесообразны специальные меры по уменьшению влажности материалов ограждающих конструкций (например, применение пустотных конструкций, быстро высыхающих материалов, защитных облицовок и т. д.); в тех случаях когда осуществление таких мер по практическим соображениям затруднительно, приходится повышать расчетные значения коэффициентов теплопроводности пористых материалов, обладающих высокой начальной влажностью, по сравнению с коэффициентами, применяемыми в умеренных условиях. Наибольшее повышение значений коэффициентов теплопроводности принимается для медленно высыхающих * материалов (золобетоны, шлакобетоны, силикатные блоки и т. д.).

Поскольку на влажностное состояние конструкций влажных и мокрых помещений сильное влияние оказывает внутренний микроклимат, градации необходимого повышения коэффициентов теплопроводности учитывают воздействия не только наружного климата, но и влажностного режима помещений.

Порядок назначения расчетных значений коэффициентов теплопроводности λ виден из табл. I.5.

Большинство экспериментальных исследований теплопроводности строительных материалов (в том числе и увлажненных) относятся к условиям передачи тепла при положительной температуре (например, в пределах от 0 до 30°). Основываясь на различиях в теплопроводности воды и льда (0,5 и 2,0 *ккал/м·ч·град*), часто считают, что замерзание влаги в порах материала должно приводить к резкому повышению теплопроводности.

Однако такое повышение могло бы происходить только в материалах полностью насыщенных водой при отсутствии перемещений этой воды в порах и капиллярах материала.

В реальных условиях для материалов конструкций обычно характерна ограниченная степень увлажнения.

При ограниченном увлажении материала преобладающее количество влаги сосредоточено в группах наиболее мелких пор и у контактов твердых частиц, по которым в основном распространяется тепло.

---

* Понятие о быстро и медленно высыхающих материалах связано с энергетическим уровнем, необходимым для отрыва в процессе сушки влаги от поверхности материала, равным, согласно уравнению Гиббса — Гельмгольца, изменению свободной энергии dF на этой поверхности: $dF = -\frac{R}{M} \ln \varphi$, где R — универсальная газовая постоянная; T — температура, °К; M — молекулярный вес; φ — относительное давление пара в материале, равное при равновесном влагосодержании относительной влажности воздуха. При постоянных температуре и молекулярном весе энергия связи влаги с материалом является однозначной функцией относительной влажности и связана с влагосодержанием и гигроскопическими свойствами материала.

Таблица I.5*

Данные по выбору расчетных значений коэффициентов теплопроводности в зависимости от условий эксплуатации ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений и значения относительной влажности в них	Зоны влажности по схематической карте		
	сухая	нормальная	влажная
Сухой; $\varphi<50\%$	Пониженные значения λ (графа А)		Нормальные значения λ (графа Б)
Нормальный; φ от 50 до 60%	Пониженные значения λ (графа А)	Нормальные значения λ (графа Б)	Расчетные значения λ, приведенные в графе Б, следует повышать на 10% для наружных ограждающих конструкций, выполняемых из медленно высыхающих материалов
Влажный; φ от 61 до 75%	Нормальные значения λ (графа Б)		
Мокрый 75%			

* Наружными ограждающими конструкциями, выполняемыми из медленно высыхающих материалов, являются, например, стены сплошной кладки из силикатного кирпича или блоков, шлакобетона, гипсобетона, золобетона, газозолобетона, газосиликата, перлитобетона, керамзитобетона с объемным весом более 1200 *кг/м*^{3} и т. д.

Однако образование зародышей кристаллов замерзающей влаги происходит в первую очередь на поверхности полостей, трещин и крупных пор*, а при дальнейшей кристаллизации влага перемещается в зоны возникающих кристаллов. Результатом таких процессов является заполнение инеем или рыхлым льдом участков материала, имеющего различные дефекты. Перемещение влаги из мелких пор и зон контакта зерен материала в состоянии уменьшить его общую теплопроводность.

Заметное снижение теплопроводности легких бетонов при их замерзании отмечено экспериментальными работами отечественных и зарубежных исследователей**. Однако практическое использование этого обстоятельства, по-видимому, возможно только в отдельных случаях.

Правильно запроектированные конструкции зданий с нормальным влажностным режимом могут отличаться повышенной влажностью только в первые годы эксплуатации, приобретая затем низкую равновесную влажность, при которой изменения теплопровод-

* В термодинамическом отношении работа, необходимая для возникновения кристаллического зародыша на поверхности полостей, трещин и крупных пор материала, является минимальной, в связи с чем рост кристаллов на этих поверхностях неизбежен.

** Ф. В. Ушков. Теплотехнические свойства крупнопанельных стен. М., Стройиздат, 1956; Сааре Эрик и Енсон Ингвар. Измерения теплопроводности влажных пористых строительных материалов с особым учетом влияния температуры и влажности. Стокгольм, 1962.

ности в условиях положительных или отрицательных температур не могут иметь значения.

В современном строительстве все большее применение находят эффективные теплоизоляционные материалы с предельно низким объемным весом и теплопроводностью. Очень пористые материалы (пенопласты, минеральная вата и т. д.) являются дисперсными средами, в которых распространение тепла, происходящее в твердых материалах путем теплопроводности, усиливается не только за счет конвекции, но и за счет излучения.

Например, вспененные пластики, полученные на основе полимеров (особенно пластики с сообщающимися порами), обладают свойством частично пропускать лучистое тепло. Коэффициенты пропускания зависят от длины волн излучения и в инфракрасной области спектра имеют довольно большие значения.

В тех случаях, когда доля лучистого теплообмена в процессе передачи тепла значительна (например, при прогреве ограждающих конструкций солнечной радиацией), теплофизические свойства конструкций, утепленных материалами, частично пропускающими излучение, могут оказаться недостаточными, если при расчете ограждений учтена теплопередача, происходящая только путем теплопроводности.

§ 8. ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

При установившихся условиях передачи тепла в любом слое ограждающей конструкции температура не изменяется, поскольку не происходит нагревания или охлаждения этого слоя.

Поток тепла Q, проходящий через любое сечение однородной конструкции, прямо пропорционален разности температур Δt на ее поверхностях и обратно пропорционален термическому сопротивлению R этой конструкции, т. е.

$$Q = \frac{\Delta t}{R} \; ккал/м^2 \cdot ч. \qquad (I.21)$$

Термическое сопротивление однородной конструкции или отдельного конструктивного слоя выражается отношением толщины δ к коэффициенту теплопроводности λ* материала, т. е.:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \; град \cdot м^2 \cdot ч/ккал. \qquad (I.22)$$

В том случае, если применяются материалы, теплопроводность которых изменяется в реальных условиях эксплуатации из-за уплотнения и деформации структуры (например, минеральный войлок), или материалы со сквозной пористостью, вызывающей перенос тепла конвекцией и излучением, выражение (I.22) может быть записано в виде $R = \frac{\delta}{b\lambda}$, где b — коэффициент качества теплоизоляции, значение которого превышает единицу (например, $b = 1{,}2$) и устанавливается опытным путем.

Для конструкции, состоящей из нескольких слоев (1, 2, 3... n)

$$R=\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}+\ldots+\frac{\delta_n}{\lambda_n}. \qquad (I.22a)$$

Общее сопротивление конструкции R_0 теплопередаче, с учетом сопротивлений теплообмену на ее внутренней и внешней поверхностях, составит:

$$R_0=R_в+\Sigma\frac{\delta}{\lambda}+R_н \ град\cdot м^2\cdot ч/ккал. \qquad (I.23)$$

Если температуры внутреннего и наружного воздуха не изменяются во времени и известны их значения $t_в$ и $t_н$, а также термические сопротивления отдельных слоев конструкции, легко определить температуры на поверхностях ограждающей конструкции и на границах отдельных слоев.

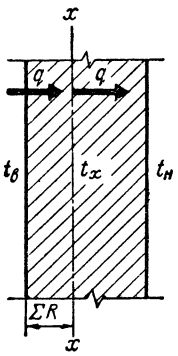


Рис. I.9. Произвольное сечение x внутри конструкции

Из равенства потоков тепла, проходящих через любое сечение x конструкции и через все ограждение в целом (рис. I.9), т. е.

$$Q=\frac{t_в-t_x}{R_в+\Sigma R_x}=\frac{t_в-t_н}{R_0}, \qquad (I.21a)$$

следует, что температура в плоскости $x-t_x$ и на внутренней поверхности ограждающей конструкции $t_{в.п}$ вычисляется по формулам:

$$t_x=t_в-\frac{t_в-t_н}{R_0}(R_в+\Sigma R_x), \qquad (I.24)$$

$$t_{в.п}=t_в-\frac{t_в-t_н}{R_0}R_в, \qquad (I.24a)$$

где ΣR_x — сумма термических сопротивлений от внутренней поверхности конструкции до сечения x; $R_в$ — сопротивление теплообмену на внутренней поверхности.

При графическом построении линии распределения температуры в слоистой ограждающей конструкции, вычерченной в масштабе реальных толщин отдельных слоев, уклон этой линии в пределах каждого слоя составит:

$$\frac{\Delta t}{\delta}=\frac{Q}{\lambda}.$$

Чем больше коэффициент теплопроводности λ, тем круче падение линии распределения температур в пределах рассматриваемого слоя.

В слоистой конструкции, выполненной из материалов с различной теплопроводностью, распределение температур выражается ломаной линией (рис. I.10, *а*). Эта линия превращается в прямую, соединяющую значения $t_в$ и $t_н$, если слоистая ограждающая конструкция вычерчена в масштабе термических сопротивлений R

(рис. I.10, *б*); в этом случае уклоны $\Delta t/R$ в пределах каждого слоя равны потоку тепла Q и, следовательно, в установившихся условиях теплопередачи равны друг другу.

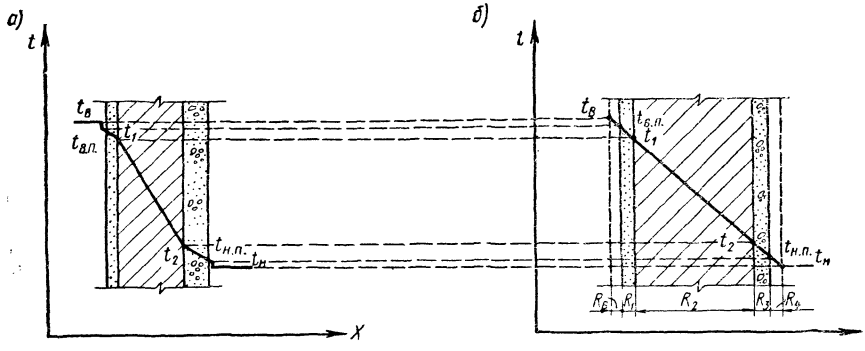


Рис. I.10. Схема распределения температур внутри слоистой ограждающей конструкции, при установившемся потоке тепла:

а — в конструкции, изображенной в масштабе реальных толщин отдельных слоев; *б* — в конструкции, изображенной в масштабе термических сопротивлений отдельных слоев

Пример I.2. Определить сопротивление теплопередаче R_0 наружной стены жилого дома для климата умеренной влажности (нормальной) и вычислить распределение температур при установившемся потоке тепла через эту стену. Кон-

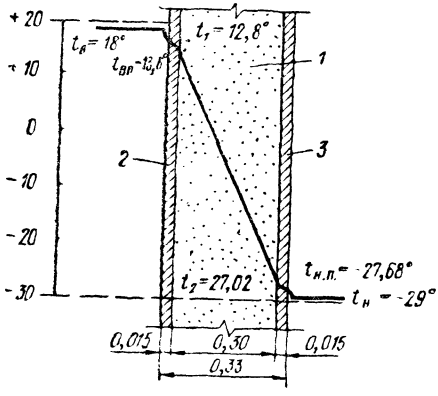


Рис. I.11. Панель наружной стены из керамзитобетона:

1 — керамзитобетон; *2* — внутренний фактурный слой; *3* — наружный фактурный слой

струкция стены выполнена в виде крупной панели из керамзитобетона толщиной 0,3 *м*, покрытий с внутренней и наружной сторон фактурными слоями толщиной по 0,015 *м* (рис. I.11). Объемный вес керамзитобетона 800 *кг/м*^{3}, а фактурных слоев — 1600 *кг/м*^{3}.

Толщины конструктивных слоев при теплофизических расчетах принимаются в метрах, поскольку в физическую размерность (*град·м*^{2}*·ч/ккал*) входит эта величина.

Значения коэффициентов теплопроводности (соответствующие нормальному влажностному состоянию материалов); λ_1 керамзитобетона — 0,25 *ккал/град·м·ч*; λ_2 наружного фактурного слоя — 0,65 *ккал/град·м·ч*; λ_3 внутреннего фактурного слоя — 0,55 *ккал/град·м·ч*. Коэффициент теплопроводности наружного фактурного слоя больше, чем внутреннего, поскольку в холодный период года он более влажен и теплопроводен.

По формуле (I.23) имеем:

$$R_0 = R_в + \Sigma\frac{\delta}{\lambda} + R_н = 0{,}133 + \frac{0{,}015}{0{,}55} + \frac{0{,}3}{0{,}25} + \frac{0{,}015}{0{,}65} + 0{,}05 =$$

$$= 0{,}133 + 0{,}027 + 1{,}2 + 0{,}023 + 0{,}05 = 1{,}43 \ \textit{град·м}^2\textit{·ч ккал}.$$

Рассматриваемая панельная конструкция обладает относительно высоким сопротивлением теплопередаче и при удовлетворительном решении сопряжений (между отдельными панелями), не понижающем теплозащитных свойств конструкции, отвечает теплофизическим требованиям для многих климатических районов СССР. Однако при повышении объемного веса керамзитобетона, например, до 1200 *кг/м*^{3}, значение R_0 резко снижается до недопустимых пределов ($R_0 = 0{,}98$).

При расчетной температуре внутреннего воздуха +18° и наружного —29° температура на поверхности стены, обращенной в помещение, будет по формуле (I.24а):

$$t_{в.п} = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0} R_в = 18 - \frac{18 - (-29)}{1{,}43} 0{,}133 = 18 - 32{,}9 \cdot 0{,}133 = 13{,}6°.$$

Температура в стене под внутренним фактурным слоем (I.24):

$$t_1 = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0}(R_в + R_1) = 18 - \frac{18 + 29}{1{,}43}(0{,}133 + 0{,}027) =$$

$$= 18 - 32{,}9 \cdot 0{,}16 = 12{,}8°.$$

Здесь $R_1 = 0{,}027$ — термическое сопротивление внутреннего фактурного слоя.

Температура внутри стены под наружным фактурным слоем:

$$t_2 = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0}(R_в + R_1 + R_2) = 18 - \frac{18 + 29}{1{,}43}(0{,}133 + 0{,}027 + 1{,}20) =$$

$$= 18 - 32{,}9 \cdot 1{,}37 = -27{,}02°.$$

Температура на наружной поверхности стены:

$$t_{н.п} = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0}(R_в + R_1 + R_2 + R_3) = 18 - \frac{18 + 29}{1{,}43}(0{,}133 + 0{,}027 +$$

$$+ 1{,}20 + 0{,}023) = 18 - 32{,}9 \cdot 1{,}39 = -27{,}68°.$$

Вычисленное распределение температур соответствует установившейся одномерной передаче тепла через конструкцию и достаточно близко может совпасть с изменениями температур в натурных условиях лишь для участков панельной стены, удаленных от оконных проемов и стыков (например, для панелей глухих торцовых стен), и при этом в периоды времени, характеризующиеся устойчивыми значениями температуры наружного и внутреннего воздуха, близкими к расчетным и не изменяющимися в течение нескольких суток.

В других случаях между значениями вычисленных и измеренных температур могут быть существенные различия, объясняемые

двумерной передачей тепла или тепловым состоянием конструкции, сохранившимся от предыдущих погодных условий.

§ 9. ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПРОСЛОЕК

Передача тепла через воздушную прослойку при разности температур на ее противоположных поверхностях происходит путем конвекции, излучения и теплопроводности (рис. I.12).

Теплопроводность неподвижного воздуха очень мала и если бы в воздушных прослойках воздух находился в состоянии покоя, их термическое сопротивление было бы очень высоким. В действительности, в воздушных прослойках ограждающих конструкций воздух всегда движется, например, у более теплой поверхности вертикальных прослоек он перемещается вверх, а у холодной — вниз. В прослойках с движущимся воздухом количество тепла, передаваемого путем теплопроводности, очень мало по сравнению с теплопередачей путем конвекции.

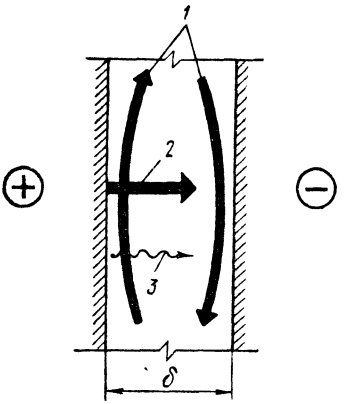


Рис. I.12. Схема передачи тепла через воздушную прослойку: *1* — путем конвекции; *2* — путем излучения; *3* — путем теплопроводности

По мере увеличения толщины воздушной прослойки количество тепла, передаваемого путем конвекции, возрастает, поскольку влияние трения воздушных струек о стенки уменьшается. Ввиду этого для воздушных прослоек не существует характерной для твердых материалов прямой пропорциональности между увеличением толщины слоя и значением его термического сопротивления.

При передаче тепла конвекцией от более теплой поверхности воздушной прослойки к более холодной, преодолевается сопротивление двух пограничных слоев воздуха, прилегающих к этим поверхностям, поэтому значение коэффициента, который можно было бы принять для свободной конвекции у какой-либо поверхности, уменьшается вдвое.

Количество лучистого тепла, передаваемого от более теплой поверхности к более холодной, не зависит от толщины воздушной прослойки; как говорилось ранее, оно определяется коэффициентом излучения поверхностей и разностью, пропорциональной четвертым степеням их абсолютных температур (I.3).

В общем виде поток тепла Q, передаваемый через воздушную прослойку, может быть выражен таким образом:

$$Q=\left(0{,}5\alpha_к+\frac{\lambda}{\delta}+\alpha_л\right) ккал/м^2\cdot ч, \qquad (I.25)$$

где $\alpha_к$ — коэффициент теплообмена при свободной конвекции; δ —

толщина прослойки, *м*; λ — коэффициент теплопроводности воздуха в прослойке, *ккал · м · ч/град*; $\alpha_л$ — коэффициент теплообмена за счет излучения.

На основании экспериментальных исследований обычно трактуют величину коэффициента теплопередачи воздушной прослойки как вызванную теплообменом, происходящим путем конвекции и теплопроводности:

$\alpha'_к = 0{,}5\alpha_к + \frac{\lambda}{\delta} = \frac{\lambda_{экв}}{\delta}$, но зависящую преимущественно от конвекции (здесь $\lambda_{экв}$ — условная эквивалентная теплопроводность воздуха в прослойке); тогда при постоянном значении Δt термическое сопротивление воздушной прослойки $R_{в.п}$ будет:

$$R_{в.п} = \frac{1}{\alpha'_к + \alpha_л} \; град \cdot м^2 \cdot ч/ккал. \qquad (I.26$$

Явления конвективного теплообмена в воздушных прослойках зависят от их геометрической формы, размеров и направления потока тепла; особенности этого теплообмена могут быть выражены величиной безразмерного коэффициента конвекции ε, представляющего отношение эквивалентной теплопроводности к теплопроводности неподвижного воздуха $\varepsilon = \frac{\lambda_{экв}}{\lambda}$.

Путем обобщения с помощью теории подобия большого количества экспериментальных данных М. А. Михеевым установлена зависимость коэффициента конвекции от произведения критериев Грасгофа и Прандтля, т. е.:

$$\frac{\lambda_{экв}}{\lambda} = f(\mathrm{GrPr}). \qquad (I.27)$$

Коэффициенты теплопередачи $\alpha_к'$, полученные из выражения $\alpha'_к = 2{,}3 \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{\delta}}$, установленного на основе этой зависимости при $t_{ср} = +10°$, приведены для температурного перепада на поверхностях прослойки, $\Delta t = 10°$ в табл. I.6.

Таблица I.6

Вид прослоек и направление потока тепла	Значения $\alpha'_к$ при толщине прослоек, *мм*				
	10	20	30	50	100
Вертикальные прослойки и горизонтальные при потоке тепла снизу вверх	2,3	1,9	1,75	1,55	1,30
Горизонтальные прослойки при потоке тепла сверху вниз	2,1	1,7	1,0	0,4	0,2

Относительно небольшие величины коэффициентов передачи тепла через горизонтальные прослойки при потоке тепла сверху вниз (например, в цокольных перекрытиях отапливаемых зданий) объясняются малой подвижностью воздуха в таких прослойках; наиболее теплый воздух сосредоточивается у более нагретой верхней поверхности прослойки, затрудняя конвективный теплообмен.

Величина передачи тепла излучением $\alpha_л$, определяемая на основе формулы (I.12), зависит от коэффициентов излучения и температуры; для получения $\alpha_л$ в плоских протяженных прослойках достаточно умножить приведенный коэффициент взаимооблучения C' на соответствующий температурный коэффициент принятый по табл. I.7.

Таблица I.7

Значения температурного коэффициента $\dfrac{\left(\frac{t_1+273}{100}\right)^4-\left(\frac{t_2+273}{100}\right)^4}{t_1-t_2}$ **в зависимости от средней температуры воздушной прослойки**

Средняя температура $\frac{t_1+t_2}{2}$	+25°	+20°	+15°	+10°	+5°	0°	−5°	−10°	−15°	−20°	−25°
Температурный коэффициент	1,06	1,01	0,96	0,91	0,86	0,81	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61

Так, например, при $C'=4{,}2$ и средней температуре прослойки, равной 0°, получим $\alpha_л=4{,}2\cdot0{,}81=3{,}4$ *ккал/м²·ч·град.*

В летних условиях величина $\alpha_л$ увеличивается, а термическое сопротивление прослоек уменьшается. Зимой, для прослоек, расположенных в наружной части конструкций, отмечается обратное явление.

Для применения в практических расчетах нормы строительной теплотехники ограждающих конструкций СНиП приводят значения термических сопротивлений замкнутых воздушных прослоек $R_{в.пр}=\dfrac{1}{\alpha'_к+\alpha_л}$, указанные в табл. I.8 (см. стр. 42).

Величины $R_{в.пр}$, приведенные в таблице, соответствуют разности температур на поверхностях прослоек, равной 10°. При разности температур 8°, величина $R_{в.пр}$ умножается на коэффициент 1,05, а при разности 6° — на 1,10.

Приведенные данные о термическом сопротивлении относятся к замкнутым плоским воздушным прослойкам. Под замкнутыми понимаются воздушные прослойки, ограниченные непроницаемыми материалами, изолированные от проницания воздуха извне.

Таблица I.8

Толщина прослойки, *мм*	$R_{в.пр}$, *град·м²·ч/ккал*			
	для горизонтальных прослоек при потоке тепла снизу вверх и для вертикальных прослоек		для горизонтальных прослоек при потоке тепла сверху вниз	
	лето	зима	лето	зима
10	0,15	0,17	0,15	0,18
20	0,16	0,18	0,18	0,22
30	0,16	0,19	0,19	0,24
50	0,16	0,20	0,20	0,26
100	0,17	0,21	0,21	0,27
150	0,18	0,21	0,22	0,28
200—300	0,18	0,22	0,22	0,28

Поскольку пористые строительные материалы воздухопроницаемы, к замкнутым могут быть отнесены, например, воздушные прослойки в конструктивных элементах из плотного бетона или других плотных материалов, практически не пропускающих воздуха при тех величинах разности давлений, которые типичны для эксплуатируемых зданий.

Экспериментальные исследования показывают, что термическое сопротивление воздушных прослоек в кирпичной кладке снижается примерно вдвое по сравнению с величинами, указанными в табл. I.8. При недостаточном заполнении швов между кирпичами раствором (например, при выполнении работ в зимних условиях) воздухопроницаемость кладки может возрасти, а термическое сопротивление воздушных прослоек приблизиться к нулю. Достаточная защита конструкций с воздушными прослойками от воздухопроницания является совершенно необходимой для обеспечения требуемых теплофизических свойств ограждающих конструкций.

Иногда в бетонных или керамических блоках предусматривают прямоугольные пустоты небольшой длины, часто приближающиеся к квадратной форме. В таких пустотах передача лучистого тепла возрастает за счет дополнительного излучения боковых стенок. Прирост величины $\alpha_л$ незначителен при отношении длины прослойки к ее толщине, равной 3 : 1 или более; в пустотах квадратной или круглой формы этот прирост достигает 20%. Эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий передачу тепла конвекцией и излучением в квадратных и круглых пустотах значительных размеров (70—100 *мм*) существенно возрастает, в связи с чем использование таких пустот в материалах с ограниченной теплопроводностью (0,50 *ккал/м·ч·град* и менее) не имеет смысла с точки зрения теплофизики. Применение квадратных или круглых пустот указанного размера в изделиях из тяжелых бетонов имеет главным образом экономическое значение (уменьшение веса); это значение утрачивается для изделий из легких и ячеистых бетонов, поскольку использование таких пустот может привести к понижению термического сопротивления ограждающих конструкций.

В противоположность этому, применение плоских тонких воздушных прослоек, особенно при многорядном их расположении в шахматном порядке (рис. I.13), целесообразно. При однорядном размещении воздушных прослоек более эффективно их расположение в наружной части конструкции (если обеспечена ее воздухонепроницаемость), поскольку термическое сопротивление таких прослоек в холодный период года возрастает.

Применение воздушных прослоек в утепленных цокольных перекрытиях над холодными подпольями более рационально, чем в наружных стенах, поскольку передача тепла конвекцией в горизонтальных прослойках этих конструкций существенно уменьшается.

Теплофизическая эффективность воздушных прослоек в летних условиях (защита от перегрева помещений) снижается по сравнению с холодным периодом года; однако эта эффективность возрастает за счет использования прослоек, вентилируемых в ночное время наружным воздухом.

При проектировании полезно иметь в виду, что ограждающие конструкции с воздушными прослойками обладают меньшей влажностной инерцией по сравнению со сплошными. В сухих условиях конструкции с воздушными прослойками (вентилируемыми и замкнутыми) быстро подвергаются естественной сушке и приобретают дополнительные теплозащитные свойства за счет малой влажности материала; во влажных помещениях наоборот — конструкции с замкнутыми прослойками могут сильно переувлажняться, что связано с потерей теплофизических качеств и вероятностью преждевременного их разрушения.

Из предыдущего изложения было видно, что передача тепла через воздушные прослойки в большой мере зависит от излучения. Однако применение отражательной изоляции с ограниченной долговечностью (алюминиевой фольги, окраски и т. д.) для повышения термического сопротивления воздушных прослоек может быть целесообразным только в конструкциях сухих зданий с ограниченным сроком службы; в сухих капитальных зданиях дополнительный эффект отражательной изоляции также полезен, но следует учитывать, что даже при утрате ее отражательных качеств теплофизические свойства конструкций должны быть не менее требуемых с тем, чтобы обеспечить нормальную эксплуатацию конструкций.

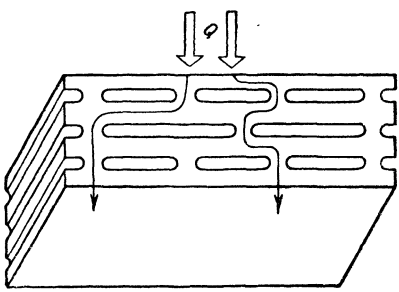


Рис. I.13. Целесообразное, в теплофизическом отношении, многорядное расположение воздушных прослоек в шахматном порядке; Q — поток тепла (стрелками показан извилистый путь распространения тепла по сплошному материалу)

В каменных и бетонных конструкциях с большой начальной влажностью (а также во влажных помещениях) использование алю-

миниевой фольги, утрачивает смысл, так как ее отражательные свойства могут быть быстро нарушены из-за коррозии алюминия во влажной щелочной среде. Применение отражательной изоляции наиболее эффективно в горизонтальных замкнутых воздушных прослойках при направлении потока тепла сверху вниз (цокольные перекрытия и т. д.), т. е. в том случае, когда конвекция почти отсутствует и передача тепла происходит в основном путем излучения.

Отражательной изоляцией достаточно покрыть только одну из поверхностей воздушной прослойки (более теплую, сравнительно гарантированную от эпизодического появления конденсата, быстро ухудшающего отражательные свойства изоляции).

Возникающие иногда предложения о теплофизической целесообразности разделения воздушных прослоек по толщине экранами из тонкой алюминиевой фольги в целях резкого уменьшения потока лучистого тепла не могут быть использованы для ограждающих конструкций капитальных зданий, поскольку малая эксплуатационная надежность такой теплозащиты не соответствует необходимой долговечности конструкций указанных зданий.

Расчетное значение термического сопротивления воздушной прослойки с отражательной изоляцией на более теплой поверхности повышается примерно вдвое по сравнению с величинами, указанными в табл. I.8.

В южных районах конструкции с воздушными прослойками обладают достаточной эффективностью в отношении защиты помещений от перегрева; применение отражательной изоляции приобретает в этих условиях особенно большой смысл, поскольку превалирующая часть тепла передается в жаркое время года излучением. Целесообразно в целях повышения теплозащитных свойств ограждений и снижения их веса, экранировать наружные стены многоэтажных зданий лучеотражающими долговечными отделками (например, полированными алюминиевыми листами) с тем, чтобы под экранами была расположена воздушная прослойка, другая поверхность которой покрыта окрасочной или иной экономичной отражательной изоляцией.

Усиление конвекции в воздушных прослойках (например, за счет активного вентилирования их наружным воздухом, поступающим с затененных, озелененных и обводненных участков прилегающей территории) превращается для летнего периода в положительный теплофизический процесс, в противоположность зимним условиям, когда этот вид переноса тепла, в большинстве случаев, совершенно нежелателен.

§ 10. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛАГООБМЕНА

Между закономерностями переноса энергии (в частности, тепла) и перемещениями массы вещества (в частности, влаги) широ-

ко известна математическая аналогия, предложенная еще Н. Е. Жуковским.

Эта аналогия не свободна от физических условностей, связанных с отмеченными выше коренными различиями в механизме переноса энергии и массы (стр. 8—12). Однако, если в дополнение к математическим обобщениям использовать установленные экспериментально константы переноса массы как внутри конструкции, так и на ее поверхностях, возможно изучение закономерностей переноса вещества на основе уравнений, аналогичных применяемым для описания процессов переноса энергии.

Если рассматривать перемещение влаги в капиллярно-пористых материальных средах с низким влагосодержанием, соответствующим воздушно-сухому состоянию материала, при котором перенос влаги в порах и капиллярах происходит преимущественно в парообразной фазе и в виде поверхностных пленок, за потенциал диффузии уместно принять парциальное давление водяного пара e (*мм рт. ст.*).

При этом в качестве константы диффузионного перемещения влаги принимается так называемый коэффициент паропроницаемости (μ *г/м·ч·мм рт. ст.*). При постоянной величине этого коэффициента математическая аналогия между нестационарной теплопроводностью и диффузией влаги через плоскую стенку, выполненную из капиллярно-пористого материала, может быть выражена следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\xi\gamma} \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}, \qquad \text{(I.28)}$$

где e — парциальное давление водяного пара, *мм рт. ст.*; τ — время, *ч* или *сут*; μ — коэффициент паропроницаемости материала, *г/м·ч·мм рт. ст.*; ξ — удельная влагоемкость материала, *г/кг·мм рт. ст.* (при изменении влагосодержания в пределах сорбционного увлажнения); γ — объемный вес материала, *кг/м*^{3}.

Методы определения коэффициента паропроницаемости и влагоемкости для целей расчета изменений влажностного состояния конструкций рассмотрены в гл. VI. Поскольку влагоемкость материала зависит от изменений температуры и с последними связана также и величина насыщающего парциального давления водяного пара в материальной среде, удельная влагоемкость ξ заменяется относительной ξ_0 (см. стр. 231), связанной с ней зависимостью:

$$\xi_0 = \xi E_t,$$

где E_t — максимальное парциальное давление, соответствующее насыщенному состоянию (100%-ной гигроскопической влажности) материала при рассматриваемой температуре. Тогда уравнение (I.28) примет вид:

$$\frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_t \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}; \qquad \text{(I.28а)}$$

Таким образом, влияние изменений температуры учитывается введением в уравнение величины E_t.

При численном решении уравнения (I.28а) обычно пользуются методом конечных разностей.

Применение этого уравнения для целей расчета изменений влажностного состояния ограждающих конструкций предложено К. Ф. Фокиным и практические методы расчета этих изменений разработаны им же.

При рассмотрении изменений влажностного состояния конструкций с более высоким влагосодержанием в воздушной среде с постоянной неизменной температурой, за потенциал переноса влаги может быть принято влагосодержание материала ω (*кг/кг*).

Ранее было приведено уравнение влагопроводности (при одномерном переносе влаги) внутри конструкции, аналогичное уравнению Фурье для неустановившегося переноса тепла путем теплопроводности.

В этом уравнении

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\varkappa}{\xi \gamma} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \qquad \text{(I.9а)}$$

перемещение влаги однозначно определяется градиентом влагосодержания, что может быть справедливым только в изотермических условиях, т. е. когда $\operatorname{grad} t = 0$.

Эти ограничения достаточно соответствуют, например, условиям естественной сушки конструкции с повышенным влагосодержанием в теплое время года, когда среднесуточные значения температур помещения и наружного воздуха почти не отличаются друг от друга.

Использование в этих целях уравнения влагопроводности для приближенных сравнительных расчетов сроков естественной сушки конструкций стен приведено в гл. VI. При этом в таких расчетах имеется существенное допущение, состоящее в том, что показатели перемещений влаги в капиллярно-пористом материале принимаются за постоянную вличину.

В действительности интенсивность перемещений влаги уменьшается по мере уменьшения влагосодержания материала, и это допущение может быть оправдано только в том случае, если для целей расчета будет принято среднее значение константы перемещений влаги за весь период естественной сушки конструкции, а также осредненные условия влагообмена на ее поверхностях.

Множитель пропорциональности $a_m = \frac{\varkappa}{\xi \gamma}$ перед правой частью уравнения может быть назван коэффициентом нестационарной влагопроводности и по своей структуре и физической размерности *м²/ч* или *см²/сут* аналогичен коэффициенту температуропроводности в уравнении Фурье. Здесь величина $\varkappa$, *г/м·ч*%, представляет коэффициент влагопроводности в установившихся условиях, являющийся аналогом коэффициента теплопроводности; ξ — выражает

удельное водопоглощение капиллярно-пористого материала, *г/кг*%; а γ, *кг/м*^{3} — его объемный вес.

Если изотермических условий для рассматриваемой конструкции не существует и она подвергается воздействию перепада температур, закономерности перемещения влаги могут быть осложнены явлениями термодиффузии, связанными с переносом массы вещества от участков с более высокой температурой к участкам с более низкой температурой.

В основе этого явления лежит разность температур и связанное с ней различие поверхностных натяжений и адсорбционных сил пленочной влаги, перемещающейся по поверхности капилляров пористого материала * под влиянием этой разности.

Экспериментальные исследования перемещений влаги в ограждающих конструкциях зданий показывают, что явления термодиффузии могут иметь значительное количественное выражение и практическую значимость главным образом при сверхгигроскопическом влагосодержании капиллярно-пористой материальной среды и резко выявленном градиенте температуры.

Такие параметры температурно-влажностного состояния не всегда характерны для условий эксплуатации ограждающих конструкций зданий, где влагосодержание сравнительно невелико, а перепады температур ограничены.

Математическое выражение условий переноса влаги при явлениях термодиффузии существенно усложняется, поскольку механизм переноса теряет однозначность, и влагосодержание материала уже не может являться потенциалом переноса, что было характерным для уравнения влагопроводности.

Дифференциальное уравнение переноса влаги в материальной среде (при одномерном перемещении в направлении x) имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + a_m \delta' \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \qquad (I.29)$$

где θ — потенциал переноса, являющийся функцией влагосодержания материала и внешних параметров среды; размерность потенциала может быть установлена в градусах специальной шкалы °В; τ — время; $a_m = \frac{\varkappa}{\xi\gamma}$ — коэффициент нестационарной влагопроводности; $\delta' \frac{°В}{°С}$ — коэффициент термовлагопроводности, отнесенный к разности потенциалов переноса влаги.

Первый член правой части уравнения выражает процесс влагопроводности в изотермической материальной среде; второй член — процесс переноса влаги, вызванный градиентом температуры.

При отсутствии перепада температур, второй член становится

---

* Точнее — по слоям молекул влаги, адсорбированным на этой поверхности.

равным нулю и уравнение (I.29) превращается в уравнение влагопроводности, в котором обобщенный потенциал переноса может быть заменен влагосодержанием материала.

При градиенте температуры, значимость термодиффузионного переноса зависит от величины градиента, а также от свойств и влагосодержания материала; поскольку из уравнения $\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ следует, что $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}$, выражение для переноса влаги термодиффузией может быть представлено, как

$$a_m \delta' \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{a_m}{a} \delta' \frac{\partial t}{\partial \tau} = \mathrm{Lu}\, \delta' \frac{\partial t}{\partial \tau}, \qquad (I.30)$$

где a — коэффициент температуропроводности материала, $м^2/ч$; Lu — критерий Лыкова, представляющий отношение интенсивностей переноса влаги и тепла.

Таким образом, значимость переноса влаги термодиффузией зависит от критерия Lu и изменений (колебаний) температуры во времени.

При малом влагосодержании внешних частей ограждающей конструкции (когда $a_m \to \min$ и Lu приближается к нулю) резко выраженные колебания температуры во времени являются возможным путем активизации естественной сушки *.

Если рассматривать изменения влажностного состояния конструкций в пределах невысокой влажности, соответствующей воздушно-сухому состоянию конструктивных слоев, граничащих с воздушной средой, и производить такое рассмотрение при среднемесячных значениях температуры, полагая суточные ее колебания заведомо небольшими, влияние термодиффузии окажется очень малым. В этом случае уравнение (I-29) принимает вид диффузионного уравнения Фурье:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}. \qquad (I.31)$$

Если основной причиной изменений влажностного состояния воздушно-сухой конструкции является диффузия водяного пара, за потенциал переноса влаги принимается парциальное давление, а величина a_m становится прямо пропорциональной коэффициенту паропроницаемости μ. Уравнение (I.31) записывается в виде (I.28).

Таким образом, в основу разработки инженерных методов расчета естественной сушки конструкций в изотермической воздушной среде и расчета сезонных изменений влажностного состояния воздушно-сухих конструкций могут быть положены однотипные дифференциальные уравнения.

---

* В связи с этим, естественная сушка ограждающих конструкций наиболее эффективна в районах с континентальным климатом и интенсивной солнечной радиацией. Уровень среднесуточной температуры тоже важен, но имеет подчиненное значение.

ГЛАВА II

ВНЕШНИЕ ФИЗИКО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗДАНИЯ

§ 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И ИХ ОГРАЖДЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТАХ СССР

Территория СССР простирается с севера на юг примерно на 4500 *км*, а с запада на восток — более чем на 9000 *км*. Этим, в основном, объясняется большое разнообразие климатических условий.

В Советском Союзе представлены четыре наиболее характерных типа климата: умеренный, субарктический, арктический, а на юге страны — субтропический.

Гигиенические требования к объемно-планировочному решению зданий и условия их эксплуатации в каждом климате различны. Такие различия могут быть конкретизированы по наиболее повторяющимся и длительным периодам теплового состояния внешней географической среды, влияющим на тепловые ощущения человека.

Степень влияния влажности на особенности теплового состояния внешней среды может быть установлена на основании общей оценки влажности климата в рассматриваемой местности или по карте влажностно-климатических характеристик районов строительства (стр. 000).

Сочетания рассматриваемого теплового состояния с ветрами определенной скорости, весьма важные, в частности, для характеристики территорий, прилегающих к морям и океанам, устанавливаются путем изучения повторяемости видов погоды с конкретной температурой и скоростью ветра. Из этих видов весьма важна погода с интенсивным переносом воздуха и содержащихся в нем взвешенных частиц (морозная с ветром, метелевая, штормовая, с пыльными и песчаными бурями).

Такая погода существенно влияет на рациональные приемы застройки, а также на типы зданий и ограждающих конструкций, ограничивая возможность применения инженерных решений, целесообразных в других условиях.

Внутренний объем проектируемых кварталов нуждается при заметной повторяемости таких погодных условий, в защитных мероприятиях (озеленение, снегозащита, контурные здания-барьеры и т. п.), а здания — в повышенной герметизации ограждающих конструкций.

К погоде, сильно влияющей на архитектурно-строительные решения в южных районах, относится также жаркая штилевая, прямо противоположная погодным условиям с интенсивным переносом воздуха. При повторяемости жаркой штилевой погоды, целе-

сообразно наибольшее раскрытие внутреннего объема проектируемых кварталов и зданий, в целях активизации аэрации и лучшего использования ветра при его возникновении.

После выделения подобных видов погоды, наиболее существенно влияющих на планировку, застройку, типы зданий и их герметизацию, классификация других видов погоды может быть построена на основе учета степени теплового воздействия на человека.

В любом климате основной характеристикой изменений или стабильности теплового состояния приземного слоя воздуха является повторяемость и продолжительность видов погоды наиболее распространенных по длительности и уровню температуры.

Установленные по соответствующим градациям температуры виды погоды определяют в значительной мере эксплуатационные требования к проектируемому зданию и являются показателями для выбора его типа, планировочного решения и особенностей ограждающих конструкций.

Для климатической типизации зданий характерными по особенностям воздействия на человека видами погоды можно считать требующую отопления помещений холодную (ниже +8°), прохладную (8—15°), теплую (16—28°) и жаркую (выше +28°).

В более неблагоприятных климатических условиях возникает необходимость дополнительного выделения очень холодной (например, ниже —12°) и очень жаркой (выше +32°) погоды.

Основное значение для полезной деятельности человека имеет характеристика погоды в дневное время суток; поэтому при рассмотрении имеющихся в справочных таблицах среднемесячных значений температуры уместно вводить поправки на повышение температуры днем.

Такие поправки приближенно могут быть определены по величинам средних амплитуд * колебаний температур для каждого периода. Ориентировочно эти величины составляют для весенних и осенних периодов в европейской части СССР и других зонах с умеренно-влажным климатом 3—4°, в Средней Азии 5°, в Восточной Сибири и Забайкалье весной 6—8°, осенью 5—6°.

Для летнего периода значения амплитуд увеличиваются до 5—6° в Европейской части СССР, до 6—8° в Средней Азии, а для Сибири равны 6—7°.

Если принять, что в течение суток температура наружного воздуха закономерно отклоняется от среднемесячных значений днем в большую сторону, а ночью — в меньшую (рис. II-1), характерные значения температуры для дневного периода могут быть получены как

$$t_{\text{дневн}} = t_{\text{ср.мес}} + 0{,}7A_{t_{\text{н}}} \; \text{град}. \qquad \text{(II.1)}$$

---

* Здесь под амплитудой понимается отклонение экстремальных (в течение осредненных за соответствующий месяц суток) значений температуры от ее среднемесячных значений. В метеорологических таблицах обычно указывается двойная амплитуда, представляющая разность между максимальными и минимальными значениями температуры.

Суммарная продолжительность холодной и очень холодной погоды в рассматриваемом климатическом пункте ориентировочно соответствует длительности отопительного периода года.

Верхний температурный предел прохладной погоды (15°) определяется обеспечением требуемого теплового уровня (18°) внутри жилого здания за счет внутренних выделений тепла, а верхний предел теплой погоды (+28°) примерно соответствует границе теплового состояния внешней среды, при котором длительное обеспечение температурного комфорта для человека, находящегося в здании (с ограниченной тепловой инерцией и отсутствием охлаждающих устройств), становится уже затруднительным.

Продолжительность прохладной и теплой погоды может быть приближенно определена путем рассмотрения указанных в табл. 1

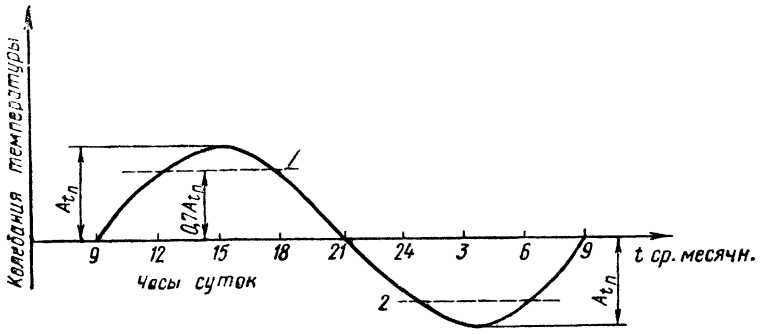


Рис. II.1. Отклонения температуры наружного воздуха в течение суток от средних значений:
1, 2 — характерные значения температуры в дневное и ночное время суток

норм строительной климатологии среднемесячных значений температуры в заданном пункте и внесения поправок на ее повышение в дневное время суток.

Так, например, для Ташкента среднемесячная температура июля равна 26,9°, а амплитуда колебаний температуры будет составлять около 8,5°.

Прибавляя в соответствии с формулой (II-1) $0{,}7 \cdot 8{,}5°$ к среднемесячной температуре июня (24,7°), июля (26,9°) и августа (4,9°), убеждаемся, что эти месяцы характеризуются жаркой погодой, тогда как в мае (среднемесячная температура 20,0°) и сентябре (19,4°) преобладает уже теплая погода.

Состав и продолжительность погоды того или другого вида, характеризующие тепловое состояние атмосферы в рассматриваемом пункте, могут служить основой для целесообразных мероприятий при проектировании.

В умеренном и неотличающемся сильными ветрами климате повторяемость и длительность холодной и прохладной погоды позволяет установить целесообразные объемно-планировочные характеристики проектируемого здания.

Можно считать, что при продолжительности отопительного периода года (холодной и очень холодной погоды) более 9 месяцев, уместно увеличение ширины жилых и гражданских многоэтажных зданий против общепринятой в умеренном климате. Имеется в виду необходимость сокращения теплопотерь и ненужность сквозного проветривания, а также целесообразность увеличения площади вспомогательных и назначенных для зимнего пребывания помещений (гардеробов, кладовых, холлов, рекреаций и т. д.).

Кроме того, при указанной длительности отопительного периода, в ряде северных (и, особенно, в заполярных) районах уменьшается целесообразность использования дневного света для лестничных клеток, санитарных узлов, служебных помещений. Поэтому разумно располагать их в глубине зданий, без непосредственного естественного освещения.

Увеличенная ширина застройки в рассматриваемых климатических условиях представляет экономические и эксплуатационные преимущества также и для многоэтажных промышленных зданий.

В одноэтажном промышленном строительстве для заполярных районов становятся экономически целесообразными и оправданными бесфонарные промышленные здания.

При наличии длительной очень холодной погоды и сильных зимних ветров возникает необходимость улучшения аэродинамических характеристик проектируемых зданий.

В гражданских и жилых зданиях становится недопустимым проектирование лоджий, а иногда даже балконов и эркеров; в промышленных зданиях следует избегать перепадов высот между отдельными пролетами и всемерно ограничивать применение фонарей верхнего света.

В холодных районах, в условиях многолетнемерзлых грунтов, помимо увеличения ширины зданий, становится необходимым устройство проветриваемого холодного подполья или даже цокольного технического этажа, препятствующего потерям тепла из отапливаемых помещений в грунт и обеспечивающего уменьшение вероятности неравномерных осадок и деформаций здания в результате самопроизвольного оттаивания и незакономерного уплотнения основания.

При тепловой изоляции поверхности многолетнемерзлого грунта, особо сильных ветрах и большой интенсивности переноса снега, возможны решения с отсутствием первого этажа (рис. II.2) позволяющие повысить эксплуатационные качества помещений в вышерасположенной части здания и уменьшить ежегодные расходы на очистку от снега прилегающей территории.

Обычно сочетание большой продолжительности (например, более 3-х месяцев) очень холодной погоды с значительной средней скоростью зимних ветров (например, выше 6—7 *м/сек*) свидетельствует о том, что при проектировании зданий целесообразно стремиться к их достаточно приемлемой в смысле обтекания ветром геометрической форме, учитывая вероятность возникновения снежных заносов у зданий (а для одноэтажных и на их кровле) и особенно

в аэродинамически неблагоприятных зонах, какими могут являться перепады высот, лоджии, фонари верхнего света и другие элементы зданий, трудно обтекаемые снеговетровым потоком.

В южных и юго-восточных районах СССР с большой продолжительностью жаркой погоды (например, более 2—3 месяцев) целесообразны типы зданий, отличающиеся наибольшей эффективностью в смысле естественного проветривания и защиты от перегрева помещений. Многоэтажные здания нуждаются в таких условиях не только в применении солнцезащитных устройств для светопроемов, но и в экранировании наружных стен, особенно обращенных на юг

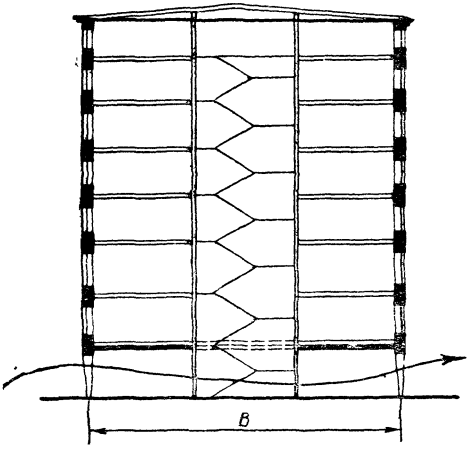


Рис. II.2. Схема поперечного разреза многоэтажного здания для северных районов:

1 — сквозное продувание ветром при отсутствии сплошной застройки первого этажа

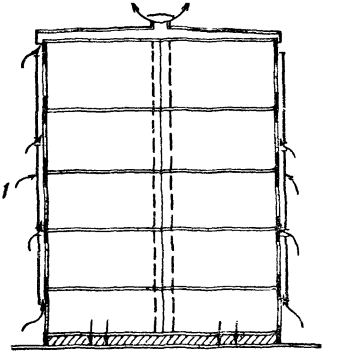


Рис. II.3. Схема активизированного проветривания стен и покрытия многоэтажного здания для южных районов:

1 — экран, отражающий лучи солнца (листовой алюминий и т. д.)

и запад, а также в активном вентилировании совмещенных покрытий и чердачных пространств.

Совместная естественная вентиляция экранированных стен и покрытий (рис. II.3) может быть активизирована за счет разности температур в зонах притока (нижний этаж) и удаления воздуха (кровля и чердак), а также в вертикальных прослойках на солнечном и теневом фасадах. Дополнительным средством активизации являются вентиляционные шахты и лестничные клетки, располагаемые в центральной части здания.

Значительная разность ночных и дневных температур способствует повышенному охлаждающему эффекту ночного проветривания помещений и экранированных ограждений, что отмечается опытом эксплуатации зданий в Таджикской и Узбекской ССР. Натурные исследования и теоретический анализ условий лучистого и конвективного теплообмена в жилых и других помещениях помогли установить, что в южных районах нецелесообразно снижать высо-

ту этих помещений до минимума. В низких помещениях с высотой менее 3 *м* активизируется перегрев человека лучистым теплом и затрудняется организация конвективных токов воздуха, способствующих ограничению такого перегрева (см. стр. 96).

При проектировании малоэтажных (в частности, двухэтажных) зданий для поселкового строительства и отдельных районов городов в отмеченных климатических условиях целесообразно расположение каждой квартиры в двух уровнях, имея в виду увеличение теплового напора при естественном проветривании каждой индивидуальной квартиры, а также поглощение некоторого количества тепла полом нижнего этажа, расположенным непосредственно на грунте (рис. II.4). Эффективность естественного проветривания воз-

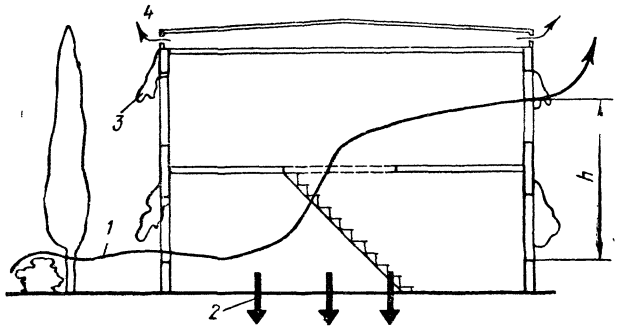


Рис. II.4. Схема естественного проветривания и защиты от перегрева квартиры блочного двухэтажного дома:

1 — поток воздуха при сквозном проветривании, активизируемом высотой *h*; *2* — поток тепла, направленный из жилых помещений в грунт; *3* — вертикальное озеленение; *4* — экранированная и вентилируемая крыша; *h* — высота между приточными и вытяжными проемами

растает при целесообразном озеленении прилегающего участка, несколько понижающем температуру приточного воздуха.

Целесообразное озеленение прилегающей территории, а также защита вертикальных ограждений здания вьющейся зеленью способствует, кроме того, и повышению эффективности мероприятий, предохраняющих от перегрева.

Высокая влажность южного климата далеко не всегда влияет на появление существенных отличий в планировке и типе зданий; однако в большинстве случаев интенсивные увлажняющие воздействия, зависящие от климатических условий, приходится учитывать при проектировании ограждающих конструкций и выборе материалов для них.

Для влажного южного климата обычно характерно меньшее понижение температуры в ночное время; увеличение эффективности естественного проветривания достигается в этих условиях благоприятной ориентацией здания относительно преобладающих ночных ветров.

При грунте, сильно увлажняемом большим количеством атмосферных осадков, может возникнуть необходимость в наличии под зданием хорошо проветриваемого подполья; лишь в низких заболоченных местах сильно увлажняемых территорий целесообразно превращение такого подполья в специальный цокольный этаж или даже решение здания с отсутствием первого этажа.

Гораздо чаще для любого приемлемого типа зданий в районах с регулярно повторяющимися дождями, сопровождаемыми достаточно сильным ветром (прибрежные территории и вообще районы, находящиеся в зоне интенсивных океанических влияний), приходится проектировать ограждающие конструкции с достаточной защитой от увлажнения или даже от возможности сквозного промокания. В зависимости от количества осадков, выпадающих в жидкой фазе, и скорости ветров, сопровождающих их выпадение, степень защиты может изменяться. Минимальная защита обеспечивается утолщением и повышением непроницаемости защитнофактурного слоя, а при необходимости более эффективной защиты эта мера сочетается с применением ограждений, имеющих вентилируемые воздушные прослойки в наружной части или непосредственно под защитнофактурным слоем.

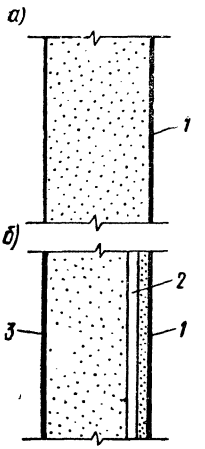


Рис. II.5. Схема защиты стен от атмосферного увлажнения:
а — минимальная защита; *б* — защита, достаточная при любом увлажнении; *1* — уплотненный фактурный слой или малопроницаемый экран; *2* — проветриваемая воздушная прослойка; *3* — влагоизоляция

Повышение непроницаемости защитнофактурного слоя может достигаться путем использования плотной, малопроницаемой отделки (например, керамической, из листового алюминия и т. д.) или путем придания наружной части конструкции водоотталкивающих (гидрофобных) свойств при ее производстве в заводских условиях (обработка кремнийорганическими соединениями, специальными эмульсиями и т. д.).

При ограниченной интенсивности увлажнения вертикальных поверхностей жилых зданий оказывается достаточным утолщение защитнофактурного слоя до 3—4 *см* и выполнение его из плотного вибрированного мелкозернистого бетона или строительного раствора.

В приморских местностях Англии широко применяют конструкции кирпичных стен с воздушной вентилируемой прослойкой в их наружной части.

Эта же конструктивная схема решения ограждений здания в состоянии обеспечить благополучное влажностное состояние и необходимые теплозащитные свойства других проектируемых конструкций в любых условиях атмосферного увлажнения, а при устройстве влагоизоляции изнутри даже и при сочетании атмосферного

увлажнения с перемещением влаги из помещений, например, в банях, прачечных, влажных производственных цехах, рис. II-5, *б*.

Районирование территории СССР по длительности и повторяемости характерных видов погоды, влияющих на тепловое состояние человека, пребывающего в здании, представляет весьма трудоемкую задачу.

Первым целесообразным приближением к решению этой задачи является деление территории СССР на климатические районы и подрайоны, принятое в нормах проектирования жилых зданий (СНиП II-Л.I—71) и проведенное по многолетним климатическим данным для января и июля в рассматриваемых географических пунктах.

Осредненные температурные параметры этих месяцев близки (для большинства пунктов) к длительным экстремальным тепловым состояниям наружного воздуха в течение зимнего и летнего периодов, а потому могут (в первом приближении) использоваться для оценки температурных границ всего комплекса характерных типов погоды в течение года.

В основу районирования принято давно существовавшее, но явно недостаточное деление территории СССР на четыре района: I — с очень холодной, длительной и суровой зимой и коротким прохладным или теплым летом (преимущественно крайние северные и северо-восточные районы СССР); II — с холодной зимней погодой, но теплым или умеренно жарким летом (центральные и северо-западные районы европейской части СССР, а также прибрежные дальневосточные); III — с отрицательной (иногда низкой) зимней температурой, но обычно жарким летом (преимущественно районы с континентальным климатом в средней полосе и отчасти на юге и юго-востоке); IV — с короткой и неустойчивой зимой, но длительным жарким летом (крайние южные и юго-восточные районы).

Каждый из этих четырех районов подразделен на 3—5 подрайонов обозначенных на карте первыми заглавными буквами русского алфавита (см. карту в конце книги).

Дальнейшее уточнение рассматриваемого климатического районирования наиболее возможно на основе изучения повторяемости и длительности характерных видов погоды в течение года и должно привести к удовлетворительному решению поставленной задачи.

Выше отмечены только основные климатические характеристики, влияющие на выбор типа здания или его основных ограждающих конструкций. Климатические же параметры, используемые в качестве расчетных величин, характеризующих наиболее неблагоприятные внешние воздействия при теплофизических расчетах проектируемых конструкций, необходимы во всех случаях проектирования.

Большинство неблагоприятных внешних воздействий и влияний микроклимата, воспринимаемых ограждающими конструкциями, являются комплексными, т. е. вызванными совместным действием нескольких физических факторов, например, низкой температуры и

ветра, совместным эффектом высокой температуры и солнечной радиации. Такое совместное действие может привести к недопустимому охлаждению или прогреву конструкции. Однако при определении необходимых физических свойств конструкции, например, ее сопротивления теплопередаче или свойства ограничивать прогрев, приходится учитывать расчетные величины отдельных наиболее важных физико-климатических факторов из числа входящих в комплекс воздействий, поскольку закономерности их влияния на ограждающие конструкции могут быть существенно различными по своему физическому действию.

В зимний период конструкции с относительно проницаемой наружной частью и недостаточно герметизированными стыками будут наиболее охлаждаться при сильном ветре, сопровождающемся во многих районах относительно умеренной температурой; наоборот, для конструкций с непроницаемым наружным слоем (например, из листового алюминия) и плотными сопряжениями отдельных элементов расчетное состояние охлаждения наступит при предельно низкой температуре наружного воздуха, что для многих местностей совпадает со штилевым состоянием атмосферы.

В общем случае необходим расчет конструкции по двум состояниям климатических воздействий, а именно: по наиболее неблагоприятным условиям воздухопроницания (при сильном ветре и сопровождающей его относительно умеренной температуре) и по наибольшему возможному охлаждению при низкой расчетной температуре, но сравнительном безветрии.

При этом расчетная скорость ветра и расчетная температура при его отсутствии должны назначаться таким образом, чтобы вероятность их повторений (обеспеченность) в рассматриваемой местности была одинаковой.

В отдельных климатических районах отмечаются совпадения во времени большой скорости ветра и предельно-низкой температуры наружного воздуха. Это происходит по той причине, что именно ветер определенного направления сопровождается понижением температуры. Такие климатические условия характерны, например, для многих прибрежных районов Дальнего Востока, полуострова Мангышлак, Новороссийска и других местностей.

В этих случаях два расчетных состояния климатических воздействий совмещаются, и расчет производится при большой скорости ветра и низкой расчетной температуре, что конечно представляет наибольшую опасность для чрезмерного переохлаждения конструкции.

Аналогичная необходимость расчета по двум состояниям внешних воздействий возникает при проектировании ограждающих конструкций в относительно южных районах.

Здесь необходим расчет распределения температур внутри конструкции при установившейся предельно низкой температуре наружного воздуха в холодный период года (с целью установить необходимое сопротивление конструкции теплопередаче) и расчет периодического прогрева ограждения в летних условиях; выража-

ющийся в определении допустимых колебаний температуры на поверхности, обращенной в помещение (т. е. расчет затухания колебаний температуры внутри конструкции).

Воздействия внешнего климата и микроклимата помещений влияют на периодические увлажнения и естественную сушку ограждающих конструкций; в связи с этим равновесное влажностное состояние материалов и их теплопроводность зависят от климата; допустимая величина влажности материалов в ограждающих конструкциях иногда может быть обеспечена только при применении целесообразного конструктивного решения.

Перечисленными воздействиями климата далеко не исчерпывается его значение при конструировании ограждений и их теплофизическом расчете. Важное значение имеет, например, возможность образования наледей на карнизах, инея и гололеда на поверхности наружных стен, что вызывает увлажнение конструкций и последующее разрушение их поверхностных и отделочных слоев.

Объем учебного пособия не позволяет рассмотреть многие климатические воздействия, учет которых был бы полезен при проектировании. Ниже конкретизированы только некоторые из них, наиболее важные для наружных ограждающих конструкций.

§ 2. РАСЧЕТНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Для проведения теплофизических расчетов ограждающих конструкций зданий необходимо выделять периоды времени ограниченной продолжительности наиболее холодных или жарких видов погоды с наиболее низкой или наиболее высокой температурой. Такие значения температуры называют экстремальными.

При этом расчетные низкие температуры устанавливают как средние для одних или нескольких наиболее холодных суток, наблюдающихся в данной местности с определенной ограниченной повторяемостью. Принято считать, что такая повторяемость наиболее неблагоприятных для человека (находящегося в помещении) значений теплового состояния наружной среды может достаточно характеризовать многолетнюю надежность ограждающих конструкций здания в целях защиты людей от чрезмерного охлаждения. В некоторые очень холодные зимы допускается определенное переохлаждение помещений или поддержание нормальной температуры в них за счет усиленного действия отопительных систем.

Обычно применяемый в проектной практике простейший теплотехнический расчет ограждающих конструкций для холодного периода года производится на основе закономерностей для установившихся условий теплопередачи (температура наружного и внутреннего воздуха принимается неизменной во времени), тогда как в действительных условиях имеют место более сложные процессы неустановившегося охлаждения конструкций. В связи с этим значение температуры наружного воздуха для такого простейшего расчета теплозащитных свойств ограждающих конструкций устанавливается и принимается с учетом времени, необходимого для пре-

дельно допустимого охлаждения рассматриваемых конструкций, возможного при крайних и наиболее длительных понижениях зимней температуры в данном географическом пункте.

Отдельные зимы в одной и той же местности отличаются различной степенью суровости.

Значение расчетной температуры, устанавливаемое как среднее из метеорологических данных для восьми наиболее холодных зим за 50-летний период, обеспечивает 8%-ную повторяемость тепловых состояний более неблагоприятных по сравнению с расчетными, поскольку температуры ниже средних будут иметь место лишь для половины холодных зим.

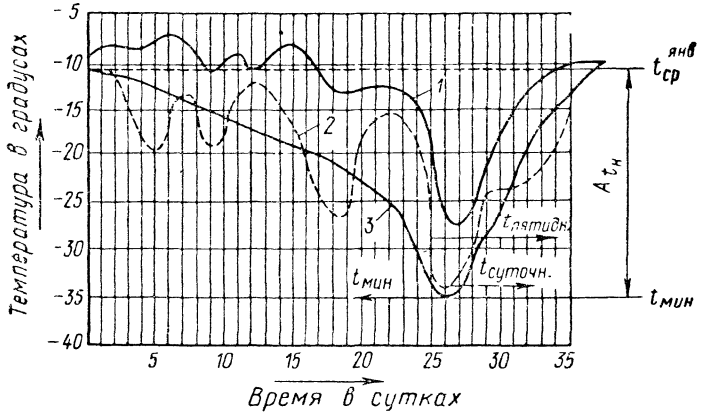


Рис. II.6. Изменения температуры наружного воздуха в наиболее холодный период зимы:

1 — средние за сутки многолетние температуры; *2* — средние за сутки температуры в наиболее холодные зимы; *3* — расчетные изменения температур; $t_{ср}^{янв}$ — средняя температура наиболее холодного месяца; $t_{пятидн}$ — средняя температура наиболее холодной пятидневки; $t_{суточн}$ — средняя температура наиболее холодных суток; $t_{мин}$ — расчетное значение минимальной температуры

Можно принять, что по мере приближения к наиболее холодному периоду зимы температура наружного воздуха постепенно понижается от среднемесячной температуры наиболее холодного месяца (для большинства местностей — января) до предельно низких температур, возможных в рассматриваемом географическом пункте. Характер такого понижения температуры указан на рис. II.6. Из рисунка видно, что предельно низкая температура наружного воздуха имеет место в течение ограниченного времени; средняя температура наиболее холодных суток близка к средней минимальной, но средняя температура за несколько суток подряд (например, за пятидневку) оказывается уже гораздо выше.

При проектировании какой-либо ограждающей конструкции за расчетную принимается средняя температура наиболее холодного

промежутка времени, в течение которого завершается процесс охлаждения этой конструкции; такое завершение выражается в предельном понижении температуры на поверхности ограждения, обращенной в помещение. Продолжительность времени, необходимого для предельного охлаждения рассматриваемой ограждающей конструкции, зависит от ее массивности; чем массивнее конструкция, тем длительнее это время.

Расчеты нестационарного охлаждения конструкций, вызванного понижением температуры в соответствии с рис. II.6, показывают, что для полного охлаждения легких конструкций, утепленных эффективными теплоизоляционными материалами, требуется около одних суток, тогда как для тяжелых массивных конструкций, выполненных из кирпича или конструктивных бетонов, процесс охлаждения завершается только в течение периода от трех до пяти суток. Предельно низкие температуры на внутренней поверхности конструкции, полученные сложным нестационарным методом расчета, хорошо учитывающим действительные условия охлаждения, могут быть установлены более простым расчетом по установившимся условиям теплопередачи, если в качестве расчетной будет принята средняя температура наружного воздуха за период охлаждения конструкции.

В соответствии с этим для расчета легких ограждающих конструкций принимается средняя температура наиболее холодных суток; для массивных — средняя температура наиболее холодной пятидневки; для конструкций средней массивности — полусумма этих температур. Расчетная температура может совпадать с абсолютно минимальной только для одинарного остекления и других особо легких ограждений с ничтожной тепловой инерцией.

Чем массивнее ограждающая конструкция или чем больше ее тепловая инерция, тем более умеренная температура наружного воздуха принимается при теплотехническом расчете.

В качестве характеристики тепловой инерции конструкции нормами строительной теплотехники ограждающих конструкций СНиПа принята так называемая «условная толщина» конструкции, предложенная проф. О. Е. Власовым. Условная толщина представляет безразмерный критерий (произведение или в слоистых конструкциях сумму произведений термических сопротивлений отдельных слоев на коэффициент теплоусвоения s соответствующего материала, т. е. $D=Rs$ или $D=\Sigma Rs$), характеризующий число температурных волн, затухающих внутри конструкции при периодическом действии таких волн на одну из внешних ее поверхностей *.

К легким ограждающим конструкциям с характеристикой тепловой инерции менее 4,0 относятся все наиболее распространенные

* Этот безразмерный критерий достаточно точно характеризует процесс затухания температурных волн только в однослойных конструкциях, в слоистых — затухание зависит от толщины и порядка расположения отдельных слоев, а поэтому критерий является приближенным. Однако для применяемых в строительстве конструкций приближение обычно не превышает практически необходимой точности расчетов.

виды бесчердачных покрытий промышленных зданий, крупнопанельные и щитовые конструкции стен, утепленные эффективными теплоизоляционными материалами, слоистые конструкции стен, выполняемые в виде облицовок из бетона, керамики, пластмасс и легких утеплителей и т. д. *

К массивным конструкциям с характеристикой тепловой инерции более 7,0 следует относить однородные стены с толщиной более 0,6 *м*, выполненные из полнотелого глиняного или силикатного кирпича, а также из сплошных бетонных камней или блоков (при объемном весе бетона 1600 *кг/м*^{3} и более).

К ограждающим конструкциям средней массивности с характеристикой тепловой инерции в пределах от 4,1 до 7,0 принадлежат стены из легковесного и многодырчатого кирпича, пустотной керамики, ячеистых бетонов, пустотных шлакобетонных камней и других подобных изделий.

Чем больше тепловая инерция (массивность) ограждающей конструкции, преодолеваемая в процессе охлаждения, тем более осредняется расчетная температура. Если на рис. II.6 обозначить разность между абсолютно минимальной и средней температурой наиболее холодного месяца через $A_{t_н}$, то в общем виде значение расчетной температуры $t_{расч}$ может быть определено так (предложено В. Н. Богословским):

$$t_{расч} = -t_{ср}^{янв} - \psi A_{t_н}. \qquad (II.2)$$

Здесь величины корреляционного коэффициента ψ изменяются в зависимости от тепловой инерции конструкции, в пределах от 1,08 D для легких конструкций до 0,083 D — для предельно массивных.

Закономерное соотношение между среднемесячными и более низкими температурами позволило Е. С. Рубинштейн предложить метод определения средних температур наиболее холодных пятидневок и суток по средним температурам наиболее холодного месяца. Приближенная эмпирическая формула для вычисления расчетной температуры имеет вид:

$$t_{расч} = at_{ср}^{янв} + b, \qquad (II.3)$$

где a — коэффициент, равный 1,125, для вычисления температуры пятидневки и 1,146 — для температуры суток; b — некоторая величина в градусах, определяемая в соответствии с закономерностью колебаний зимних температур в рассматриваемом географическом районе.

Закономерности (II.2) и (II.3) имеют главным образом методи-

---

* Из числа легких конструкций целесообразно выделить особо легкие с характеристикой тепловой инерции менее 2,5. Поскольку продолжительность охлаждения таких конструкций предельно мала, в качестве расчетной температуры при их теплофизическом расчете уместно принимать осредненную из абсолютно минимальных температур.

ческии интерес и могут быть использованы при составлении норм и справочных таблиц.

При проектировании используются расчетные температуры наружного воздуха для легких и массивных конструкций, включенные в справочные таблицы норм строительной климатологии и геофизики СНиПа.

Для того чтобы судить о теплофизической целесообразности применения типовых конструкций в отдельных климатических районах, а также для определения расчетных температур во вновь возникающих населенных пунктах, важно знать общий характер изменений расчетных параметров по территории СССР.

На прилагаемой карте, составленной при консультации Е. С. Рубинштейн, указаны изолинии средних температур наиболее холодных пятидневок, т. е. расчетных температур для массивных конструкций (см. карту в конце книги).

Изолинии проведены через 5°; в равнинных местностях СССР ориентировочные значения расчетных температур для пунктов, расположенных между изотермами, могут быть определены линейной интерполяцией с точностью до 1°.

Методы определения расчетных температур наружного воздуха, применяемые в СССР, отличаются большей физической обоснованностью по сравнению с практикой, установившейся в этом отношении во многих зарубежных странах.

Разработка физически обоснованных методов определения расчетных температур определялась большим разнообразием и суровостью климатических условий СССР. При этих условиях необходимые теплофизические свойства ограждающих конструкций часто являются решающими для обеспечения их долговечности. Кроме того, такая разработка вызывается общей необходимостью развития больших объемов строительства на научной основе.

В других, в частности Западно-Европейских, странах с более мягким и однородным климатом, уточнение значений зимних расчетных температур наружного воздуха теряет свою актуальность по крайней мере для тех типов ограждающих конструкций, толщина которых определяется конструктивными соображениями и условиями прочности, доминирующими по сравнению с влиянием более слабо выраженных климатических воздействий.

В таких странах в качестве расчетных температур часто используют значения последних, близкие к многолетним абсолютно минимальным, что ведет к повышению скрытых запасов теплофизической надежности, но не приводит к необходимости менее экономичного решения ограждений, поскольку их конструктивная толщина определяется другими факторами.

§ 3. СОЧЕТАНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР С ВЕТРОМ

Предельное охлаждение ограждающих конструкций отапливаемых зданий может иметь место или при низкой расчетной температуре наружного воздуха в условиях относительного безветрия, как

это было рассмотрено в предыдущем разделе, или при сочетании отрицательной (хотя бы более умеренной) температуры и сильного ветра.

В первом случае отмечается предельное охлаждение конструкций достаточно непроницаемых для холодного воздуха; во втором — ограждений более проницаемых, через которые может проникать значительное количество этого воздуха и тем самым охлаждать конструкцию и помещение.

При низкой расчетной температуре и относительном безветрии потери тепла Q через конструкцию, выполненную из достаточно плотных материалов, происходят только путем теплопроводности и пропорциональны разности температур Δt помещения и наружного воздуха, т. е.

$$Q=\frac{\Delta t}{R_0}\ ккал/м^2\cdot ч \qquad (II.4)$$

или

$$Q_0=\frac{1}{R_0}\ ккал/м^2\cdot ч\cdot град,$$

где R_0 — сопротивление конструкции теплопередаче, $град\cdot м^2\cdot ч/ккал$; Q_0 — потери при разности температур в 1°.

При отрицательной температуре и разности давлений, вызванной, например, сильным ветром, потери тепла будут происходить и путем теплопроводности, и за счет охлаждающей сквозной фильтрации холодного воздуха через ограждение. Сумма потерь тепла $Q_{сумм}$ будет:

$$Q_{сумм}=\frac{1}{R_0}+cW\ ккал/м^2\cdot ч\cdot град, \qquad (II.5)$$

где c — теплоемкость воздуха, равная 0,24 $ккал/кг\cdot град$; W — поток фильтрующегося холодного воздуха, $кг/м^2\cdot ч$.

Эта сумма потерь тепла вызывается и разностью температур, и разностью давлений воздуха Δp на противоположных поверхностях конструкции, т. е. происходит за счет двух физических процессов (теплопроводности и возухопроницания), обусловленных различными потенциалами переноса.

Обычно полагают, что потери тепла из-за фильтрации холодного воздуха через ограждающие конструкции зданий составляют некоторую долю ψ_0 от потерь тепла, в результате теплопроводности. Тогда общие потери тепла будут:

$$Q_0=\frac{1}{R_0}+\psi_0\frac{1}{R_0}, \qquad (II.6)$$

где последний член выражает дополнительные потери тепла из-за фильтрации холодного воздуха.

Очевидно, что при расчетной температуре наружного воздуха потери тепла не должны превышать следующей величины:

$$Q_{сумм}=\frac{t_н}{R_0}+\psi_0\frac{t_н}{R_0}. \qquad (II.7)$$

Отсюда следует, что

$$Q_{\text{сумм}} R_{\text{о}} = t_{\text{н}} + \psi_0 t_{\text{н}}. \qquad \text{(II.8)}$$

Произведение $Q_{\text{сумм}} R_{\text{о}}$ имеет размерность в градусах и является суммарной температурой, при которой в условиях воздействия фильтрации потери тепла наибольшие.

Эти потери тепла будут происходить при суммарной расчетной температуре

$$t_{\text{сумм}}^{\text{расч}} = t_{\text{н}} + \psi_0 t_{\text{н}} = t_{\text{н}}(1 + \psi_0) \; \textit{град}. \qquad \text{(II.9)}$$

Из уравнений (II.5) и (II.6) следует, что

$$\psi_0 = cWR_{\text{о}} \; [\text{б/р}] \qquad \text{(II.10)}$$

или, поскольку (как это более подробно изложено на стр. 106 и 173) поток фильтрующегося через конструкцию воздуха при ветре

$$W = \frac{\Delta P_{\text{в}}}{R_{\text{и}}},$$

где $R_{\text{и}}$ — сопротивление конструкции воздухопроницанию,

$$\Delta P_{\text{в}} = \frac{\kappa v^2 \gamma_{\text{н}}}{2g} \approx 0{,}04 v^2,$$

где κ — аэродинамический коэффициент, выражающий часть ветрового напора, переходящего в статическое давление на поверхности конструкции; v — скорость ветра, *м/сек;* $\gamma_{\text{н}}$ — объемный вес фильтрующегося воздуха, *кг/м*^{3}; g — ускорение силы тяжести (9,81 *м/сек*^{2}),

$$\psi_0 = 0{,}24 \frac{0{,}04 v^2}{R_{\text{и}}} R_{\text{о}} = \frac{R_{\text{о}}}{R_{\text{и}}} 0{,}0096 v^2 \approx \frac{R_{\text{о}}}{R_{\text{и}}} 0{,}01 v^2,$$

т. е. при одновременном действии мороза и ветра

$$t_{\text{расч}} = t_{\text{н}} \left(1 + 0{,}01 \frac{R_{\text{о}}}{R_{\text{и}}} v^2\right), \qquad \text{(II.11)}$$

где $t_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха при ветре.

Очевидно, что для совершенно непроницаемых ограждающих конструкций $\psi_0 = 0$, поскольку $R_{\text{и}} \to \infty$; для этих ограждений $t_{\text{сумм}}^{\text{расч}} = t_{\text{н}}^{\text{расч}}$, т. е. предельное охлаждение наступит при наинизшей расчетной температуре наружного воздуха, независимо от скорости ветра.

Некоторое увеличение потерь тепла может произойти в этом случае только за счет изменения при ветре коэффициента теплообмена на наружной поверхности конструкции.

Наоборот, для проницаемых ограждающих конструкций коэффициент ψ_0 будет иметь существенную величину, пропорциональную отношению сопротивления теплопередаче к сопротивлению воздухопроницанию, и при большой скорости ветра значение суммарной температуры превысит расчетную температуру наружного воздуха.

Во всех тех случаях, когда отношение суммарной температуры к наинизшей расчетной превышает единицу $\frac{t_{\text{сумм}}^{\text{расч}}}{t_{\text{н}}^{\text{расч}}} > 1$, необходимо увеличивать сопротивление воздухопроницанию проектируемых ограждающих конструкций путем применения соответствующих конструктивных мероприятий (утолщение или повышение непроницаемости фактурных слоев, уплотнение стыков и сопряжений ограждающих конструкций, в частности, переплетов окон и т. д.).

Например, для конструкций кирпичных неоштукатуренных стен с сопротивлением воздухопроницанию $R_{\text{и}} = 1{,}8$ *мм вод. ст.* $м^2 \cdot ч/кг$ и сопротивлением теплопередаче $R_{\text{о}} = 1{,}2$ *град* $\cdot м^2 \cdot ч/ккал$, величина

$$\psi_0 = \frac{1{,}2}{1{,}8} 0{,}01 v^2 = 0{,}0067 v^2.$$

Принимая в рассматриваемой местности повторяемость сильных ветров равной повторяемости расчетных понижений температуры наружного воздуха, получим, например, для Норильска (при $t_{\text{н}}^{\text{ветр}} = -28°$ и $v = 12$ *м/сек* по сравнению с $t_{\text{н}}^{\text{расч}} = -45°$), $t_{\text{расч}}^{\text{сумм}} = -28\ (1 + 0{,}0067 \cdot 12^2) = -54{,}88° > -45°$.

В этом случае при суммарной температуре, учитывающей воздействие ветра, происходят бо́льшие потери тепла стенами, чем при расчетной температуре наружного воздуха и безветрии.

Правильной конструктивной мерой в данном случае будет применение плотного (или утолщенного) наружного фактурного слоя, имея в виду повышение сопротивления стены воздухопроницанию до 35—40 *мм вод. ст.* $м^2 \cdot ч/кг$.

Еще более полезной будет высокая степень уплотнения стыков и сопряжений конструктивных элементов наружных стен. Однако наибольшая необходимость возникает в отношении возможно высокой герметизации оконных переплетов.

Более существенное увеличение суммарной температуры (по сравнению с расчетной при безветрии) отмечается в тех климатических районах, где сильные и продолжительные ветры совпадают во времени с предельно низкими температурами наружного воздуха, поскольку именно эти ветры вызывают понижение температуры (полуостров Мангышлак, Владивосток, Новороссийск и др.).

В этих районах существенно возрастают требования к непроницаемости наружных ограждающих конструкций даже в том случае, если такие конструкции удовлетворяют требованиям эксплуатации для других довольно холодных районов.

Величина суммарной температуры не может являться постоянной, так как она зависит от скорости ветра и наружной температуры (ему сопутствующей), а также от аэродинамической обтекаемости здания, степени воздухопроницаемости ограждающих конструкций и их теплозащитных свойств.

Тем не менее эта величина является полезной при проектировании ограждающих конструкций здания, поскольку позволяет правильно установить значение сопротивления воздухопроницанию

наружных ограждений и целесообразное его соотношение с сопротивлением теплопередаче.

При проектировании ограждающих конструкций многоэтажных (высоких) зданий, необходимо иметь в виду, что разность давлений для наружных ограждений нижнего этажа дополнительно возрастает за счет теплового напора (Δp_t).

Тогда

$$\Delta p_{\text{расч}} = \Delta p_{\text{в}} + \Delta p_t = \frac{k v^2 \gamma_{\text{н}}}{2g} + 0{,}7H(\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}}), \qquad \text{(II.12)}$$

где H — высота здания; $\gamma_{\text{н}}$ и $\gamma_{\text{в}}$ — соответственно, объемные веса наружного и внутреннего воздуха.

Принимая $k = 0{,}7$, получим [26]

$$\psi_0 = cWR_0 = 0{,}24 \frac{\frac{0{,}7v^2\gamma_{\text{н}}}{2 \cdot 9{,}81} + 0{,}7H(\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}})}{R_{\text{и}}} R_0 \approx$$

$$\approx 0{,}17 \frac{R_0}{R_{\text{и}}} [0{,}05v^2\gamma_{\text{н}} + H(\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}})]. \qquad \text{(II.13)}$$

Применение формулы (II.9) при значении ψ_0, полученном из (II.13), показывает, что ограждающие конструкции нижней части высоких зданий должны обладать в районах с суровой зимой и сильными ветрами весьма высоким сопротивлением воздухопроницанию. При этом, особое внимание должно уделяться герметизации стыков конструктивных элементов, оконных переплетов, а также изоляции входных дверей, располагаемых не менее чем в тройных тамбурах.

§ 4. РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА ГОДА

При проектировании ограждающих конструкций жилых и общественных зданий для крайних южных районов СССР, решающее значение имеет расчет теплофизических свойств по летним условиям, ограничивающий перегрев помещений при периодическом повышении температуры наружного воздуха в течение суток и действии солнечной радиации.

В ряде случаев такой теплофизический расчет необходим и для тех промышленных зданий, в помещениях которых важно (в технологических целях) соблюдение постоянной температуры.

Летом в помещениях, где отсутствует кондиционирование воздуха, устанавливается среднесуточная температура, близкая к среднему значению наружной.

При незначительной разности среднесуточных температур у наружной и внутренней поверхностей ограждающих конструкций, передача тепла внутрь помещений через стены и другие непрозрачные конструкции происходит главным образом из-за периодических повышений температуры на наружной поверхности огражде-

ний (вследствие колебаний температуры наружного воздуха в течение суток и действия солнечной радиации).

Периодически изменяющееся температурное поле ограждающих конструкций и количественный эффект их нестационарного прогрева могут быть определены соответствующим расчетом (стр. 195—197), если известны среднесуточные значения температур наружного и внутреннего воздуха и амплитуда колебаний температуры на наружной поверхности конструкций.

В таблицах норм строительной климатологии не приводится непосредственных данных о среднесуточной температуре наружного воздуха в летний период года. Эта температура $t_{ср}$ может быть приближенным образом вычислена из выражения:

$$t_{ср} = t_{макс} - \frac{A_t'}{2}, \qquad (II.14)$$

где $t_{макс}$ — средняя максимальная температура в дневное время самого жаркого месяца (устанавливаемая по нормам строительной климатологии); A_t' — средняя (двойная) суточная амплитуда температуры для самого жаркого месяца (обычно июля), определяемая по табл. 2 этих норм.

Так, например, для Ташкента

$$t_{ср} = 35{,}3 - \frac{17{,}4}{2} = 27{,}6°,$$

где величины 35,3° и 17,4° взяты из указанных норм.

В летних условиях среднесуточная температура не может характеризовать изменений температурного поля, поскольку она соответствует лишь среднему уровню теплового состояния поверхности ограждающей конструкции, от которого происходят периодические отклонения температур при прогреве конструкции и ее остывании. На рис. II.7 показаны границы возможных изменений температурного поля внутри наружной стены и постепенное затухание колебаний температур в ее толще по мере удаления от наружной поверхности.

Необходимая для теплофизического расчета величина амплитуды колебаний температуры на наружной поверхности конструкции определяется не только колебаниями температуры наружного воздуха, но и тепловым эффектом солнечного облучения.

Время дня, в которое происходит непосредственное облучение наружной поверхности конструкций, вызывающее их прогрев, зависит от ориентации этих конструкций относительно солнца и обычно не совпадает с тем временем дня, когда температура наружного воздуха имеет наибольшее значение.

Приближенное совпадение времени солнечного облучения с максимальной температурой наружного воздуха характерно для стен, обращенных на западную и особенно юго-западную сторону горизонта (рис. II.8), в связи с чем при суммирующихся наибольших тепловых воздействиях прогрев подобных конструкций более интенсивен, чем для стен, ориентированных иным образом, в частности, обращенных на восток.

Вычисление расчетной температуры наружного воздуха $t_н'$, изменяющейся в зависимости от ориентации наружной поверхности ограждения, производится по формуле

$$t_н' = t_{макс} - (t_{макс} - t_{мин})\beta, \qquad (II.15)$$

где $t_{макс}$ и $t_{мин}$ — соответственно максимальная и минимальная температуры наружного воздуха; β — поправочный коэффициент.

Приближенные значения этого коэффициента могут быть приняты по табл. II.1.

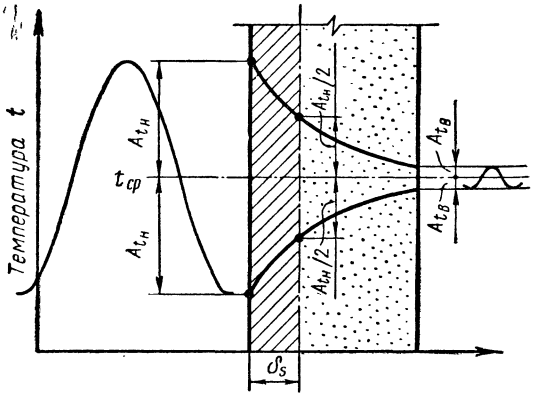


Рис. II.7. Изменения температурного поля однородной наружной стены при летнем прогреве:

$t_{ср}$ — средняя температура за сутки; $A_{t_н}$ — амплитуда колебаний теплового состояния наружной поверхности стены; $A_{t_в}$ — амплитуда колебаний теплового состояния поверхности, обращенной в помещение; δ_s — слой стены, в котором колебания температуры уменьшаются в два раза

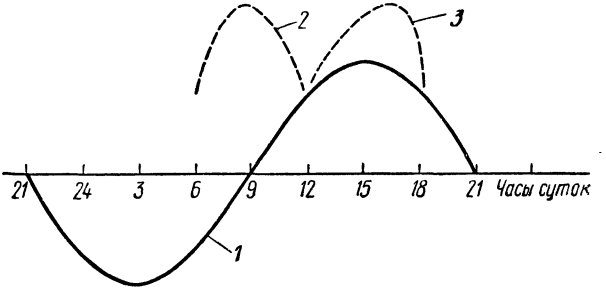


Рис. II.8. Колебания температуры наружного воздуха и теплового эффекта солнечного облучения в течение летних суток:

1 — колебания температуры наружного воздуха; *2* — тепловой эффект солнечного облучения стен, обращенных на восток; *3* — тепловой эффект солнечного облучения стен, обращенных на запад

Таблица II.1

Значения поправочных коэффициентов β для вычисления летней расчетной температуры наружного воздуха в зависимости от ориентации ограждения

Ограждения и их ориентация по странам света	Значения β
1. Легкие стены:	
обращенные на запад и юго-запад	0,1
» юг	0,15
» восток и юго-восток	0,6
2. Стены любой массивности, обращенные на север	0,5
3. Массивные стены и другие массивные конструкции при любой ориентации	0,5
4. Легкие бесчердачные покрытия (без вентилируемых воздушных прослоек) при малых уклонах	0,15

После вычисления расчетной температуры наружного воздуха, необходимо учесть дополнительное повышение температуры поверхности конструкций за счет солнечного тепла, поглощаемого этой поверхностью.

Нагрев поверхностей ограждающих конструкций происходит за счет суммарного действия прямой и рассеянной солнечной радиации *.

Прямая солнечная радиация измеряется количеством тепла, приносимым солнечными лучами, непосредственно падающими на поверхность конструкций.

Рассеянная радиация возникает за счет диффузного отражения солнечных лучей от облаков, капелек влаги и пылинок, содержащихся в приземном слое атмосферы.

Прогрев конструкций вызывается суммой тепловых воздействий прямой и рассеянной радиации или так называемой суммарной радиацией, выражающей общий тепловой эффект солнечного облучения.

Для вычисления суммарной температуры на наружной поверхности конструкции, возникающей под влиянием воздействий наружного воздуха и солнечной радиации, служит формула:

$$t_{\text{сумм}} = t'_{\text{н}} + \frac{\rho I}{\alpha_{\text{н}}} = t'_{\text{н}} + t_{\text{экв}}, \qquad \text{(II.16)}$$

где $t_{\text{н}}'$ — расчетная температура наружного воздуха в °С, вычисляемая по формуле (II.15); ρ — коэффициент поглощения солнечной радиации наружной поверхностью ограждения (безразмерный); I — интенсивность суммарной солнечной радиации, падающей на наружную поверхность рассматриваемого ограждения,

* В юго-восточных районах СССР, отличающихся сухим и жарким климатом, большое значение, кроме того, имеет радиация, отраженная от грунта и стен соседних строений. Значительная интенсивность отраженной радиации выравнивает условия прогрева стен с различной ориентацией и способствует нагреванию лучистым теплом даже стен, обращенных на север.

ккал/м²·ч; $\alpha_н$ — коэффициент теплообмена между наружной поверхностью ограждения и наружным воздухом, *ккал/м²·ч·град*.

В формуле (II.16) результат нагрева поверхности конструкций лучистым теплом выражается так называемой эквивалентной температурой, значение которой прямо пропорционально интенсивности солнечной радиации, поглощаемой поверхностью.

Эквивалентная температура зависит от положения ограждающей конструкции относительно солнца, а также от цвета и фактуры ее поверхности. Интенсивность суммарной солнечной радиации, воспринимаемой поверхностью различно ориентированных ограждений при безоблачном небе в июле и коэффициенте прозрачности 0,75, показывающем количество радиации, прошедшей через атмосферу приземного слоя, приведена для различных географических широт в табл. II.2. Здесь указано наибольшее количество солнечной радиации, среднее за сутки и разность между этими количествами (амплитуда солнечной радиации).

Кроме того, указано время дня, соответствующее наибольшему количеству солнечной радиации, падающему на поверхность конструкций, различно ориентированных по странам света.

Таблица II.2

Интенсивность наибольшей и среднесуточной суммарной солнечной радиации

Величины солнечной радиации	Интенсивность суммарной солнечной радиации, *ккал/м²·ч*, для ограждений, обращенных на:											
	юг			восток и запад			юго-восток и юго-запад			небосвод (горизонтальных)		
	при географической широте, *град*											
	40	45	55	40	45	55	40	45	55	40	45	55
Наибольшая $I_{макс}$	270	350	460	560	570	580	420	480	535	815	790	690
Среднесуточная $I_{ср}$	70	95	125	120	125	130	105	125	145	295	295	295
Амплитуда $I_{макс} - I_{ср}$	200	255	335	440	445	450	315	355	390	520	495	395
Часы дня, соответствующие наибольшей радиации	12	12	12	8 и 16	8 и 16	7 и 17	9 и 15	9 и 15	9 и 15	12	12	12

Суммарные температуры используются в теплофизических расчетах при определении затухания колебаний внешних тепловых воздействий внутри ограждающих конструкций.

Для этих расчетов необходимо знать значение амплитуды колебаний суммарных температур в течение суток, зависящее от изменений интенсивности и коэффициентов поглощения солнечной радиации.

Величины коэффициентов поглощения солнечной радиации, p указаны в табл. II.3.

Таблица II.3

Коэффициенты p поглощения тепла солнечной радиации

Наименование кровельных материалов	Коэффициент p	Наименование конструктивных и отделочных материалов	Коэффициент p
Асбестоцементные листы	0,65	Алюминий окисленный	0,5
Асфальт	0,85	Бетонные камни	0,65
Рубероид	0,88	Гипсовые плиты (белые)	0,35
Рубероид, бронированный светлым гравием	0,65	Древесина (свежая)	0,6
Толь	0,8—0,9	Кирпич красный	0,7
Шифер серебристо-серый	0,75	Кирпич силикатный (старый)	0,45
Черепица светло-красная	0,60	Плитка облицовочная (белая)	0,45
		Штукатурка светлая	0,4

Как было указано ранее, максимальные значения температуры наружного воздуха не всегда совпадают во времени с максимумами температур, вызванных действием солнечной радиации.

Поэтому амплитуду действительных (суммарных) колебаний температур на поверхности ограждений $A_{\text{расч}}$ можно установить только путем геометрического сложения амплитуд колебаний температуры наружного воздуха и теплового действия радиации.

Для этих целей сумму амплитуд колебаний температуры, вызванной поглощением солнечного тепла

$$A_{\text{экв}} = p\,\frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{н}}},$$

и колебаний температуры наружного воздуха $A_{t_{\text{н}}}$ необходимо умножить на некоторый коэффициент ψ, т. е.:

$$A_{\text{расч}} = \left[p\,\frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{н}}} + A_{t_{\text{н}}}\right]\psi^{*}. \qquad \text{(II.17)}$$

Этот коэффициент ψ зависит от длительности времени между часом наибольшего облучения конструкции и максимумом температуры наружного воздуха, наступающим в 15 *ч*.

Величины коэффициента ψ для наиболее характерного в расчетной практике соотношения амплитуд $\frac{A_{\text{экв}}}{A_{t_{\text{н}}}} = 2{,}0$, приведены в табл. II.4.

---

* Иногда в целях упрощения величину $A_{\text{расч}}$ определяют по приближенной формуле, дающей наибольшие значения из всех возможных:

$$A_{\text{расч}} = \frac{p\,(I_{\text{макс}} - I_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{н}}} + A_{t_{\text{н}}},$$

где $A_{t_{\text{н}}}$ — максимальная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха в июле, устанавливаемая в соответствии с нормами строительной климатологии.

Таблица II.4

Величины коэффициента ψ

Величины коэффициента ψ при различии времени максимумов I и $t_н$, *ч*									
1 *ч*	2 *ч*	3 *ч*	4 *ч*	5 *ч*	6 *ч*	7 *ч*	8 *ч*	9 *ч*	10 *ч*
0,99	0,97	0,94	0,90	0,85	0,79	0,73	0,66	0,60	0,55

Пример II.1. Определить расчетную амплитуду колебаний суммарной наружной температуры в Красноводске для панельных стен, обращенных на восток и запад, а также для конструкций крыши с рулонной кровлей.

Амплитуда колебаний температуры наружного воздуха $A_{t_н}=9°$ *, географическая широта 40°, коэффициент теплообмена на наружной поверхности ограждений $\alpha_н=18$ *ккал/м²·ч·град.* Амплитуда колебаний интенсивности солнечной радиации, установленная по табл. II.2, будет равна: для стен — 440 *ккал/м²·ч*, а для плоской крыши — 520 *ккал/м²·ч.*

Наибольшая температура наружного воздуха достигается в 15 *ч*, наибольшая интенсивность солнечной радиации стены, обращенной на восток, — в 8 *ч* утра; на запад — в 16 *ч* дня, крыши — в 12 *ч*. Различие времени тепловых максимумов составляет: в первом случае 7 *ч*, во втором — 1 *ч*, в третьем — 3 *ч*.

Амплитуда суммарной температуры для стены, обращенной на восток, будет:

$$A_{\text{расч}}=\left[\rho\frac{I_{\text{макс}}-I_{\text{ср}}}{\alpha_н}+A_{t_н}\right]\psi=\left(0{,}65\frac{440}{18}+9\right)0{,}73=18{,}1°,$$

где ρ — коэффициент поглощения тепла солнечной радиации поверхностью бетонных панелей, равный 0,65; $\psi=0{,}73$; установлен по табл. II.4 для различия времени тепловых максимумов, равного 7 *ч*.

Для стены, обращенной на запад, при прочих равных условиях, получим:

$$A_{\text{расч}}=\left(0{,}65\frac{440}{18}+9\right)0{,}99=24{,}9°,$$

где $\psi=0{,}99$, установлен по табл. II.4 для различия времени между максимумами, равного 1 *ч* (16 *ч* — 15 *ч*).

Для конструкции крыши

$$A_{\text{расч}}=\left(0{,}88\frac{520}{18}+9\right)0{,}94=32{,}4°,$$

где 0,88 — коэффициент поглощения тепла поверхностью рубероида;
$\psi=0{,}94$, установлен для различия времени между максимумами, равного 3 *ч* (15 *ч* — 12 *ч*).

---

* Устанавливается по нормам гл. СНиП III-А.6—72. «Строительная климатология и геофизика» как максимальная суточная амплитуда температуры воздуха в июле. При этом табличное значение уменьшается вдвое, так как в метеорологических таблицах указывается двойная амплитуда, представляющая разность между максимальными и минимальными значениями температуры.

§ 5. ВЛАЖНОСТНО-КЛИМАТИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ РАЙОНОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

В первые годы эксплуатации вновь выстроенных зданий обычно отмечается повышенное влагосодержание большинства ограждающих конструкций. В особенности это относится к конструкциям выполненным из бетонов, кирпичной кладки, древесины.

Для зданий с нормальным температурно-влажностным режимом помещений (жилые, общественные, значительная часть промышленных), это повышенное влагосодержание является избыточным, поскольку оно превышает равновесное влагосодержание, устанавливающееся через несколько лет под влиянием влагообмена с внутренней и внешней воздушной средой.

В связи с этим, в большинстве вновь выстроенных зданий значительная часть ограждающих конструкций обладает излишней влажностью и в первый период эксплуатации отдает содержащуюся в них химически не связанную влагу наружному или внутреннему воздуху.

Внешний климат непосредственным, а иногда и наиболее существенным образом влияет на равновесное влажностное состояние наружных конструкций зданий с нормальным температурно-влажностным режимом помещений, поскольку увлажняющее действие воздушной среды этих помещений не может быть значительным.

Равновесная влажность сравнимых по толщине материалу и порядку расположения отдельных слоев ограждающих конструкций таких зданий зависит от количества тепла, расходующегося в природно-климатических условиях на естественную сушку ограждающих конструкций, а также от эффективности использования этого тепла для целей естественной сушки, что связано с особенностями тепловых воздействий и режима тепло- и влагообмена между поверхностью конструкций и окружающей воздушной средой.

Для природных климатических условий характерна периодическая (в течение года) смена температур и влажности внешней воздушной среды.

Во многих климатических районах (особенно континентальных) такая периодичность внешних воздействий явно выражена и в суточном периоде, особенно в теплое и переходное время года, когда температура поверхности конструкций может резко колебаться из-за облучения солнцем в течение дня и холодного излучения ночью.

Из опыта естественной сушки ограждений зданий известно, что конструкции, периодически нагреваемые (обычно за счет солнечных лучей) и охлаждаемые, высыхают полнее и быстрее, чем подвергающиеся непрерывному и длительному нагреву при таком же расходе тепла.

Этот иссушающий эффект периодического прогрева находит объяснение в теории сушки капиллярно-пористых тел; подобный эффект тем более заметен, чем медленнее происходят в высыхаю-

щей конструкции перемещения влаги по сравнению с перераспределением тепла (т. е., чем меньше критерий Lu).

Наибольшая практическая ценность иссушающего эффекта периодического прогрева имеет место в завершающий, наиболее длительный период естественной сушки, когда поверхностные слои конструкции уже приобрели воздушно-сухое состояние и лишь по мере удаления от поверхности влагосодержание конструкции возрастет до сверхгигроскопических значений (рис. II.9).

Для этого наиболее характерного и длительного периода естественной сушки критерий Лыкова, выражающий сравнительную интенсивность распространения поля потенциала переноса влаги относительно поля температур, $Lu = \frac{a_m}{a} \ll 1{,}0$ (см. стр. 47—48), т. е. имеет значение, при котором периодические колебания температуры приводят к интенсификации перемещений влаги. Здесь

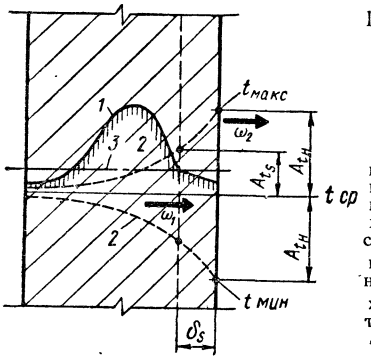


Рис. II.9. Особенности естественной сушки ограждающих конструкций при периодическом (ежесуточном) нагреве:

1 — характерное распределение влаги по толщине конструкции; *2* — периодическое распространение внутри конструкции колебаний наружной суммарной температуры; $A_{t_н}$ — амплитуда колебаний температуры на поверхности конструкций; *3* — наибольшее значение гигроскопической влажности материала (верхний предел сорбционного увлажнения); ω_1 — перемещения влаги к наружной поверхности конструкций, происходящие при понижении температуры этой поверхности до $t_{мин}$; ω_2 — испарение переместившейся влаги, происходящее при повышении температуры наружной поверхности до $t_{макс}$; δ_S — толщина быстро высыхающего слоя конструкции (слоя резких колебаний температуры); $A t_S = A t_н / 2$ — амплитуда колебаний температуры на границе быстро высыхающего слоя

a_m — интенсивность распространения потенциала переноса влаги (потенциалопроводность), a — интенсивность распространения температуры (температуропроводность).

При понижении температуры наружной поверхности, возникают перемещения влаги из внутренних увлажненных слоев конструкции, направленные к этой поверхности; при повышении температуры переместившаяся влага испаряется.

Практика эксплуатации зданий в районах с континентальным климатом, где характерны резкие колебания температур в течение суток и года, подтверждает иссушающий эффект таких циклических воздействий и связанное с ним сухое состояние ограждений зданий.

В климатических районах с меньшими колебаниями температуры влажность материалов ограждающих конструкций, при прочих равных условиях обычно более высока.

При наличии воздушно-сухого (пересохшего) поверхностного слоя испарение с поверхности конструкции ограничивается количеством влаги, диффундирующей сквозь этот пересохший слой.

Выражение для количества ε испаряющейся в этих условиях влаги при циклических колебаниях температуры наружного воздуха может быть написано в следующем виде *:

$$\varepsilon = \frac{D\tau\omega}{\delta_s}\left(\Delta\Theta + 0{,}25\,\frac{\partial^2\Theta}{\partial t^2}\,A_{t_s}\right) \text{ ед. потенц. } кг/м^2, \qquad (II.18)$$

где D — коэффициент диффузии, $м^2/ч$; τ — время, $ч$; δ_s — толщина высохшего слоя, $м$; ω — среднее количество влаги, содержащееся в материале за пределами высохшего слоя, $кг/м^3$; $\Delta\theta$ — разность потенциалов переноса влаги в толще материала на глубине распространения резких колебаний температуры и на наружной поверхности конструкции; A_{t_s} — амплитуда колебаний температуры внутри конструкции на границе высохшего слоя, °С.

Из выражения (II.18) следует, что интенсивность испарения влаги с воздушно-сухой поверхности ограждающей конструкции, подвергающейся циклическим колебаниям температуры, определяется двумя слагаемыми, одно из которых зависит от разности потенциалов переноса влаги в пределах пересохшего слоя, а второе — пропорционально квадрату амплитуды колебаний температуры внутри конструкции на границе этого слоя.

Опыт изучения влажностного состояния ограждающих конструкций в климатических районах с достаточно выраженными колебаниями температуры в течение суток и года показывает, что толщина наружного пересохшего слоя очень близка к толщине слоя, известного в строительной теплофизике под названием слоя резких температурных колебаний.

Этот последний слой составляет сравнительно небольшую часть общей толщины однородных ограждающих конструкций (в легкобетонных и кирпичных конструкциях 7—8 *см*, в конструкциях из тяжелого бетона — до 10 *см*); отличительным свойством слоя резких колебаний является то, что в его толщине внешние колебания температур затухают примерно в два раза **.

Приняв толщину пересохшего слоя равной толщине слоя резких колебаний, можно написать, что $A_{t_s} = 0{,}5\,A_{t_н}$, где $A_{t_н}$ — ампли-

---

* Выражение (II.18) получено путем совместного решения двух дифференциальных уравнений, одно из которых выражает перемещения влаги в конструкции $\frac{\partial^2\Theta}{\partial x^2} = f(x, \tau)$, а другое — устанавливает особенности перемещения влаги в поверхностном наиболее высохшем слое $\frac{\partial^2\Theta}{\partial x^2} = 0$, т. е. изменение потока влаги равно нулю. Здесь Θ — потенциал переноса влаги; x — размер по толщине конструкции; τ — время [16].

** В соответствии с теорией теплоустойчивости (см. стр. 189—190) толщина слоя резких колебаний δ_s, выраженная в $м$, определяется как отношение коэффициента теплопроводности λ материала к его коэффициенту теплоусвоения s, т. е.

$$\delta_s = \frac{\lambda}{s}, м.$$

туда колебаний температуры на наружной поверхности конструкции.

Известно, что в большинстве климатических районов естественная сушка ограждающих конструкций происходит наиболее эффективно в летний период года: климатологические данные о величине возможного испарения влаги показывают, что даже во влажном климате Англии величина испарения за один летний день примерно равна величине испарения за целый зимний месяц [32].

Поэтому при рассмотрении колебаний температуры следует принимать ее величины, характерные для летнего периода года. Средняя величина полной разности температур наружного воздуха за сутки в летний период года составляет для удаленных от океанов районов СССР 12,5—12,7°, что соответствует амплитуде (т. е. наибольшему отклонению температуры от среднего значения) $A_{t_н} = 6{,}35°$:

Эта же величина амплитуды может быть принята и для наименьших (без учета нагрева солнцем) суточных изменений температуры на наружной поверхности конструкции.

Тогда получим входящее в II.18 выражение для амплитуды колебаний температуры внутри конструкции на границе пересохшего слоя в виде

$$\frac{A_{t_s}^2}{4} = \frac{(0{,}5A_{t_н})^2}{4} = \frac{(0{,}5 \cdot 6{,}35)^2}{4} \approx \sqrt{6{,}35} = \sqrt{A_{t_н}}. \qquad (II.19)$$

Имея в виду, что интересующие проектировщиков и строителей процессы влагообмена происходят в годовом цикле величину $A_{t_н}$ уместно также отнести к этому циклу, поскольку между суточными в теплый период и годовыми (между средними температурами января и июля) колебаниями температуры может иметь место прямая зависимость, т. е.

$$A_{t_{сут}} = \psi_н A_{t_{год}}.$$

Коэффициент корреляции $\psi_н$ всегда меньше единицы; конкретные его значения изменяются для отдельных районов. Величину $\sqrt{A_{t_{год}}}$ можно рассматривать как иссушающую характеристику климата, возрастающую в континентальных условиях с резкими колебаниями температур в течение суток и года. Чем больше величина этой характеристики, тем более резко отличаются температуры летнего и зимнего периодов: теплее лето, холоднее и устойчивее зима, не перемежающаяся дождями и оттепелями, больше солнечных дней в течение года — ниже влажность наружного воздуха и соприкасающихся с ним наружных стен и других ограждающих конструкций зданий.

Обобщение данных натурных исследований влажностного состояния конструкций в зданиях с нормальной влажностью подтверждает, что иссушающее действие отмеченных климатических факторов возрастает в зависимости от величины указанной характеристики. Чем больше ее величина, тем суше материалы в

сравниваемых конструкциях. Это имеет большое значение в климатических условиях СССР, где годовая разность температур возрастает по мере перемещения от западных районов европейской части к центральным районам Восточной Сибири.

Следует отметить, что средняя годовая температура при таком перемещении не подвергается существенным изменениям для географических пунктов, расположенных на одной широте.

Для преобладающей части территории СССР (исключая крайние северные и южные районы) средняя годовая температура колеблется при перемещении с запада на восток в среднем от +5 до —4°.

Полагая среднегодовую температуру для этой части СССР равной +1° С и отбросив знаки дифференцирования получим из II.18 выражение для испарения влаги с поверхности конструкции при периодических колебаниях температуры наружного воздуха:

$$\varepsilon = \frac{D\tau\omega}{\delta_s}\left[\Delta\Theta + \frac{\Theta\sqrt{A_t}}{t^2}\right] = \varkappa\omega\left(\Delta\Theta + \Theta\sqrt{A_t}\right) \text{ кг/м}^2, \qquad \text{(II.20)}$$

где $\varkappa = \frac{D\tau}{\delta_s}$.

Для сравнимых конструкций величина $\varkappa$ в первом приближении может быть принята постоянной для любых климатических условий, поскольку с увеличением длительности сушки τ уменьшается величина коэффициента диффузии D (падающая по мере высыхания материала), и произведение $D\tau$, входящее в числитель, близко к постоянному значению. Толщина слоя резких колебаний δ_s также имеет постоянное значение, поскольку она может изменяться только в зависимости от периода температурных колебаний, а этот период остается постоянным (суточным или годичным) в любом климате.

За потенциал молекулярного переноса пара, при наличии испарения влаги с поверхности конструкции и при постоянной температуре, может быть принята относительная влажность воздуха φ. При указанных условиях потенциал переноса влаги является однозначной функцией от этой климатической величины и зависящей от нее влагосодержания материала [17].

Величину относительной влажности уместно принять для теплого периода года, когда интенсивность испарения наибольшая.

Для выявления других климатических параметров, влияющих на влажностное состояние конструкции, напишем выражение для среднего многолетнего баланса тепла между поверхностью конструкции и окружающей атмосферой в таком виде:

$$Q_s = q\gamma(p - \varepsilon) \text{ ккал/м}^2 \text{ год}, \qquad \text{(II.21)}$$

где Q_s — количество тепла, поступающего к поверхности конструкции (главным образом лучистого, т. е. солнечной радиации, поскольку конвекционное обычно теряется конструкцией, а не сообщается ей), q — сумма количеств тепла, расходуемого в соответствии с

климатом, на преодоление энергии связи влаги с поверхностью пор и капилляров материала и ее испарение, *ккал/кг·год*; при этом $q=q'(\omega_р—\omega_{равн})$, где q' — энергия связи влаги, *ккал/кг*, а $\omega_р$ и $\omega_{равн}$ — влагосодержания материала, увлажненного осадками и многолетнее равновесное; γ — вес конструкции, *кг/м²*; p — количество атмосферной влаги (осадков), увлажняющей конструкцию, *кг/кг·год*; ε — испарение при имеющихся внешних температурных воздействиях, *кг/кг·год*.

Подставляя ранее полученное выражение для испарения в (II.21), получим при единичной разности потенциалов переноса ($\Delta\theta=1$) в самом общем виде функциональную зависимость, характеризующую влажностное состояние конструкции ω в той мере, в какой она зависит от внешних климатических воздействий:

$$\omega_{(q,\omega)}=f\left(Q_s,\ p,\ \varphi\sqrt{A_t}\right). \qquad \text{(II.22)}$$

Возможно группирование этих величин в виде безразмерного соотношения, величина которого будет характерной для оценки влажностного состояния ограждающих конструкций, зависящего от климата, т. е.

$$\omega=f\frac{p\varphi q'\gamma}{Q_s\sqrt{\frac{A_{t_н}}{t^2}}}, \qquad \text{(II.23)}$$

где q' — энергия связи влаги с поверхностью пор и капилляров, *ккал/кг*; γ — вес конструкции, *кг/м²*; Q_s — количество солнечной радиации, падающей на поверхность конструкции, *ккал/м²·год*; p — количество осадков, увлажняющих конструкцию, *кг/кг·год*; φ — относительная влажность наружного воздуха (величина безразмерная); $\frac{\sqrt{A_{t_н}}}{t^2}=\frac{A_{t_s}^2}{4t^2}$ — отношение амплитуды колебаний температуры наружного воздуха к среднегодовому ее значению, *град²/град²*.

В числитель соотношения (II.23) входят величины, влияющие на повышение влажности ограждающих конструкций; осадки и относительная влажность воздуха имеют общеклиматическое значение, а энергия связи влаги с материалом и вес конструкции относятся к конкретным видам проектируемых ограждений.

При этом, если рассматривать осадки как общеклиматический фактор, уместно учитывать их количество, падающее на горизонтальную поверхность; для стен, ориентированных различным образом, количество осадков, увлажняющих конструкцию, зависит от направления и силы ветра, а также крупности дождевых капель и может быть только пропорциональным интенсивности осадков на горизонтальную поверхность.

В знаменатель входят величины, влияющие на интенсивность испарения влаги из ограждающих конструкций, а именно: солнечная

радиация и характеристика колебаний температуры наружного воздуха.

Радиация, падающая на горизонтальную поверхность, является общеклиматическим параметром; очевидно, количества солнечных лучей, падающих на различным образом ориентированные стены, будут пропорциональны этому параметру.

Таким образом, соотношение (II.23) может быть использовано как общеклиматический критерий, но возможна и конкретизация этого критерия применительно к особенностям геометрического расположения внешней поверхности отдельных ограждающих конструкций.

Общеклиматическое значение соотношения (II.23), может быть установлено путем использования имеющихся справочных метеорологических данных.

При вычислении величин соотношения (II.23) для конкретных географических пунктов, количество осадков (на горизонтальную поверхность) было принято по данным климатических справочников средним за месяц для безморозного периода года, а относительная влажность взята в дневное время (в 13 *ч* дня) самого теплого месяца.

Поскольку для изучения общих закономерностей влажностного состояния ограждающих конструкций не представлялось целесообразным иметь в виду какие-либо конкретные конструкции и материалы, величина $q'\gamma$ принята равной единице.

При этих допущениях безразмерное соотношение (II.23) примет вид

$$\omega = f\frac{p\varphi}{Q_s\sqrt{A_{t_{\text{н.год}}}}} = f(\kappa). \qquad \text{(II.23а)}$$

Указанное соотношение отражает наиболее общие закономерности влагообмена наружной части ограждающих конструкций с внешней физико-географической средой, происходящие в различных климатических условиях. На основе количественных изменений этого соотношения оказалось целесообразным разделить территории строительства на три зоны с подразделением каждой из них на две категории районов.

Эта влажностно-климатическая классификация включает следующие характеристики.

1. Сухая зона ($\kappa<5$), подразделяется на районы устойчиво-сухие ($\kappa<3$) и сухие ($\kappa=3$—5); 2. Умеренная зона ($\kappa=5$—9) подразделяется на районы умеренно-сухие ($\kappa=5$—7) и умеренно-влажные ($\kappa=7$—9); 3. Влажная зона ($\kappa>9$) подразделяется на районы влажные ($\kappa=9$—11) и устойчиво-влажные ($\kappa>11$).

Общее распределение зон и районов с различной степенью влажности по территории СССР указано на прилагаемой карте (см. карту в конце книги).

Естественно, что территория Средней Азии оказалась отнесенной к устойчиво сухим районам; низкая равновесная влажность

материалов ограждающих конструкций на этой территории позволяет широко применять для зданий с сухим внутренним режимом саман, сырец и другие материалы, недостаточно стойкие при систематических воздействиях влаги.

Выяснение условий атмосферного увлажнения ограждающих конструкций позволило отнести к устойчиво-сухим районам также некоторые территории Восточной Сибири, в частности, города Якутск и Верхоянск.

Длительная суровая зима и кратковременное, но теплое лето (при малом количестве осадков за год) обеспечивают здесь сухое состояние ограждающих конструкций, что способствует повышению долговечности древесины и применению органических утеплителей в капитальных зданиях.

Развитие грибов-разрушителей древесины почти неизвестно в устойчиво-сухих районах. При малом количестве осадков возможной конструкцией зданий являются крыши-ванны, что особенно ценно в условиях многолетнемерзлого состояния грунтов, поскольку это исключает необходимость отвода воды с крыш, не только сложного но даже опасного в таких геологических условиях.

Районы Центральной Сибири и южные территории Западной Сибири в основном относятся к сухим, что позволяет учитывать при проектировании пониженные коэффициенты теплопроводности строительных материалов и соответственное повышение теплозащиты ограждающих конструкций; это обстоятельство в условиях суровой зимы имеет большое практическое значение.

Однако особенности рельефа и их влияние на количество выпадающих осадков имеют большое значение; близко расположенные пункты оказываются существенно различающимися по влажности климата: таковы, например, умеренно-сухой климат Кузнецка и влажный прилегающей части Горной Шории.

Наиболее значительные территории влажных и устойчиво-влажных районов располагаются преимущественно на прибрежных территориях океанов и их морей. Таковы Кольский полуостров, побережье Эстонской и частично Латвийской ССР, Дальневосточное Побережье, Сахалин и особенно Курильские острова, а на юге — Западная Грузия.

В этих районах целесообразно применение для капитального строительства стойких каменных материалов, например, обжиговых керамических и, в частности, пустотелой керамики, обладающей преимуществами в отношении быстрого высыхания и ограничения перемещений атмосферной влаги внутри стен.

При этом в устойчиво влажных районах с частой повторяемостью штормовых ветров (в частности, побережье Приморского Края, Сахалина, Камчатки и тем более Курильские острова) необходимы специальные конструктивные мероприятия по защите стен от увлажнения косыми дождями (вибрированные фактурные слои, специальные облицовки и т. д.).

Кроме того, нельзя рекомендовать применение во влажных и особенно в устойчиво влажных районах конструкций сплошных

стен из медленно высыхающих материалов, например, таких как шлакобетон и золобетон. Типичным является хроническое переувлажнение таких стен, что связано с потерей ими теплозащитных свойств, сыростью и холодом в отапливаемых помещениях. Средняя влажность шлакобетонных стен во Владивостоке достигает 18% по весу, тогда как в Ленинграде и Москве она близка к 7—8%, а в городах южного Урала (сухой климат) уменьшается до 3—4%.

Особенности проектирования и строительства в различных климатических условиях достаточно очевидны, взаимосвязь этих особенностей с влажностным состоянием конструкций подтверждает целесообразность и практическое значение описанного выше зонирования.

§ 6. ПЕРЕНОС СНЕГА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА ЗДАНИЙ

Возможные в умеренно-климатических условиях планировочные решения жилых кварталов и промышленных предприятий в виде отдельно стоящих зданий различного назначения с разрывами между ними становятся нецелесообразными в условиях Крайнего Севера и других территорий с интенсивным переносом снега; в этих условиях требуется соединение отдельных зданий, нуждающихся в функциональной связи, теплыми переходами, не вызывающими дополнительных скоплений снега * или объединение в одном здании производственных и общественно-бытовых процессов различного назначения.

На территориях с интенсивным переносом снега недопустимо также решение одноэтажных промышленных зданий с многорядным расположением высоких и близко расположенных друг от друга фонарей верхнего света.

Накопление отложений снега в межфонарных пространствах может привести к резкому снижению естественной освещенности в производственных помещениях, существенным осложнениям эксплуатации зданий и даже к авариям несущих конструкций покрытий, в результате их перегрузок отложениями снега. Различные градации возможных конструктивно-планировочных вариантов зданий или соответствующие коррективы обычных решений, широко применяемых в умеренном климате, могут быть установлены только на основе изучения физико-климатических особенностей процессов переноса снега.

Применительно к этим особенностям различают три вида метеорологических явлений: 1) снегопады при относительном безветрии; 2) снегопады с ветром, приводящие к так называемым верховым метелям; 3) сильные зимние ветры, вызывающие (даже при отсутствии снегопадов) перемещения снега вблизи поверхности снежного покрова (низовые метели или поземки).

Однако при метелях любого вида общая интенсивность переноса снега в местности с плоским рельефом наиболее значительна у

---

* Например, расположенными на уровне пола 2-го этажа.

поверхности снежного покрова или на близком к ней уровне; вблизи этой поверхности суммируется перенос снега, выпадающего при снегопадах и выпавшего ранее, но увлекаемого ветром.

Наиболее опасны для одноэтажных зданий верховые метели, вызывающие снежные заносы не только на территории, прилегающей к зданиям, но и на кровлях. Количество снега, переносимого этими метелями, начиная с высоты порядка 0,5—1,0 *м* от поверхности снежного покрова и выше, остается примерно постоянным и зависит от интенсивности снегопада и скорости ветра. При этом, в открытых равнинных местностях поток снега, переносимого в горизонтальном направлении, может в несколько раз превосходить количество снежных осадков, выпадающих на поверхность почвы при безветрии.

Перенос снега при низовых метелях существенно отличается от верховых в отношении особенностей распределения потока снега по высоте.

Основная масса снега перемещается в пределах высоты 1 *м* над поверхностью снежного покрова; на большей высоте перенос снега при поземках незначителен, в связи с чем кратковременные низовые метели обычно не вызывают нежелательных снегоотложений на кровлях зданий. При длительно продолжающихся низовых метелях отложения снега у зданий достигают значительной высоты и создают возможность распространения процессов переноса на кровли малоэтажных зданий.

Непродолжительные или редко повторяющиеся поземки чаще всего приводят к заносам территории, прилегающей к зданиям; этот вид переноса снега наиболее опасен для дорог и путевых сооружений. Препятствиями для поземок служат любые складки местности, выемки, насыпи, древесные насаждения, в зоне которых отлагается часть переносимого снега.

При снежном покрове, состоящем из сухого мелкокристаллического снега, низовой перенос возникает уже при скорости ветра у поверхности снежного покрова порядка 5—6 *м/сек*, а при 10 *м/сек* явления переноса становятся массовыми.

Если поверхность снежного покрова скована настом, что неизбежно, например, при морозах после оттепелей, передувание снега почти исключается. Поэтому низовые метели (поземки) более редки в районах с неустойчивой зимой и частыми оттепелями.

Наибольшая вероятность возникновения поземок отмечается на равнинных территориях, покрытых сухим пылевидным снегом; это особенно характерно для районов с суровой или, по крайней мере, устойчивой зимой, свойственной континентальному климату *.

---

* Закономерности образования кристаллов снега из переохлажденной воды такие же, как и для возникновения кристаллов любого вещества при пересыщении водных растворов, связанном с понижением температуры. Размеры кристаллов зависят от величины такого пересыщения, достигающего наибольших значений при низких температурах наружного воздуха. Чем больше пересыщение, тем меньше образующиеся кристаллы, т. е. имеет место обратная пропорциональность, описываемая экспоненциальным уравнением Кельвина, связывающим величины

Таковы, в частности, южные территории Западной Сибири, Приуралья, Северного Казахстана, где для зимних условий характерна относительная сухость воздуха и сочетание устойчивых низких температур с часто повторяющимися сильными ветрами. Для этих и аналогичных им по зимним условиям климатических районов характерно преобладание низовых метелей по сравнению с повторяемостью других метеорологических процессов, вызывающих перенос снега.

Эмпирическую зависимость интенсивности переноса q от скорости ветра, обычно выражаемую в $м^3/м \cdot ч$, многие исследователи устанавливают в виде кубической параболы, т. е.:

$$q = \kappa v^3 \ м^3/м \cdot ч, \qquad \text{(II.24)}$$

где κ — некоторый эмпирический коэффициент; v — скорость ветра, $м/сек$ [34].

В связи с недостаточной изученностью особенностей переноса можно считать вероятным, что значения эмпирического коэффициента, входящего в кубическую зависимость, могут изменяться в связи с характером метелей, рельефом местности, физико-механическими свойствами снега и другими местными причинами.

В соответствии с имеющимися экспериментальными данными для восточных районов европейской части СССР и Западной Си-

---

пересыщения $\left(\frac{p_r}{p_s}\right.$, где p_r — насыщающее давление на поверхности зародыша кристалла с радиусом r; p_s — насыщающее давление над плоской поверхностью) с радиусом возникающих кристаллов:

$$\frac{p_r}{p_s} = e^{\frac{2\delta}{r} \cdot \frac{v_ж}{RT}} = e^{\frac{1{,}08 \cdot 10^{-7}}{r}} = e^{\frac{r_0}{r}}.$$

Здесь величина $\frac{v_ж}{RT}$ — обратна характеристическому молекулярному давлению воды; величина $2\delta \frac{v_ж}{RT} = 1{,}08 \cdot 10^{-7} = r_0$ имеет линейную размерность $см$, и равна для воды около 10 $\AA$. Рассматриваемая экспоненциальная зависимость может быть выражена, по П. А. Ребиндеру, через два безразмерных критерия: пересыщение (p_r/p_s) и отношение предельного и действительного радиусов кристалла (r_0/r). При характерных для атмосферных условий невысоких пересыщениях всегда $r \gg r_0$ и значение x экспоненциальной функции e^x никогда не превышает единицы. В этом случае значения e^x близки к $1+x$, что позволяет привести экспоненциальную зависимость к зависимости гиперболического вида:

$$\frac{p_r}{p_s} = 1 + \frac{r_0}{r}; \qquad \frac{p_r - p_s}{p_s} = \frac{r_0}{r}.$$

Эта зависимость показывает, что при переохлаждениях и пересыщениях, характерных для низких зимних температур северных и восточных районов СССР, образуются кристаллы снега, размеры которых выражаются в микронах. Снежинки утрачивают внешний вид, обычный для умеренных климатических условий, и превращаются в снежную пыль, еще более измельчаемую ветром, легко переносимую и проникающую сквозь мельчайшие трещины, зазоры и неплотности в ограждающих конструкциях зданий.

бири величина этого коэффициента близка к 0,00046. Однако экспериментальные данные по Крайнему Северу (Норильск) показывают, что в этих районах величина эмпирического коэффициента существенно выше, что по-видимому, может быть объяснено преобладанием верховых метелей над низовыми и плоским рельефом громадных территорий тундры, являющихся снегосборными площадями.

Экспериментальные данные показывают, что до определенной скорости ветра рост действительной интенсивности переноса несколько превосходит величины, вычисленные по указанной приближенной формуле, а при дальнейшем повышении скорости отмечается существенное отклонение от этой ориентировочной зависимости в меньшую сторону, что может быть объяснено, в частности, процессами турбулизации ветровых струй.

Для практических целей весьма важно суммарное количество снега, переносимого или отлагаемого у препятствий в течение всего холодного периода года. Для расчетов такого количества снега необходимо знать продолжительность метелей τ в течение всей зимы.

Объем снега Q, переносимого за суммарную продолжительность метелей (τ, *ч*), в течение всего холодного периода года может быть вычислен по формуле:

$$Q = q_{\text{ср}}\tau \ м^3/пог.\ м, \qquad (II.25)$$

где $q_{\text{ср}}$ — средняя приведенная интенсивность переноса.

Приближенно считают, что если такой общий объем снега, переносимого за зиму, превышает 200 *м*^{3}/*пог. м*, условия переноса становятся неблагоприятными для эксплуатации дорог и территории, прилегающей к зданиям, в связи с чем возникает необходимость применения специальных мероприятий по ограничению отложений снега.

На территории СССР Главной геофизической обсерваторией установлены районы с различной интенсивностью переноса, изменяющейся от 200 до 1500 *м*^{3}/*пог. м·год* [33].

Величины переноса 200 *м*^{3}/*пог. м·год* и более отмечаются для Севера европейской части СССР (севернее 60° географической широты), достигая величины 600—1000 *м*^{3}/*пог. м·год* в крайних северных и северо-восточных районах (Кольский полуостров, Архангельск, Воркута и другие местности).

Перенос снега порядка 200 *м*^{3}/*пог. м·год* (по-видимому происходящий преимущественно за счет низовых метелей) характерен для Калмыцких степей и Среднего Заволжья.

Южный Урал, Северный Казахстан, южная часть Западной Сибири, районы, прилегающие к Алтаю, характеризуются переносом снега от 200 до 600 *м*^{3}/*пог. м·год*.

Такие объемы переноса снега характерны, например, для Барнаула, где они приводят к повторяющимся заносам межфонарных пространств на кровлях одноэтажных производственных зданий, в частности, шедовых фонарей здания текстильного комбината.

В районах Крайнего Севера азиатской части СССР отмечается интенсивность переноса от 600 до 1000 *м³/пог. м·год* и более.

При таких объемах переносимого снега процессы его переноса приобретают характер часто повторяющихся стихийных бедствий и требуют больших усилий и затрат для возможного предупреждения и ограничения их нежелательных результатов.

Вообще вся громадная территория азиатской части СССР (за исключением штилевых районов Центральной и Восточной Сибири) неблагополучна в отношении процессов переноса снега, суммарная интенсивность которых превосходит 200 *м³/пог. м·год*, а в отдельных районах (Северный Сахалин, Камчатский полуостров и т. д.) достигает величины до 1000 *м³/пог. м·год* и более.

Строительство, развивающееся из года в год на этой территории, нуждается в снегозащитных мероприятиях, осуществляемых путем устройства преград, ограничивающих интенсивность переноса снега (лесозащитные полосы, решетчатые заборы и т. д.) путем применения специальных приемов планировки жилых кварталов и промышленных территорий, а также повышения аэродинамических качеств зданий.

Такие мероприятия могут существенно влиять на особенности отложений снега на территории застройки и непосредственно у зданий.

Основной причиной отложений снега у любых препятствий является потеря скорости снего-ветровым потоком, в связи с чем часть переносимых им взвешенных частиц выпадает.

Количество снега, выпадающего в зоне препятствия Δq, можно определить как разницу в интенсивностях переноса взвешенных частиц невозмущенным ветровым потоком (имеющим полевую скорость v_1) и потоком, уменьшившим скорость в зоне препятствия до величины v_2, т. е.

$$\Delta q = q_1 - q_2 \qquad \text{(II.26)}$$

или с учетом (II.24)

$$\Delta q = \kappa \left(v_1^3 - v_2^3\right) \text{ кг/м·ч или } \text{м}^3/\text{м·ч}, \qquad \text{(II.27)}$$

где q_1, q_2 — интенсивности переноса до препятствия и в его зоне; v_1 — полевая скорость переноса; v_2 — скорость, уменьшенная в зоне препятствия.

Таким образом, количество снега, выпадающего в зоне препятствия, зависит от аэродинамических свойств последнего.

Здания обычной формы представляют собой параллелепипеды, аэродинамические свойства которых являются довольно определенными и в некоторой мере претерпевают изменения только за счет различия геометрических размеров, т. е. высоты, длины и ширины. При направлении ветра, нормальном к фасаду здания (или близком к этому направлению), отложения снега возникают перед наветренным фасадом, на некотором от него расстоянии (рис. II.10).

Если перенос снега вызывается низовыми метелями, то такие снегообразования в начальный период их количественного форми-

рования являются основными, поскольку снег в незначительном количестве переносится через здание и отложения со стороны подветренного фасада сравнительно невелики.

При верховых метелях они возрастают и, кроме того, возникают отложения на кровле здания, становящиеся все более значительными по мере увеличения его ширины.

Наиболее нежелательны и опасны отложения снега на кровлях одноэтажных промышленных зданий с несколькими рядами фонарей верхнего света. Такие здания обладают плохой обтекаемостью для снего-ветрового потока; межфонарные пространства являются причиной вихреобразований, снижения скорости и отложений снега.

Наиболее устойчивы вихреобразования, а следовательно, наиболее вероятны отложения снега в межфонарных пространствах при малом расстоянии между фонарями (когда средняя ширина енловы превышает высоту фонаря менее чем в два раза).

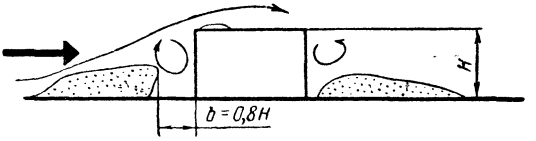


Рис. II.10. Снегоотложения у здания при переносе снега ветром

Непосредственно перед наветренным фасадом здания возникает зона выдувания снега из-за образования вихревых перемещений воздуха, трансформирующихся в восходящий поток, обладающий значительной скоростью при большой высоте здания.

Ширина зоны выдувания b зависит от высоты здания H и некоторые исследователи [35] оценивают ее, как $b=0{,}8\ H$. Размеры здания в плане также влияют на особенности распределения отложений; при относительно малой длине фасадов, параллельных снего-ветровому потоку, вся эта длина может быть занята отложениями снега; при относительно большей длине часть фасада свободна от отложений снега (рис. II.11) и достаточно удобна для расположения входов в здание. Располагать последние по наветренному фасаду (даже при наличии зоны выдувания снега) нецелесообразно, поскольку такое расположение связано с существенным увеличением теплопотерь здания.

Если аэродинамические свойства препятствия таковы, что непосредственно перед ним струи снего-ветрового потока сжимаются таким образом, что происходит увеличение скорости и лишь на последующих участках пути ее падение, то вблизи препятствия не возникает никаких отложений снега; он выпадает уже сравнительно далеко за препятствием, там где скорость снего-ветрового потока уменьшается.

Преграды с такими аэродинамическими свойствами используются для защиты транспортных путей и дорог в районах с большой интенсивностью переноса снега (рис. II.12, а).

Выполнение зданий с отсутствием цокольного этажа или высоким продуваемым подпольем может способствовать увеличению скорости снего-ветрового потока под зданием и удалению от него зоны отложений снега (рис. II. 12, б). Такое решение целесообразно в районах Крайнего Севера с большой интенсивностью перено-

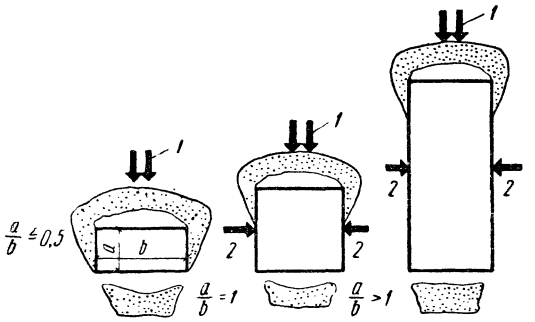


Рис. II.11. Характер отложений снега у зданий с различным соотношением длины и ширины:
1 — направление снего-ветрового потока; *2* — входы в здание

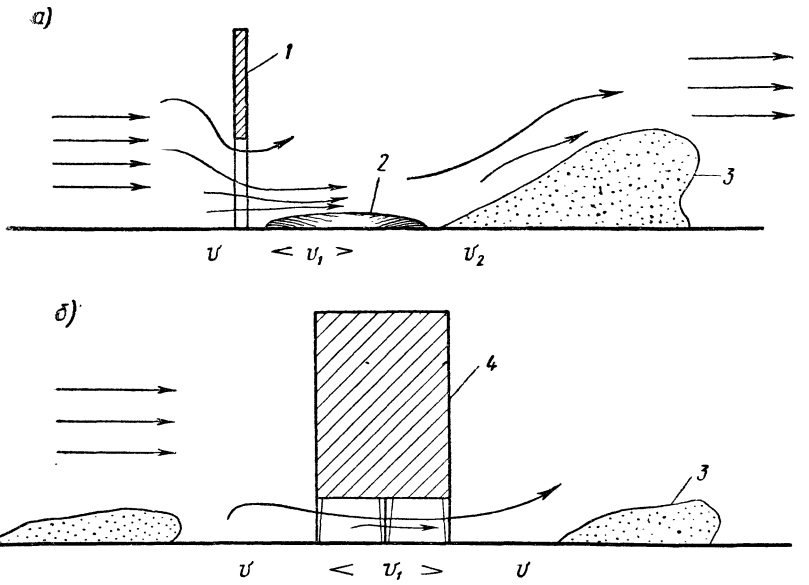


Рис. II.12. Перемещение отложений снега в зоны, удаленные от преграды, увеличивающей скорость снего-ветрового потока:

а **— защита транспортных проездов на территории промышленных предприятий от отложений снега;** *1* **— защитная преграда, вызывающая передувание снега ветром;** *2* **— полотно транспортного проезда;** *3* **— отложения снега;** *б* **— защита территории, непосредственно прилегающей к зданию, от отложений снега;** *4* **— здание с отсутствием цокольного этажа или высоким вентилируемым подпольем;** *v*, v_1, v_2 **— скорости снего-ветрового потока**

са снега и многолетнемерзлым состоянием грунтов, для сохранения которого, однако, требуется утепление поверхности грунта под зданием и устройство проветривания с целью устранить оттаивание почвы вследствие притока тепла из отапливаемого здания.

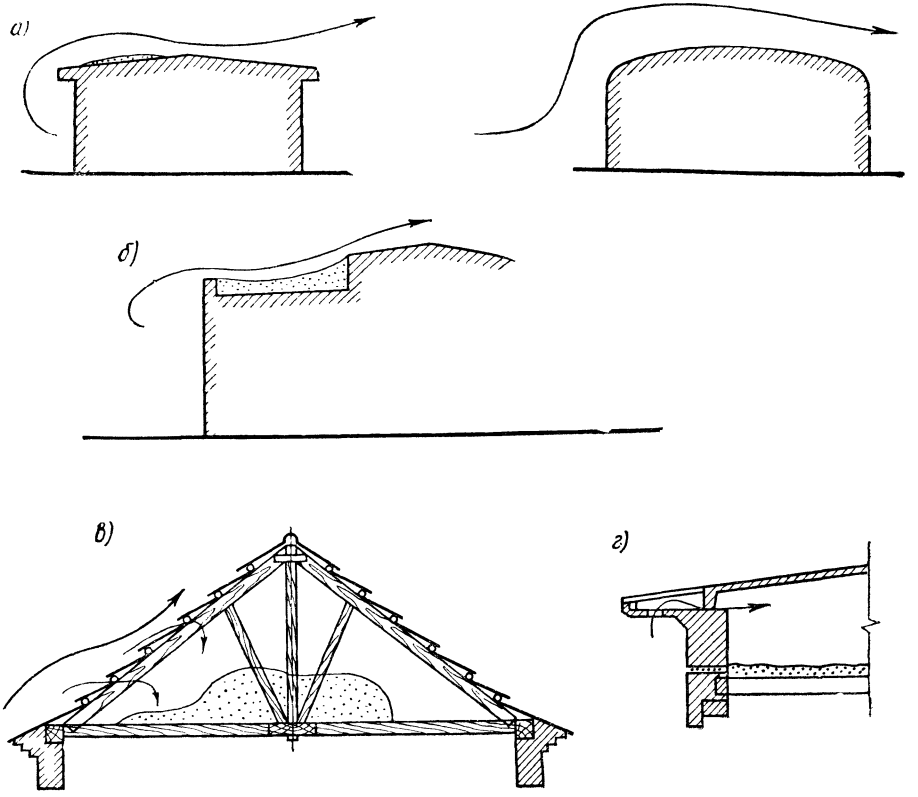


Рис. II.13. Особенности решения профиля и ограждающих конструкций зданий в районах с большой интенсивностью переноса снега:

а — малые уклоны и обтекаемая форма крыш способствуют сдуванию с них сухого, мелкого снега; *б* — перепады высот здания вызывают отложения снега; *в* — кровли с большими уклонами, выполненные из штучных материалов, способствуют отложению снега в чердачных пространствах; *г* — проветривание чердаков через буферные пространства способствует устранению отложений снега

Описанный аэродинамический эффект характерен только для отдельно стоящих зданий и может быть существенно искажен в тех случаях, когда здание защищено окружающими его постройками, складками местности или древесными насаждениями.

В районах с значительной интенсивностью переноса снега важна аэродинамическая обтекаемость проектируемых и возводимых зданий.

Крыши желательны простейшей формы с малыми уклонами без разжелобков, выступающих частей и парапетов (рис. II.13, *а*). Це-

лесообразны хорошо утепленные конструкции покрытий, обеспечивающие отсутствие подтаивания снега на отдельных участках конструкции.

В этом же смысле рациональны те виды остекления верхнего света, которые обладают достаточными теплозащитными свойствами, в результате чего на наружной поверхности стекла сохраняется отрицательная температура.

На таких крышах сухой мелкий снег, характерный для рассматриваемых районов, не задерживается и сносится ветром.

Профили зданий желательны наиболее обтекаемой формы, без перепадов высот и каких-либо выступающих элементов (см. рис. II. 13, *б*).

Фонари верхнего света нежелательны, а при многорядном их расположении — совершенно недопустимы, поскольку межфонарные пространства будут заноситься снегом, вровень с наиболее высокой частью фонарей.

Лоджии и другие впадины на фасадах зданий немедленно заносятся, превращаясь в бункера, заполненные уплотненным снегом.

Нецелесообразны кровли из штучных материалов (волнистых асбестоцементных листов, черепицы и т. д.) с значительными уклонами, приводящие к отложениям снега в чердачных пространствах и повышению ветровых нагрузок на конструкции крыш (рис. II.13, *в*).

Проветривание чердачных пространств целесообразно организовывать так, чтобы оно не вызывало существенных отложений снега (рис. II.13, *г*).

ГЛАВА III

МИКРОКЛИМАТ ПОМЕЩЕНИЙ

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПО ОСОБЕННОСТЯМ МИКРОКЛИМАТА

Основными показателями микроклимата помещений являются: температура в характерных зонах помещений и на поверхностях конструкций, ограждающих эти зоны от внешней среды, влажность и гигиеническое состояние внутреннего воздуха, наличие или отсутствие агрессивных воздействий на ограждения.

Характер агрессивных воздействий обычно связан не только с присутствием химических веществ, но и с температурно-влажностным состоянием воздушной среды, граничащей с конструкциями, и изменениями этого состояния.

Температура и влажность, их максимальные и минимальные расчетные значения, колебания и изменения в связи с периодами года или особенностями процессов, происходящих в помещениях, являются важнейшими факторами, влияющими на пребывающих в помещении людей, а также на условия эксплуатации ограждающих конструкций.

В процессе проектирования обычно приходится пользоваться обобщенными и осредненными данными о температурно-влажностном состоянии помещений.

При этом, такие данные часто отражают гигиенические требования, относящиеся к нижней рабочей зоне, а микроклимат верхней зоны высоких помещений, существенно отличающийся от этих данных, остается неучтенным при разработке проекта.

В качестве первичных исходных данных для характеристики вероятного температурно-влажностного состояния проектируемых помещений, часто принимают количество тепла и влаги, поступающих во внутренний воздух во время эксплуатации.

Располагая, кроме того, сведениями об интенсивности воздухообмена в различные периоды года в характерных зонах рассматриваемых помещений и установив необходимые теплозащитные свойства ограждений, можно судить о порядке значений температуры и влажности внутреннего воздуха в этих зонах.

Известны различные классификации помещений по интенсивности выделений тепла; обычно такие классификации относятся к производственным помещениям определенной отрасли промышленности.

Для самых общих представлений о градациях выделений тепла в проектируемых зданиях может быть предложена классификация, указанная в табл. III.1.

Таблица III.1

Характеристика тепловыделений

Градации выделений тепла	Величина выделений тепла, *ккал/м³·ч*	Примеры помещений
Незначительные	До 20	Нормальные отапливаемые здания и помещения
Значительные (ощутимые)	20—50	Машинные залы ТЭЦ, сварочные цехи
Большие (обычно превышающие в 2—3 раза потери тепла через ограждения зданий)	50—100	Крупные кузнечные цехи, чугунолитейные и фасонолитейные пролеты с емкостью печей 100 *т*
Очень большие	100—200	Плавильный и разливочный пролеты крупных мартеновских электросталеплавильных, конвертерных цехов: При емкости мартеновских печей от 100 до 400 *т*, электросталеплавильных 80 *т*, конвертеров от 10 до 30 *т*
Исключительно большие (последние две градации имеют место в отдельных пролетах и участках цехов черной металлургии)	Более 200	Плавильный и разливочный пролеты крупных мартеновских электросталеплавильных, конвертерных цехов: При емкости мартеновских печей от 450 до 900 *т*, электросталеплавильных 180 *т*, конвертеров 40 *т* и более. Литейные дворы и поддоменники современных доменных печей

Классификация эта предусматривает преимущественно производственные здания, поскольку в них выделения тепла дифференцированы и значительны.

Преобладающее большинство гражданских зданий (жилые, административные, школьные и т. д.) относится (в соответствии с этой классификацией) к категории с незначительными выделениями тепла и требует нормального отопления. В холодный период года естественная вентиляция отапливаемых зданий ограничивается в целях экономии топлива и тепла нижним пределом гигиенических норм, определяющим необходимую минимальную кратность воздухообмена * (обычно не более одного-двух воздухообменов в час).

Кратность естественного воздухообмена в летний период года должна существенно повышаться (в целях обеспечения гигиенических условий пребывания людей в помещениях), для чего при проектировании общественных и производственных зданий требуется обеспечить достаточную площадь створных переплетов: для прито-

* Под кратностью воздухообмена n понимается отношение объема воздуха, поступающего в помещение в течение часа, $V/ч$, к объему (кубатуре) помещения V_0, т. е. $n=V/rV_0$; n имеет физическую размерность $1/ч$.

ка свежего воздуха — в нижней части фасадов наименее облучаемых солнцем; для удаления загрязненного — в верхней части здания. Кроме того, для нешироких, в частности, многоэтажных зданий в теплом климате необходимо сквозное проветривание помещений.

Кратность организованного и управляемого естественного воздухообмена (аэрации) в производственных зданиях с избыточными выделениями тепла (т. е. превышающими расчетные потери тепла), в холодный период года много выше, чем в гражданских зданиях, а в теплый период — достигает нескольких десятков обменов в час.

Повышенная кратность естественной вентиляции таких зданий в холодный период года приводит к большой неравномерности распределения температур в объеме помещений, что является совершенно нежелательным в гигиеническом отношении: неравномерность распределения температур в некоторой мере может быть ограничена целесообразным размещением приточных и вытяжных отверстий.

В любых производственных зданиях, створные переплеты для притока воздуха (в холодный период года) располагают выше рабочей зоны с тем, чтобы ослабить ее охлаждение струями холодного воздуха; а отверстия для вытяжки — в самой высокой части здания.

В помещениях с выделениями влаги приток наружного воздуха в холодный период года резко ограничивается или исключается совершенно (с заменой его подачей подогретого воздуха путем механической вентиляции), в целях предупреждения образования тумана в помещениях и конденсации влаги на поверхностях ограждений.

Наиболее значительные выделения влаги свойственны главным образом производственным и некоторым коммунальным зданиям; классификация выделений влаги приведена в табл. III.2.

Однако данные о градациях выделений тепла и влаги совершен-

Таблица III.2

Характеристика влаговыделений

Градации выделений влаги	Величина выделений влаги при нормальной температуре (15—20°) $г/м^2 \cdot ч$	Примеры помещений
Незначительные	До 2	Жилые и административные помещения; сборочные цехи
Малые	До 5	Цехи станочной обработки металла, с охлаждением его эмульсией
Значительные (ощутимые)	6—20	Никелировочные, помещения гидравлических испытаний
Большие	21—50	Цехи электролиза меди и никеля, отделения флотации
Очень большие	Более 50	Мокрые цехи кожевенных заводов, участки и цехи мокрого крашения тканей; помещения бань

но недостаточны для получения определенных представлений о значениях температуры и влажности воздуха в рассматриваемых помещениях.

Помимо кратности общего воздухообмена, которая может изменяться в существенных пределах, большое влияние на температуру и влажность воздуха имеют расположение в плане и объеме помещения источников выделений тепла и влаги, а также особенности распространения последних по зданию или комплексу смежных неизолированных помещений. При этом конвективное распространение тепла и перенос влаги связаны с неравномерным распределением давлений в отдельных зонах помещений и с естественными токами воздуха, направленными в сторону меньших давлений, но ограниченными в своем распространении поверхностями, ограждающими помещения.

Основными показателями, влияющими на условия пребывания человека в помещении и особенности эксплуатации конструкций, ограждающих это помещение, являются:

а) средняя температура воздуха в помещении и ее колебания в течение суток (при большой высоте помещения рассматривается отдельно температура рабочей и верхней зоны);

б) осредненная температура всех поверхностей, ограничивающих помещение;

в) влажность и гигиеническое состояние воздуха в помещении (или его отдельных зонах).

Некоторое значение имеет скорость движения воздуха в помещении, но гигиенические нормы ограничивают ее в холодный период весьма малыми допустимыми пределами; влияние движущегося воздуха важно в гигиеническом отношении главным образом в летнее время года, при перегреве помещений, не имеющих искусственного (например, радиационного) охлаждения.

Кроме того, для теплового и влажностного состояний ограждающих конструкций и даже сроков их службы важно отсутствие или наличие в помещении агрессивных, в особенности гигроскопических примесей, влияющих на условия конденсации влаги.

Если в зимнее время на поверхности ограждений, обращенной в отапливаемое помещение, не происходит систематической или периодической конденсации влаги, условия эксплуатации конструкций обычно близки к нормальным и сроки их службы достаточно длительны.

Осредненная температура поверхностей, ограничивающих помещение (радиационная температура), имеет важнейшее гигиеническое значение, поскольку превалирующая часть потерь тепла человеческим организмом, происходящая путем излучения (примерно от 45 до 60% суммарных теплопотерь) *, обусловлена более низкой температурой поверхностей помещения.

---

* В холодный период года в отапливаемых помещениях с излишней площадью остекленных поверхностей лучистая составляющая теплопотерь человеческого организма возрастает еще более.

Осредненная температура этих поверхностей:

$$t_{\text{п.ср}} = \frac{t_{\text{п}1}F_1 t_{\text{п}2}F_2 \ldots}{\Sigma F}, \qquad \text{(III.1)}$$

где $t_{\text{п}}$ и $F\ldots$ — температура и площадь отдельных видов ограждений; ΣF — сумма площадей всех ограждений.

В тех случаях, когда передача тепла в помещение происходит только путем излучения (например, инсоляция через оконные проемы в теплый период года) и воздухообмен в помещении отсутствует, температура воздуха $t_{\text{вз}}$ равна осредненной температуре поверхностей, т. е. радиационной температуре:

$$t_{\text{вз}} = t_{\text{п.ср}}. \qquad \text{(III.2)}$$

Если считать, что в холодный период года в помещениях с нормальными условиями теплообмена потери тепла человеческим организмом происходят в равной степени путем излучения и путем

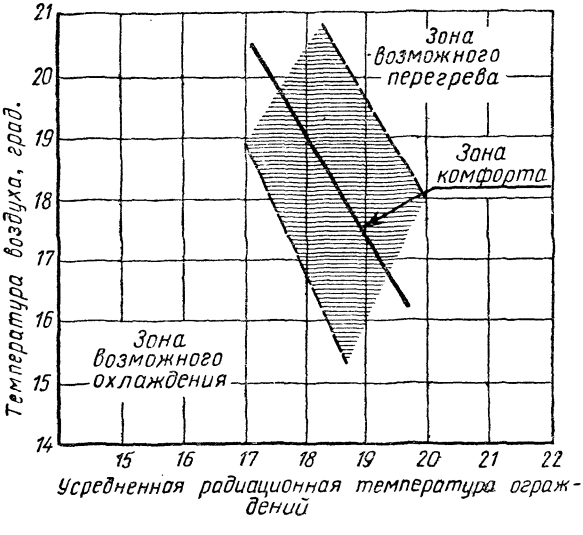


Рис. III.1. Область температур, обеспечивающая комфортное тепловое состояние человека в отапливаемом помещении (по данным Н. А. Пономаревой)

конвекции (при соприкосновении поверхности одежды или кожи движущимся воздухом), то температуру помещения можно принять равной полусумме температур $t_{\text{вз}}$ и $t_{\text{п.ср}}$. Эту полусумму температур называют иногда результативной температурой помещения:

$$t_{\text{р.п}} = 0{,}5(t_{\text{вз}} + t_{\text{п.ср}}). \qquad \text{(III.3)}$$

При понижении радиационной температуры $t_{п.ср}$ температура воздуха $t_{вз}$ должна быть повышена для обеспечения комфортных условий для человека; наоборот, при повышении радиационной температуры, температура воздуха может или должна быть снижена.

Таковы результаты, полученные многими исследователями, как отечественными, так и зарубежными. Характерные в этом отношении данные для условий комфортного пребывания человека в отапливаемом помещении, приведены на рис. III.1.

Эти условия зависят от характера работы, выполняемой человеком, индивидуальных особенностей его организма и местного климата. Поэтому допустимые отклонения от оптимальных данных, приведенных отдельными исследователями, могут достигать $\pm 1{,}5°$ и даже более.

На рисунке область таких допустимых отклонений заштрихована.

В наиболее холодные периоды зимы у оконного остекления жилых и общественных зданий температура понижается на несколько градусов, а скорость охлажденных воздушных струй на уровне подоконника составляет около 0,3 *м/сек* (при высоте остекления до 2,0 *м*).

Происходящее нарушение комфортных условий заставляет думать об активизации восходящих тепловых струй от отопительных приборов, размещенных под окнами, а в местностях с суровой зимой, кроме того, о применении тройного остекления в тех общественных зданиях, где гигиенические требования наиболее высоки, а места постоянного пребывания людей расположены непосредственно у окон (школы, больницы, детские учреждения).

В жаркий период года, при вероятности перегрева помещений, для человека в легкой одежде, пребывающего в спокойном состоянии, допустимым пределом температуры помещения (по данным советских исследователей) является 28°, а по зарубежным данным — до 30°.

На рис. III.2 приведена номограмма для определения зоны комфорта в летних условиях, разработанная Американской ассоциацией инженеров по отоплению и вентиляции.

Комплексное влияние факторов микроклимата выражено на этом рисунке эффективной температурой, значение которой соответствует температуре неподвижного насыщенного воздуха, вызывающего у человека тепловое ощущение, аналогичное тому, которое он испытывает в рассматриваемой воздушной среде.

Условия, приведенные на рисунке, соответствуют равенству температур воздуха и радиационной температуры поверхностей, ограждающих помещение; скорость движения воздуха незначительна (до 0,12 *м/сек*).

С повышением радиационной температуры и интенсивности излучения поверхностью ограждающих конструкций гигиенически допустимая температура воздуха помещения снижается. Изменение радиационной температуры на 1° примерно соответствует изменению эффективной температуры на 0,5°.

Предельно допустимая (по гигиеническим требованиям) температура поверхностей ограждающих конструкций $t_{пов}^{макс}$ зависит от высоты помещения. Для определения такой температуры (при отсутствии заметного движения воздуха в помещении) В. Н. Богословским из условий допустимого облучения головы человека предложена формула

$$t_{пов}^{макс} \leqslant 19{,}2 + \frac{8{,}7}{\psi} \; град, \qquad (III.4)$$

где коэффициент углового излучения $\psi \approx 1 - 0{,}8\,\frac{\Delta h}{l}$; Δh — превышение высоты помещения по сравнению с ростом человека, *м*;

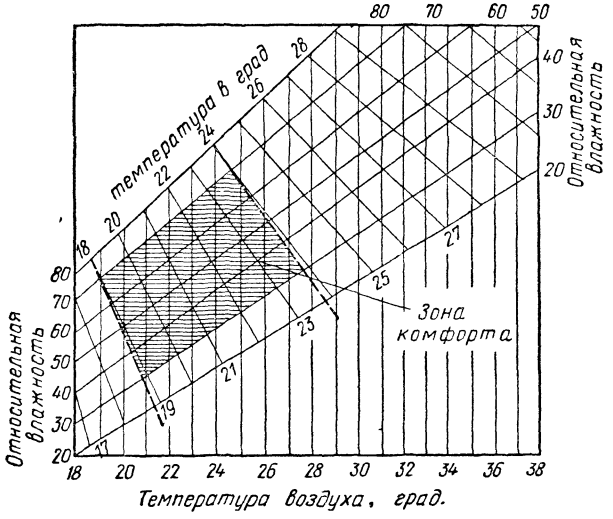


Рис. III.2. Номограмма для определения эффективных температур в летнее время года

$$l = \frac{a + b}{2},$$

где a и b — ширина и длина излучающих поверхностей, *м*.

Если за излучающие поверхности принять наружные стены типичного по площади жилого углового помещения в промежуточном этаже многоэтажного здания $\left(l = \frac{6+3}{2} = 4{,}5\right)$, то при $\Delta h = 0{,}5$ *м* $t_{пов}^{макс} = 28{,}8°$, а при $\Delta h = 1{,}5$ *м* $t_{пов}^{макс} = 31°$.

В действительности влияние высоты помещения будет еще более значительным, поскольку при ее увеличении активизируются конвекционные токи воздуха.

В связи с этим, предельное ограничение высоты жилых помещений, допустимое в мягком умеренном климате, гигиенически нецелесообразно в крайних южных районах.

При проектировании ограждающих конструкций необходимо обеспечить требуемые нормами для рабочей зоны данного помещения температуру и влажность воздушной среды.

Установленные нормами значения температуры внутреннего воздуха можно подразделить на три категории.

1. Пониженная температура (8—12°), допустимая в слабо отапливаемых помещениях, по условиям производственной обстановки.

2. Нормальная температура, равная:

а) 12—15° — для помещений, где люди заняты работой, требующей затраты физических усилий; б) 18—20° — для помещений, где находятся люди в малоподвижном состоянии, не требующем физического напряжения.

3. Повышенная температура (21—23°), необходимая при легкой одежде и точной работе, не связанной с физическими усилиями.

В качестве основного показателя влажности внутреннего воздуха принимается относительная влажность φ, выраженная в процентах от полного насыщения воздушной среды.

Различают следующие градации относительной влажности φ: 1) низкая влажность (менее 50%), соответствующая сухим помещениям; 2) нормальная влажность (от 50 до 60%) в помещениях с нормальной влажностью; 3) повышенная влажность (61—75%), соответствующая влажным помещениям; 4) высокая влажность (более 75%), соответствующая помещениям с мокрым режимом, в которых обычно неизбежна в холодный период года конденсация влаги на ограждающих поверхностях.

От величины относительной влажности воздуха и степени утепленности ограждений зависит возможность образования капельной влаги на поверхности этих конструкций, обращенной в помещение, а также возможность конденсации влаги в порах и капиллярах материала.

Такие виды увлажнения ограждающих конструкций наиболее опасны в отношении потери ими теплозащитных свойств и возможной активизации разрушения наименее стойких конструктивных элементов.

Для количественного изучения этих увлажняющих процессов, а также для расчета диффузии водяного пара, направленной из помещения наружу (и вызываемой разностью парциальных давлений водяного пара во внутренней и наружной воздушных средах), необходима классификация температурно-влажностного состояния помещений, основанная на характерных значениях как температуры, так и относительной влажности внутреннего воздуха. Только совместное рассмотрение температуры и относительной влажности позволяет установить количество влаги, конденсирующееся на поверхности конструкции, при охлаждении ее до температуры, соответствующей точке росы, а также рассчитать количественный эффект процесса перемещений влаги внутри конструкции. Эффективность процесса диффузии водяного пара и количество влаги, конденсирующейся в результате этого процесса, внутри охлажден-

Таблица III.3

Классификация температурно-влажностного состояния помещений

Характеристика помещений	Параметры внутреннего воздуха			Примеры характерных помещений
	Температура, °С	Влажность		
		относительная, %	парциальное давление, *мм рт. ст.*	
Помещения сухие с температурой:				
пониженной	8—12	Менее 50	Менее 4,6	Сварочные цехи и отделения
нормальной	15—21		Менее 8,8	Термические отделения
повышенной	Выше 21		Более 8,8	Машинные залы ТЭЦ, жилые помещения в суровом климате
Помещения с нормальной влажностью и температурой:				
пониженной	8—12	50—60	3,3—5,5	Цехи металлических конструкций и металлозаготовительные
нормальной	15—21		4,6—10,5	Помещения жилых и общественных зданий в умеренном климате, механические, инструментальные цехи
повышенной	Выше 21	50—60	Выше 10,5	Детские ясли, поликлиники и больницы, цехи точной механики
Помещения влажные с температурой:				
пониженной	8—12	61—75	4—6,9	Фильтровальные станции водопровода
нормальной	15—21		5,6—13,1	Остывочные хлебозаводов, никелировочные отделения
повышенной	Выше 21		Выше 13,1	Прядильные фабрики, цеха электролиза меди и никеля, тестомесительные отделения хлебозаводов, душевые и раздевальни при них
Помещения с мокрым режимом и температурой:				
пониженной	8—12	Выше 75	Выше 7	Флотационные отделения обогатительных фабрик
нормальной	15—20		» 13,1	Отделения кожевенных заводов
повышенной	Выше 21		» 14	Бани и прачечные, цехи мокрой отделки тканей (красильные и т. д.)

ной части конструкции, также могут быть изучены лишь при совместном рассмотрении температуры и относительной влажности внутреннего воздуха.

Эти особенности увлажнения ограждающих конструкций отражены в классификации температурно-влажностного состояния помещений, учитывающей значения температуры и относительной влажности (табл. III.3) в холодный период года.

В летний период года температура в помещениях повышается, а относительная влажность падает по сравнению с значениями этих параметров, указанными в табл. III.3.

Пределы повышения температуры и уменьшения влажности в помещениях с некондиционируемым микроклиматом зависят от температуры наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации, а также от кратности воздухообмена.

Поскольку в большинстве помещений в летнее время года широко используется естественный воздухообмен, отклонение температуры воздушной среды помещения от температуры наружного воздуха в течение сколько-нибудь длительного периода времени может происходить только в ограниченных пределах (обычно разница между этими температурами не превышает $\pm 5°$); для помещений с искусственным охлаждением верхним пределом этой разницы по гигиеническим условиям считается 10°.

Защита внешних поверхностей здания и особенно его световых проемов от солнца и наиболее эффективное использование естественного воздухообмена в состоянии поддержать внутреннюю температуру, близкую к верхнему пределу комфорта, лишь при соответствующих климатических условиях, целесообразных видах ограждений и приемлемом типе здания.

Целесообразный эксплуатационный режим жилых зданий, не имеющих кондиционирования воздуха, может на несколько градусов снизить температуру помещений.

На рис. III.3, характеризующем летние температурные условия жилых помещений на территории Узбекской ССР, исследованные в 1960—1962 гг., видно, что при круглосуточном проветривании и отсутствии солнцезащиты окон, температура воздуха помещений в дневное время близка к высокой температуре наружного воздуха, а при солнцезащите светопроемов и ночном сквозном проветривании понижается примерно на 6° по сравнению с этой последней температурой. Однако и в этом случае температура помещения превышает верхнюю границу комфорта.

Относительно более значительный перегрев помещений даже при целесообразном эксплуатационном режиме (одностороннее ночное проветривание и солнцезащита светопроемов) отмечается в помещениях верхнего этажа с совмещенной невентилируемой крышей (рис. III.4).

Применение конструкции крыши, вентилируемой наружным воздухом, понижает температуру помещения на 3° и более, как это видно из рисунка.

Данные рисунков III.3 и III.4 относятся к жилым помещениям с высотой 2,5 *м*.

В неблагоприятных климатических условиях приходится прибегать к кондиционированию микроклимата помещений. Средства кондиционирования могут быть местными (переносные вентиляторы и кондиционеры) или общими для здания в целом (системы радиационного охлаждения или кондиционирования.

Наиболее целесообразными являются системы радиационного охлаждения.

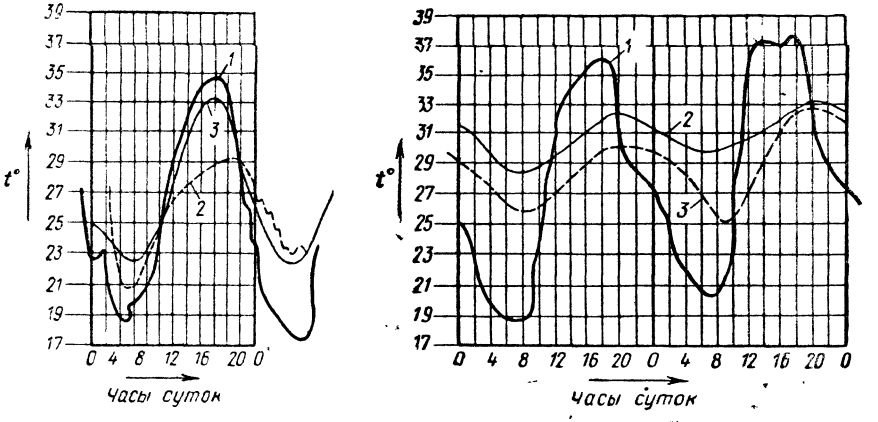


Рис. III.3. Летняя температура жилых помещений при естественных средствах защиты от перегрева (по данным Е. А. Солдатова):

1 — температура наружного воздуха; *2* — температура воздуха помещения с ночным сквозным проветриванием и солнцезащитой оконных проемов; *3* — температура воздуха помещения с круглосуточным проветриванием без солнцезащиты проемов

Рис. III.4. Летняя температура жилых помещений верхнего этажа с различной конструкцией покрытий:

1 — температура наружного воздуха, *2* — температура воздуха помещения с совмещенной невентилируемой крышей; *3* — то же, но с вентилируемой крышей (по данным Е. А. Солдатова)

§ 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫЙ ВОЗДУХООБМЕН В ПОМЕЩЕНИЯХ

Наружная атмосфера всегда в большей или меньшей степени влияет на внутренний микроклимат помещений, поскольку ограждающие конструкции здания не могут обладать идеальной герметичностью, а при входе и выходе людей нарушается и та ограниченная герметичность, которая имеется у ограждений. Особенно недостаточной герметизацией обычно обладают притворы оконных и дверных проемов. Поэтому внутренний микроклимат в зданиях с невысокой степенью герметизации ограждающих конструкций между отдельными помещениями приходится рассматривать для целой группы смежно расположенных помещений или даже для всего здания в целом.

Наибольшей степенью герметизации ограждающих конструкций отличаются безоконные и бесфонарные здания; в отапливаемых зданиях этого вида может поддерживаться микроклимат, существенно отличающийся от наружного, и степень отличия температуры и влажности внутри и снаружи ограничивается главным образом гигиеническими соображениями, связанными с приспособляемостью человеческого организма при переходе из внутренней в наружную среду.

Герметизированные производственные здания целесообразны в местностях с сильными ветрами и длительным дискомфортным (очень холодным или жарким) периодом года, или при размещении в зданиях производственных процессов, требующих строгой неизменяемости температуры и влажности воздуха.

Устройство буферных помещений, уплотнение притворов проемов, плотная и надежная герметизация соединений между отдельными элементами ограждающих конструкций являются в этих случаях основными средствами обеспечения необходимой герметизации при проектировании и строительстве зданий.

Кроме процессов передачи тепла через ограждающие конструкции, в любых зданиях большое значение для внутреннего микроклимата имеет воздухообмен.

Даже в зданиях и помещениях с искусственно создаваемым (путем механической вентиляции) воздухообменом большое значение имеют направления естественных токов воздуха; если намеченные пути механического притока и удаления воздуха совпадают с этими направлениями, вероятность надежной работы вентиляционной системы является наибольшей.

Во многих зданиях (жилых, большей части промышленных и т. д.) естественный воздухообмен является основным средством поддержания необходимых гигиенических условий в помещении.

Потенциалом переноса воздушных потоков является общее давление (P, *мм вод. ст.* или *кГ/м*^{2}) воздушной среды.

Разность общих давлений, вызывающая естественный перенос воздуха, возникает из-за перепада температур внутреннего и наружного воздуха или под действием ветра.

В соответствии с этим различают разности давлений, вызванные тепловым напором и ветровым потоком, вероятность суммарного действия которых приходится учитывать в расчетных целях.

Под влиянием внешних воздействий в здании создается распределение давлений, зависящее от геометрической формы здания и его аэродинамической характеристики, высоты помещений и перепада температур внутри и снаружи, степени изоляции отдельных этажей или групп помещений друг от друга, а также защищенности рассматриваемого комплекса зданий от действия ветра.

В холодный период года, при безветрии, в нижней зоне здания или помещения через любые неплотности и отверстия в ограждающих конструкциях происходит приток холодного наружного воздуха внутрь помещений (инфильтрация), а в верхней зоне, где со-

здается избыточное (против атмосферного давления) удаление теплого воздуха наружу (эксфильтрация).

Эти явления, вызывающие естественный воздухообмен в помещении или здании, в особенности заметны при сильных морозах, когда разность температур наружного и внутреннего воздуха отапливаемых помещений наиболее велика.

В климатических районах с суровой и длительной зимой инфильтрация холодного воздуха в нижнюю зону помещения или нижние этажи многоэтажного здания приводит к резкому переохлаждению этой зоны или целых групп помещений нижнего этажа во всех тех случаях, когда при проектировании и строительстве не было принято надлежащих мер по устройству тамбуров и других буферных помещений, а также по достаточной герметизации ограждающих конструкций, особенно притворов дверных и оконных проемов.

В районах с мягкой зимой для помещений с ограниченной кубатурой воздуха на каждого человека возникает необходимость в постоянном минимальном воздухообмене через относительно пористые ограждения и притворы проемов.

Такая необходимость ощущается в жилых зданиях с предельно-малой высотой этажей и ограниченной полезной площадью на каждого человека.

Объемный вес холодного наружного воздуха $\gamma_н$ больше объемного веса внутреннего теплого воздуха $\gamma_в$; величина разности давлений в приточных и вытяжных отверстиях ΔP_t, возникающая под влиянием разности температур (теплового напора), выражается как

$$\Delta P_t = H(\gamma_н - \gamma_в) \text{ мм вод. ст. или } кГ/м^2, \qquad (III.5)$$

где H — вертикальное расстояние между нижними приточными и верхними вытяжными отверстиями (приближенно равное высоте всего здания).

Эта величина разности давлений влияет на общую кратность воздухообмена в здании, но не может быть принята в качестве расчетной для фильтрации воздуха через ограждающие конструкции, поскольку последняя зависит от особенностей изменения разности давлений на внешних поверхностях здания и внутри его помещений.

При незначительных и равномерно-распределенных выделениях тепла внутри помещений в зданиях, подвергающихся воздействиям только теплового напора (при котором в нижней части здания характерно давление ниже атмосферного, а в верхней — избыточно по сравнению с атмосферным), можно представить на некоторой высоте воображаемую изобарическую поверхность (рис. III.5), для которой внутреннее давление в рассматриваемый момент времени соответствует наружному атмосферному, и, следовательно, разность этих давлений равна нулю.

Если приточные и вытяжные отверстия имеют определенную площадь и неизменное расположение, высота h такой поверхности

(которую часто называют нейтральной поверхностью или зоной) над приточными отверстиями определяется из выражения:

$$h = H \frac{f_1^2}{f_1^2 + f_2^2} \text{ м}, \qquad \text{(III.6)}$$

где f_1 и f_2 — соответственно площади вытяжных и приточных отверстий или площади щелей и неплотностей в верхней и нижней зонах здания.

В холодный период года площадь вытяжных отверстий f_1 в эксплуатируемых отапливаемых зданиях (т. е. приоткрываемых на длительный срок в верхней части здания фрамуг, форточек и т. д.) обычно превышает по крайней мере в полтора раза площадь приточных проемов f_2 в нижней части здания. Это объясняется тем, что открывание проемов (в целях сохранения тепла) ограничивается пределами эксплуатационной необходимости, а количество холодного воздуха, поступающего в здание, — необходимым минимумом.

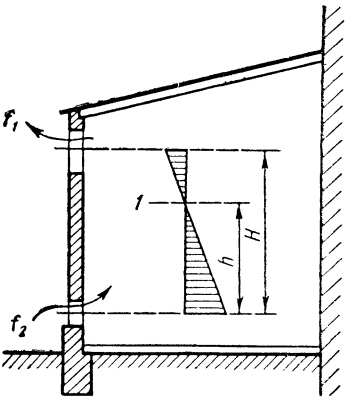


Рис. III.5. Положение нейтральной поверхности в помещении:
1 — нейтральная поверхность в холодный период года

Подставляя это соотношение вытяжных и приточных проемов в формулу III.6, получим:

$$h \approx 0{,}7H, \qquad \text{(III.7)}$$

т. е. положение нейтральной поверхности в зданиях, использующих только естественную вентиляцию, смещается в верхнюю часть здания *, а ограждающие конструкции всей нижней части подвергаются избыточному внешнему давлению, что связано с повышенной инфильтрацией.

Наибольшая и наименьшая величины этого внешнего давления пропорциональны вертикальному расстоянию крайних приточных и вытяжных отверстий от нейтральной поверхности, т. е. в соответствии с выражением III.7 для расчета инфильтрации через ограждающие конструкции

$$\Delta p_i = +0{,}7H(\gamma_н - \gamma_в) \text{ мм вод. ст.}, \qquad \text{(III.8)}$$

для эксфильтрации

$$\Delta' p_i = -0{,}3H(\gamma_н - \gamma_в) \text{ мм вод. ст.} \qquad \text{(III.9)}$$

* При равенстве площади вытяжных и приточных отверстий положение нейтральной поверхности имело бы место на половине высоты H, как это следует из выражения III.6.

Опыт эксплуатации зданий с деревянными оконными переплетами, притворы которых не подвергались специальному уплотнению или герметизации, показывает, что при величинах теплового напора, превосходящих 0,5 *мм вод. ст.*, инфильтрация холодного воздуха уже может вызвать нежелательное ухудшение температурного режима помещений, а эксфильтрация из верхней части влажных помещений — ухудшение влажностного состояния ограждающих конструкций в местах сопряжений и неплотностей.

Наоборот, при тщательной и надежной герметизации переплетов и проемов увеличение разности давлений до нескольких миллиметров водяного столба не вызывает таких нежелательных последствий. Помимо этих отличий в эксплуатационных качествах ограждений с различной степенью герметизации, в суровом климате характерно обледенение в зоне вытяжных устройств и неплотностей, через которые происходит эксфильтрация.

Несмотря на то, что положение нейтральной поверхности неустойчиво из-за мгновенно меняющихся аэродинамических условий, а при ветре ее расположение, близкое к горизонтальному, нарушается совершенно, в многоэтажных зданиях в условиях относительного безветрия можно выделить зоны характерных (преобладающих во времени) давлений: положительных (превышающих атмосферное), отрицательных (меньших атмосферного) и неустойчивых (изменяющих свой знак).

В зоне положительных давлений, располагающейся в самой верхней части здания, преобладает удаление воздуха через отверстия и неплотности в ограждающих конструкциях; в зоне отрицательных давлений, занимающей всю нижнюю и среднюю по высоте часть здания, характерна инфильтрация холодного воздуха.

Зона неустойчивых давлений близка к нейтральной поверхности. Такое распределение давлений характерно, например для многоэтажных, использующих естественный воздухообмен зданий, с недостаточно изолированными лестничными клетками.

Однако такая же закономерность в распределении давлений отмечается и в многоэтажных жилых домах, где проемы из лестничных клеток в жилые квартиры обычно закрыты. Это объясняется периодическим открыванием дверей, а также малой герметичностью и воздухопроницаемостью их притворов.

При такой недостаточной изоляции на эпюру давлений для здания в целом накладывается распределение давлений в каждом отдельном этаже.

Совмещенная эпюра от теплового напора с учетом поэтажного распределения давлений приобретает пилообразное очертание и отдельные ее зубцы в этажах, близких к нейтральной поверхности, выходят за пределы общей первоначальной эпюры, увеличивая число этажей, входящих в зону неустойчивых давлений (рис. III.6).

В этом случае давление от теплового напора p_t на ограждающие конструкции любого этажа с высотой h_0 может быть определено из выражения:

$$p_t = \pm 0{,}7H(\gamma_н - \gamma_в) \pm 0{,}7h_0(\gamma_н - \gamma_в), \qquad \text{(III.10)}$$

откуда

$$p_t^{макс} = +0{,}7(H + h_0)(\gamma_н - \gamma_в) \text{ мм вод. ст.},$$

$$p_t^{мин} = -0{,}3(H - h_0)(\gamma_н - \gamma_в) \text{ мм вод. ст.}, \qquad \text{(III.11)}$$

У наружной поверхности стен высоких зданий величина разности давлений внизу и вверху $p_t^{макс} - p_t^{мин}$ достигает значительной величины; под влиянием этой разности возникают восходящие то-

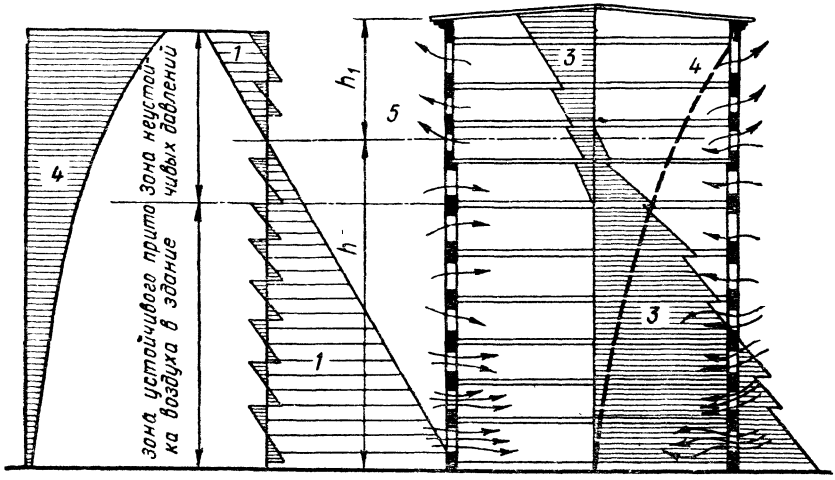


Рис. III.6. Схема фильтрации воздуха через неплотности проемов в отапливаемом многоэтажном здании с естественным воздухообменом:

1 — эпюра давлений от теплового напора для здания в целом; *2* — эпюры давлений в каждом этаже; *3* — эпюра суммарных давлений при отсутствии ветра; *4* — эпюра давлений от ветра в условиях городской застройки; *5* — нейтральная поверхность при отсутствии ветра

ки наружного воздуха, в особенности ощутимые при гладкой поверхности фасадов (рис. III.7).

Такие восходящие потоки воздуха несколько изменяют и выравнивают распределение давлений на поверхности фасада здания.

Основными путями фильтрации холодного воздуха внутрь здания становятся пути с наименьшим сопротивлением, т. е. любые неплотности ограждающих конструкций нижних этажей, особенно их сопряжения и примыкания одних ограждений к другим *.

У фасадов с балконами распределение давлений и направление потоков воздуха становится более сложным (рис. III.8).

---

* Поток воздуха сквозь ограждение $Q_в = \Delta p / R_и$, где Δp — разность давлений на противоположных поверхностях рассматриваемого участка конструкции; $R_и$ — сопротивление последнего воздухопроницанию. При постоянной величине разности давлений фильтрующийся поток воздуха резко возрастает на тех участках ограждения, сопротивление которых близко к нулю.

Наличие ветра в состоянии коренным образом изменить как величины давлений, возникающих под влиянием теплового напора и пристенных токов воздуха, так и общую закономерность распределения давлений.

Разность общих давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждений, вызванная действием ветра, зависит от его скорости, температуры наружного воздуха и аэродинамической характеристики здания.

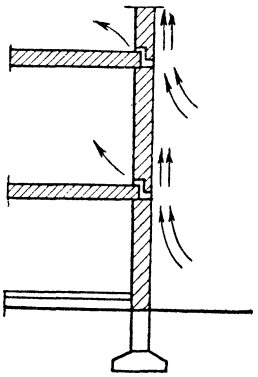


Рис. III.7. Направление воздушных потоков у стен многоэтажных панельных зданий

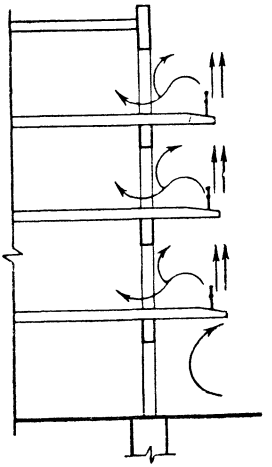


Рис. III.8. Направление восходящих потоков воздуха у фасадов многоэтажных зданий с балконами

Для вычисления этой разности давлений $\Delta p_в$ можно пользоваться следующим выражением:

$$\Delta p_в = \kappa_1 \frac{\gamma_н v^2}{2g} - \left(\pm \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \cdot \frac{\gamma_н v^2}{2g} \right) \text{мм вод. ст.}, \qquad \text{(III.12)}$$

где κ_1 и κ_2 — величины аэродинамических коэффициентов на наветренном и подветренном фасадах здания, выражающие ту часть ветрового напора, которая переходит в статическое давление на поверхности стен; при направлении ветра, нормальном к поверхности ограждений, на наветренном фасаде коэффициент положителен, а на подветренном — отрицателен (разрежение); $\gamma_н$ — объемный вес наружного воздуха, зависящий от его температуры, *кг/м*^{3}; v — расчетная скорость ветра, *м/сек*; g — ускорение силы тяжести (9,81 *м/сек*^{2}).

Первый член выражения представляет величину давления на наветренном фасаде $p_{ст}$, а второй — давление $p_{изб}$ внутри здания, недостаточное или избыточное по сравнению с атмосферным; при этом значение второго члена соответствует тем случаям, когда

ограждающие конструкции с наветренной и подветренной сторон здания обладают одинаковой воздухопроницаемостью.

Если внутри здания имеется продольная непроницаемая стена или перегородка, лишенная проемов, разность давлений на наветренном фасаде уменьшается, так как давление в наветренной части здания становится избыточным против атмосферного (рис. III.9).

В суровых климатических районах с сильными ветрами, где сквозное проветривание здания не требуется, и нежелательна даже сквозная фильтрация через неплотности ограждений, такое планировочное решение улучшает эксплуатационные качества здания.

Воздухообмен происходит раздельно в наветренной и подветренной частях здания и охлаждающее влияние ветра уменьшается.

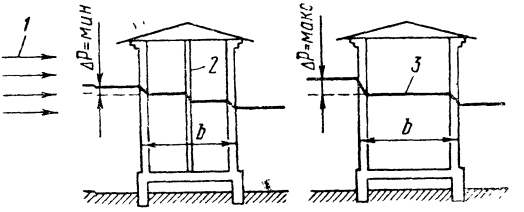


Рис. III.9. Особенности распределения аэродинамических давлений в здании с продольной непроницаемой стеной или перегородкой и в здании без нее:

1 — направление ветра; *2* — глухая непроницаемая стена или перегородка; *3* — эпюры распределения давлений

В зданиях с обычной планировкой помещений часто пренебрегают учетом внутреннего давления, принимая во внимание лишь значения аэродинамических коэффициентов для наветренного и подветренного фасадов.

В постройках прямоугольной формы, при направлении ветра нормальном к поверхности фасада и достаточной длине последнего, эти коэффициенты приближенно равны: для наветренной стороны $\kappa_1 = +0{,}8$; для подветренной $\kappa_2 = -0{,}4$. Тогда

$$\Delta p_в = \frac{0{,}8 + 0{,}4}{2} \cdot \frac{\gamma_н v^2}{2g} = 0{,}6 \frac{\gamma_н v^2}{2g} \; мм \; вод. \; ст. \qquad (III.\ 12а$$

Условия городской застройки могут существенно изменить распределение ветровых давлений на фасадах многоэтажных зданий. Типичным в этих случаях является уменьшение ветрового давления у поверхности земли и существенное увеличение для верхних этажей *.

---

* Расчетная величина суммарной разности давлений от температурного перепада и ветра может быть приближенно определена по формуле $\Delta p_{расч} = 0{,}7\ H(\gamma_н - \gamma_в) + 0{,}03\gamma_н v^2$.

Пример III.1. Определить разность давлений для расчета наружных ограждающих конструкций девятиэтажного здания на воздухопроницаемость в климатических условиях Москвы и Дудинки.

Температура наружного воздуха и скорость ветра приняты: для Москвы — 26° и 5 *м/сек*, для Дудинки —45° и 8,1 *м/сек*. Температура воздуха помещений: в Москве +18°, в Дудинке +22° (в суровых климатических условиях необходимо в помещениях поддерживать более высокую температуру воздуха, поскольку поверхности наружных ограждений, ограничивающих помещение, предельно и длительно охлаждены).

Высота здания (между центрами оконных проемов первого и девятого этажей) 27 *м*.

Величину теплового напора, под влиянием которой происходит инфильтрация, определяем по формуле (III.8).

Для Москвы $\Delta p_t = 0{,}7 \cdot 27(1{,}43 - 1{,}21) = 4{,}16$ *мм вод. ст.*, для Дудинки $\Delta p_t = 0{,}7 \cdot 27(1{,}55 - 1{,}20) = 6{,}61$ *мм вод. ст.*, где 1,43 и 1,21; 1,55 и 1,20 — удельный вес воздуха, *кг/м*^{3} при температуре —26 и +18°; при —45 и +22° *.

Из этих значений Δp_t видно, что в суровых климатических условиях тепловой напор примерно в 1,5 раза больше, чем для климата средних широт Европейской части СССР.

При расчетной скорости ветра разность давлений, под влиянием которо будет происходить инфильтрация (см. формулу III.12а), составит:

для Москвы

$$\Delta p_в = 0{,}6 \frac{\gamma v^2}{2g} = 0{,}6 \frac{25 \cdot 1{,}43}{2 \cdot 9{,}81} = 1{,}09 \text{ мм вод. ст.},$$

для Дудинки

$$\Delta' p_в = 0{,}6 \frac{65{,}6 \cdot 1{,}55}{2 \cdot 9{,}81} = 3{,}11 \text{ мм вод. ст.}$$

Суммарная расчетная разность давлений:

для Москвы $\Delta p_{расч} = \Delta p_t + \Delta p_в = 4{,}16 + 1{,}09 = 5{,}25$ *мм вод ст.*,

для Дудинки $\Delta' p_{расч} = 6{,}61 + 3{,}11 = 9{,}72$ *мм вод. ст.*, что почти в два раза превышает расчетную разность давлений для Москвы.

Естественно, что в последнем случае как сами ограждающие конструкции, так и особенно их сопряжения, стыки и притворы проемов должны обладать повышенной плотностью и непроницаемостью.

В жилых и общественных зданиях необходимость в использ вании естественного воздухообмена для удаления выделяющихс вредностей и тепла сравнительно невелика.

Однако в таких зданиях с уменьшенной высотой этажей и поме щений кратность воздухообмена должна быть повышена для обес печения хороших гигиенических условий; кроме того, при наличии в таких помещениях эпизодических влаговыделений (связанных с сравнительно кратковременным присутствием большого числа людей) и внутренней отделке из материалов, не сорбирующих парообразную влагу, появляется необходимость в эффективной вентиляции, в целях устранения эпизодической возможности возникновения капельной влаги на поверхности ограждений.

---

* При отсутствии справочных таблиц удельный вес сухого воздуха при различных температурах t° С вычисляется по формуле $\gamma_н = 1{,}29 \frac{273}{273 + t}$ *кг/м*^{3}, где 1,29 — удельный вес воздуха при 0° С.

В промышленных зданиях необходимость в использовании естественного воздухообмена гораздо больше, чем в жилых и общественных.

Избыточные давления в вытяжных проемах одноэтажных отапливаемых производственных зданий весьма невелики в холодный период года; в связи с этим через такие проемы может происходить как удаление, так и приток холодного воздуха (рис. III.10, *а*). Преобладающая часть высоты здания и его ограждающих конструкций, находится в зоне притока. В связи с этим ограничение

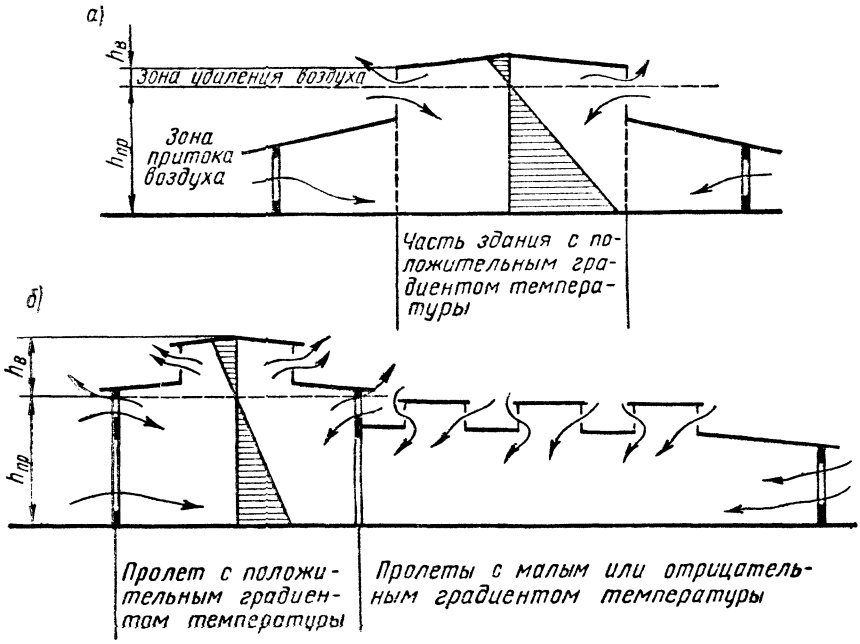


Рис. III.10. Схема фильтрации воздуха через ограждающие конструкции отапливаемых производственных зданий в холодный период года:
а — в однопролетном; *б* — в многопролетном с высоким крайним пролетом

инфильтрации холодного воздуха через ограждения отапливаемых производственных зданий (главным образом через заполнение светопроемов и стыки панелей) является весьма необходимым в целях обеспечения достаточно высоких эксплуатационных качеств производственных помещений, особенно назначенных для точных производственных процессов. При расположении рабочих мест вблизи наружных ограждений любые неплотности, щели и недостаточная герметизация соединений между отдельными конструктивными элементами столь же недопустимы, как в жилых и общественных зданиях.

Более устойчивое удаление внутреннего воздуха через проемы и эксфильтрация его через неплотности ограждающих конструкций

происходят в холодный период года при отсутствии ветра лишь в верхней зоне наиболее высоких пролетов (рис. III.10, *б*). Через ограждающие конструкции более низких пролетов (створные переплеты остекления наружных стен, а также проемы фонарей) отмечается инфильтрация холодного воздуха в помещения. В связи с этим целесообразно наибольшее уплотнение притворов переплетов в проемах таких пролетов. Если проемы служат только для целей освещения, уместно заполнять их остеклением с герметизированными воздушными прослойками или стеклянными блоками с сопряжениями, непроницаемыми для потоков воздуха.

Аэрационные фонари или вытяжные шахты располагаются над высокими (а при равной высоте — над центральными) пролетами; приток свежего воздуха в нижнюю зону помещений обеспечивается естественным путем, а в центральную часть широких зданий — специальными подземными каналами.

Отмеченные выше особенности распределения давлений характерны в холодный период года для зданий механических, инструментальных, деревообделочных и других отапливаемых цехов, не имеющих значительных выделений тепла.

В производственных зданиях с большими выделениями тепла (кузнечные, сталеплавильные и другие цехи) естественный приток воздуха в рабочую зону происходит более интенсивно, а избыточные давления в вытяжных проемах выше, чем в отапливаемых зданиях. В связи с этим через проемы фонарей и неплотности ограждающих конструкций надоконной части крайних пролетов происходит устойчивое удаление (эксфильтрация) внутреннего воздуха.

В цехах с большими выделениями тепла, где относительная влажность внутреннего воздуха в верхней зоне мала (15—25% и даже менее), температура достаточно высока, а воздухообмен в помещении значителен, интенсивная эксфильтрация способствует естественной сушке ограждающих конструкций верхней зоны здания.

Теплозащитные свойства ограждений верхней зоны цехов с большими выделениями тепла могут быть существенно уменьшены на преобладающей части длины здания, подвергающейся непосредственным влияниям выделяющегося тепла. Исключения составляют ограниченно облучаемые торцовые стены и другие ограждения, примыкающие к наружным углам здания, а также охлаждаемые участки стен над воротами и въездами.

Расположение в зонах преобладающего притока (например в более низких пролетах здания) производственных процессов с выделением вредностей значительно ухудшает микроклимат и условия эксплуатации многопролетных промышленных зданий в целом, так как газы и другие выделения распространяются по всему зданию, особенно в направлении высоких пролетов и участков с значительными выделениями тепла. В частности, нежелательно расположение в зоне устойчивого притока отделений с производственным процессом, загрязняющим воздух (термических, шлифовальных),

а тем более травильных, красильных и никелировочных, выделения которых насыщены влагой. При этом ухудшаются не только санитарно-гигиенические условия для людей, но и увеличивается вероятность постепенного разрушения ограждающих конструкций здания от коррозии.

В непроветриваемых участках, образуемых выступающими конструктивными элементами покрытий, наиболее вероятно возникновение конденсации влаги, которая обычно содержит растворенные агрессивные вещества и вызывает разрушение элементов покрытия (рис. III.11).

Конденсация влаги в непроветриваемых участках у поверхности покрытия объясняется, в частности, уменьшением коэффициента

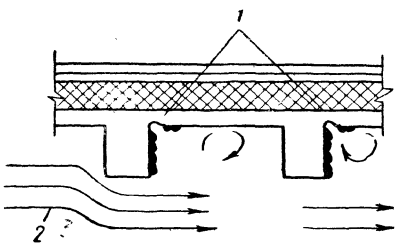


Рис. III.11. Конденсация влаги за выступающими элементами ограждающих конструкций:
1 — зоны конденсации и разрушения; *2* — поток влажного воздуха

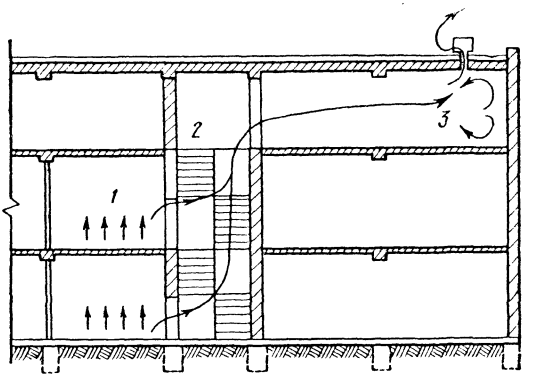


Рис. III.12. Распространение влаги по многоэтажному зданию (схема продольного разреза):
1 — отделения с выделениями влаги; *2* — лестничная клетка; *3* — отделение с ограниченными выделениями тепла

теплообмена между поверхностью ограждения и внутренним воздухом и, как следствие, понижением температуры и повышением влажности. В зданиях с выделениями влаги наиболее предпочтительны покрытия с гладкой внутренней поверхностью, не имеющей выступающих балок и ребер.

Перемещения водяного пара, вызванные конвективным распространением влажного воздуха в направлении высоких пролетов или участков с выделениями тепла, могут привести к процессам обильной конденсации на поверхности наружных ограждений в тех помещениях, через которые проходят или куда поступает поток влаги. В частности, такая конденсация может происходить в лестничных клетках, по которым легко распространяются потоки влажного воздуха в многоэтажных зданиях и даже в помещениях с выделениями ограниченных количеств тепла, если в них не предусмотрены достаточные средства для эффективного воздухообмена, достаточного и для ассимиляции перемещающейся влаги (рис. III.12)*.

* Из практики эксплуатации молочного комбината в Москве.

Наиболее целесообразным является размещение технологических процессов с выделением тепла и газов в повышенных пролетах производственного здания, над которыми предусмотрены вытяжные фонари или шахты.

Это может повести к общему упорядочению микроклимата производственного здания и, в частности, к обеспечению постоянного направления движения воздуха в рабочей зоне смежных пролетов, скорость которого поддается регулированию путем изменения площади вытяжных отверстий в аэрационном фонаре над повышенным пролетом. Такое постоянное движение воздуха в рабочей зоне особенно целесообразно в производственных зданиях, эксплуатируемых в южных районах (рис. III.13).

Практика эксплуатации производственных зданий в СССР (где значительная часть равнинных территорий отличается крайней из-

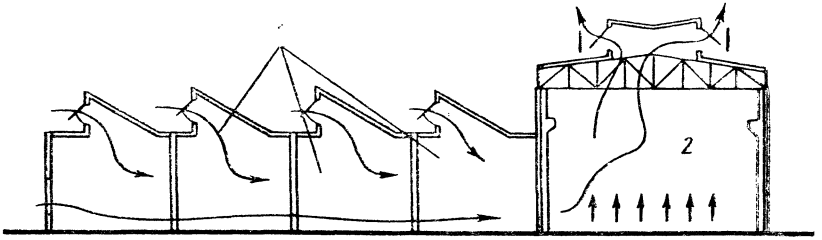


Рис. III.13. Организация устойчивого направления естественных токов воздуха в одноэтажных промзданиях (целесообразная в южных районах):
1 — отделения станочной обработки металла с фонарями верхнего света, обращенными на северную часть небосвода; *2* — отделения с выделениями тепла и увеличенной высотой

менчивостью направлений ветров), показала целесообразность более широкого использования для целей аэрации вытяжных фонарей с защищенными от воздействия ветра проемами и, как следствие, с устойчивыми аэродинамическими характеристиками. Важнейшим положительным качеством таких фонарей является неизменная и высокая производительность по удалению нагретого и загрязненного воздуха, обеспечиваемая при отсутствии регулирования открывания проемов фонаря, в связи с постоянно меняющимися направлениями ветра.

Площадь вытяжных отверстий в таких фонарях используется более производительно (почти в 2 раза) по сравнению с площадью створных переплетов в обычных фонарях с неустойчивыми аэродинамическими характеристиками и возможностью эффективного удаления воздуха лишь через проемы, расположенные с подветренной стороны.

На рис. III.14, III.15 приведены профили производственных зданий с вытяжными фонарями, имеющими устойчивые аэродинамические характеристики и не требующими постоянного регулирования открывания створных переплетов.

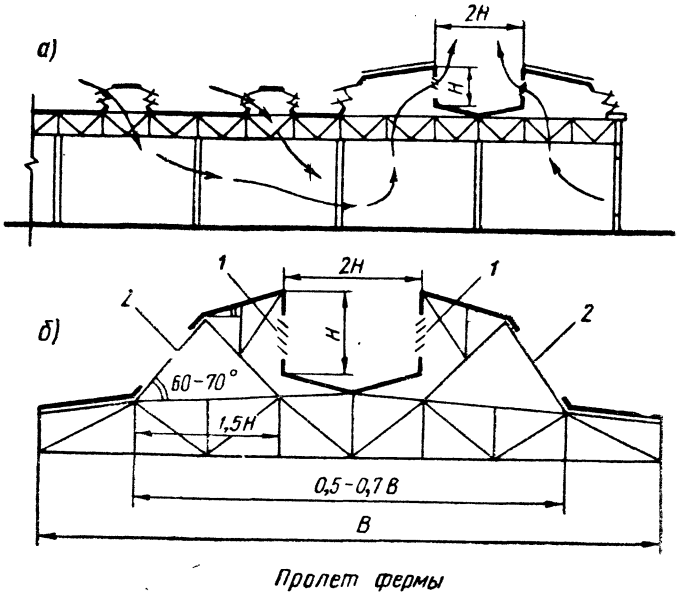


Рис. III.14. Схема аэродинамически устойчивого вытяжного фонаря:

а — в многопролетном здании; *б* — в однопролетном здании; *1* — аэрационные проемы; *2* — остекленные проемы с глухими переплетами

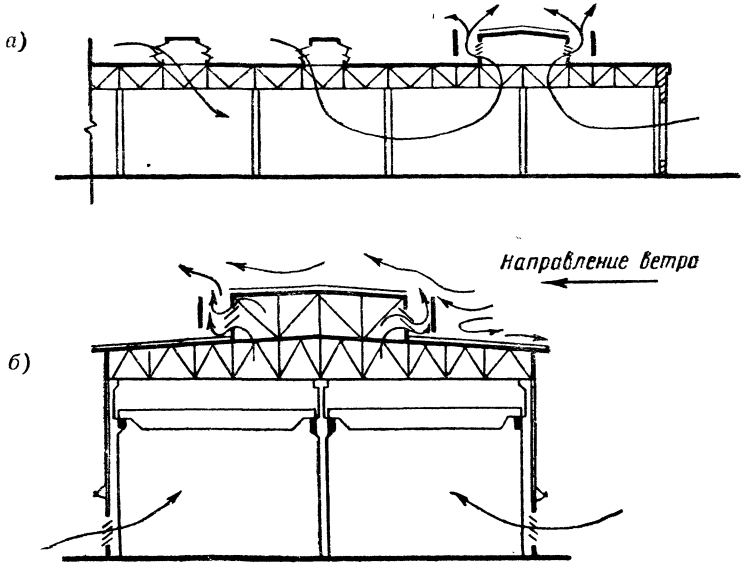


Рис. III.15. Схема вытяжного фонаря с ветроотражающими экранами:

а — в многопролетном здании; *б* — в двухпролетном здании

Вытяжной фонарь (рис. III.14), профиль и размеры которого разработаны Л. М. Брантом (в порядке конкретизации более общего предложения В. В. Батурина), отличается тем, что остекленные проемы расположены изолированно от аэрационных, в связи с чем ограничивается чрезмерное загрязнение стекол удаляемым воздухом. Взаимная аэродинамическая защита вытяжных проемов обеспечивается противолежащими половинами фонаря. Для обеспечения более устойчивой и производительной работы, аэрационные проемы целесообразно располагать не ближе 5 *м* к торцам фонаря. Применение фонарей аналогичного очертания допустимо для цехов с значительными и непрерывными выделениями тепла (например, около 50 *ккал/м*^{3} при наименьших выделениях тепла технологическим процессом); при этом указанный минимальный предел выделений тепла относится к строительству зданий на терри-

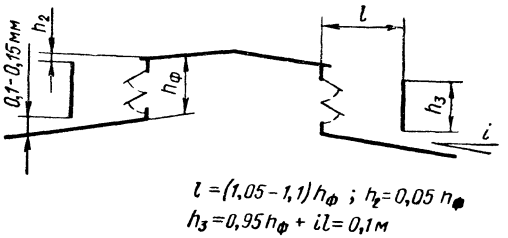


Рис. III.16. Расположение ветроотражающих экранов

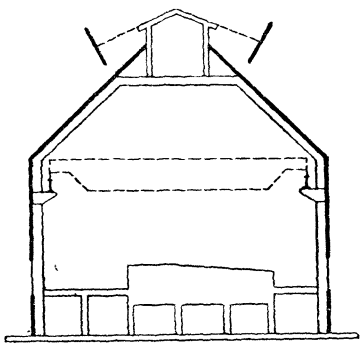
ториях с ограниченными снегопадами и метелями (Центральные районы Украинской ССР и т. д.). При прерывистых или недостаточных выделениях тепла и резко выраженных процессах горизонтального переноса снега (см. гл. II), пространство между раздельными половинами фонаря может быть занесено, что ведет к осложнениям эксплуатации здания, перегрузкам конструкций и даже их авариям.

Вытяжной фонарь с ветрозащитными экранами (рис. III.15), имеет более устойчивую аэродинамическую характеристику. Недостаток этого фонаря состоит в том, что в случае близкого расположения к вытяжным проемам непрозрачных ветроотражающих экранов, снижается его светоактивность. Поэтому такой фонарь следует применять главным образом для целей аэрации, а не для освещения помещений. Использование этого фонаря целесообразно, например, в производственных зданиях с малой шириной, освещаемых боковым светом, а также в крайних пролетах многопролетных зданий.

При малых уклонах кровли вполне удовлетворительные условия для удаления воздуха достигаются при расположении ветроотражающих экранов на расстоянии l от вытяжных проемов, примерно равном высоте фонаря (рис. III.16).

Такое расположение экранов обеспечивает достаточную устойчивость аэродинамических давлений и неизменность скоростей воздуха, удаляемого одновременно через наветренные и подветренные проемы. При очень больших выделениях тепла в производственном здании (100 *ккал/м*^{3} и более) и крутых уклонах кровли производительность фонаря повышается при наклонном расположении ветроотражающих экранов (рис. III.17).

В цехах, где удаляемый воздух сильно загрязнен, уместно отказываться от применения остекленных поверхностей в фонарях верхнего света, используя для таких помещений достаточно производительные вытяжные аэрационные устройства и освещение боковым верхним светом. Расположение на достаточном расстоянии



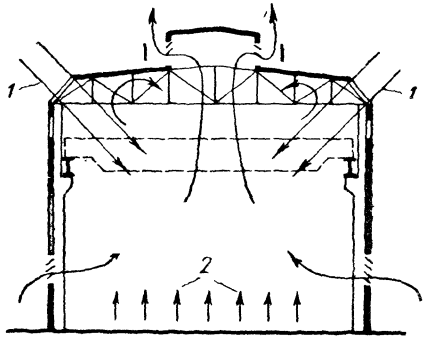


Рис. III.17. Аэрационный фонарь с наклонными ветроотражающими экранами над цехом с очень большими выделениями тепла

Рис. III.18. Обеспечение минимального загрязнения остекления в цехах с выделениями тепла и газов (путем функционального разделения световых и аэрационных проемов):

1 — естественный свет; *2* — выделения тепла и потоки нагретого загрязненного воздуха

друг от друга световых и вытяжных аэрационных проемов следует считать одним из основных правил проектирования зданий подобных цехов (рис. III.18).

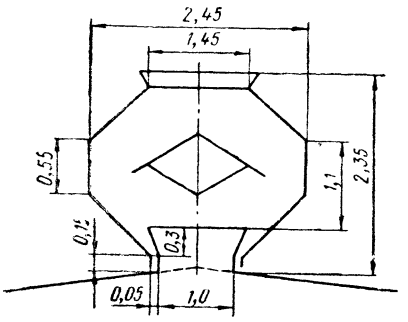
Для зданий, где не требуется очень высокая производительность вытяжных устройств, целесообразно применение аэрационного фонаря Гипромеза, представляющего по существу протяженный дефлектор и показавшего в условиях умеренного наружного климата удовлетворительные эксплуатационные качества в тех цехах, где производительность этого устройства оказалась достаточной (рис. III.19).

Фонарь этого вида без регулирующих расход воздуха клапанов может быть установлен только над зданиями, в которых возможно сильное охлаждение воздуха верхней зоны помещений в холодный период года.

Аэрационные фонари с устойчивыми аэродинамическими характеристиками и достаточно простым сезонным регулированием

площади вытяжных отверстий в состоянии обеспечить удовлетворительное удаление загрязненного воздуха из цехов с большими выделениями производственного тепла, в частности, и в климатических условиях, отличающихся сильными ветрами. Однако чем меньше избыточное давление под покрытием цеха, тем больше внимания должно быть уделено аэродинамической характеристике фонаря и предупреждению снежных заносов в холодный период года, во время возможных перерывов в выделениях производственного тепла.

При проектировании вытяжных отверстий и устройств из влажных и мокрых помещений необходимо считаться с возможностью обледенения внешних конструктивных элементов в зоне удаления влажного воздуха.



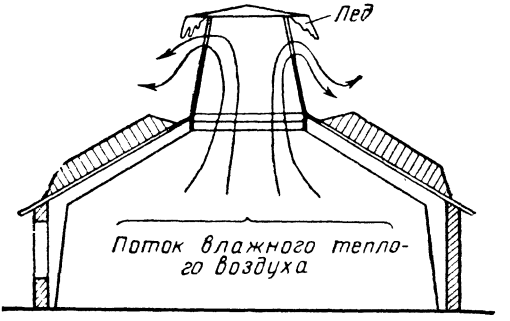


Рис. III.19. Схема вытяжного фонаря Гипромеза (размеры относительные, кратные ширине горловины фонаря, принятой равной единице)

Рис III.20. Обледенение вытяжных проемов в зданиях влажных и мокрых цехов

Вытяжные проемы, назначенные для этих целей, следует располагать так, чтобы падающие при таянии куски льда не могли повредить остекления расположенных ниже светопроемов или конструкций кровли, а тем более не могли угрожать безопасности пешеходного и транспортного движения у здания.

На рис. III.20 показано неудачное в этом отношении расположение зенитных фонарей верхнего света под вытяжным устройством в здании цеха с высокой влажностью внутреннего воздуха.

Во влажных производственных зданиях весьма важна в целях обеспечения сравнительно сухого состояния конструкций наружных стен и их долговечности организация циркуляции токов сухого воздуха вблизи этих стен.

Такое движение воздуха может быть достигнуто путем устройства у наружных стен щелей в междуэтажных перекрытиях или рабочих площадках (рис. III.21) с подачей снизу сухого приточного воздуха в эти щели.

Опытом эксплуатации в суровом климате производственных зданий с большими выделениями влаги установлено, что такое мероприятие обеспечивает достаточно удовлетворительное температурно-влажностное состояние наружных стен и ограничивает образование льда на остеклении светопроемов.

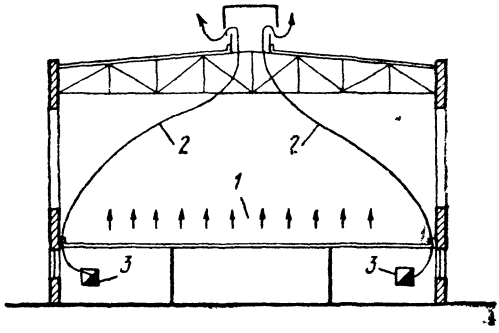


Рис. III.21. Организация токов сухого теплого воздуха вблизи поверхности наружных стен влажных помещений (по предложению О. Ф. Юрьева):

1 — выделения влаги; *2* — токи сухого теплого воздуха; *3* — источники подачи воздуха

§ 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА И ВЛАГИ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Во многих отапливаемых зданиях преобладающее распространение тепла и влаги происходит путем конвекции, и основной причиной переноса является разность давлений, в отдельных зонах помещений не всегда устойчивая, ограниченная по величине и изменяющаяся во времени.

Если источники тепла, связанные с функциональным процессом, протекающим в помещении, практически мало заметны, основное растространение тепла в холодный период года происходит от отопительных приборов и в этом случае носит достаточно определенный характер. Ограниченная интенсивность источников тепла и влаги (или даже практическое их отсутствие) характерна для жилых и общественных зданий.

Наиболее явно выраженные выделения тепла и влаги характерны для соответствующих производственных помещений.

Если источники тепла и влаги многочисленны и плотно распределены на значительной части площади помещения, а количество выделений сравнительно мало, то распространение тепла и влаги в объеме помещения относительно равномерно и происходит по беспорядочному пути (диффузное), что характерно, например, для станочных, прядильных, ткацких, электролизных и других аналогичных цехов.

При расположении источников интенсивных выделений тепла только на отдельных участках происходит распространение тепла

и влаги в виде струй, что характерно для сталеплавильных, красильных и других цехов.

При диффузном распространении изменения температур и влажности воздуха по объему помещения относительно невелики; если выделения тепла и влаги постоянны во времени, то значения температуры и влажности воздуха помещения зависят главным образом от естественного воздухообмена и действия отопительно-вентиляционных устройств. При ограниченном объеме и высоте таких помещений для целей проектирования ограждающих конструкций могут быть использованы в качестве расчетных средние значения температуры и влажности внутреннего воздуха.

По высоте помещений с диффузным распространением тепла обычно отмечается некоторое повышение температуры (положительная величина температурного градиента), если только из верхней зоны под покрытием не происходит интенсивного и достаточно постоянного удаления воздуха (например, с помощью аэрационных фонарей).

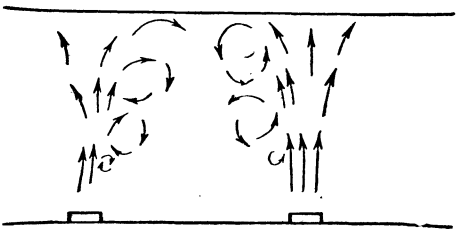


Рис. III.22. Схема постепенного смешения тепловых турбулентных струй с воздухом помещения

При струйном распространении тепла, происходящем обычно в турбулентном режиме, высокая температура в пределах струи постепенно уменьшается с высотой, по мере удаления от источника тепла (т. е. внутри струи имеет место отрицательный градиент температуры). В объеме помещения между отдельными струями (или за пределами струи) температура на много ниже, чем в пределах струи. Однако при высоте помещения меньшей, чем распространение струи по вертикали, градиент температуры обычно положителен, что объясняется возрастающими с высотой явлениями частичного смешения тепловых турбулентных струй с окружающим воздухом (рис. III.22). Для полного смешения струи требуется определенное расстояние по направлению ее траектории, называемое обычно длиной пути смешения [37].

При большом количестве выделяющегося тепла и значительной разности температур источника выделений и окружающей воздушной среды ΔT длина пути смешения или наибольшая высота распространения тепловой струи намного превосходит высоту производственных помещений. Участки покрытия, расположенные над мощными источниками выделений тепла, подвергаются сильному нагреву конвективными потоками горячего воздуха, в большинстве случаев прерывистому, поскольку мощные струи тепла чаще всего связаны с периодической плавкой металла, его разливкой и остыванием.

При непрерывной разливке металла воздействия конвективного и лучистого тепла на ограждения здания настолько интенсивны и

постоянны, что их теплозащитные свойства могут быть сколь угодно малыми, но стойкость против высоких температур должна быть очень большой.

Соответствующие расчеты показывают, что при разности $\Delta T = 50°$ предельная высота распространения тепловой струи составляет до 40 *м*; при $\Delta T = 1000°$ (плавка металла) эта высота в спокойной свободной воздушной среде равна около 900 *м*.

В связи с этим, кровли металлургических цехов интенсивно прогреваются. Через аэрационные вытяжные устройства этих кровель в наружную атмосферу поступают большие количества тепла; на сотни метров над металлургическими цехами формируется свой особый микроклимат с значительным загрязнением воздуха и по-

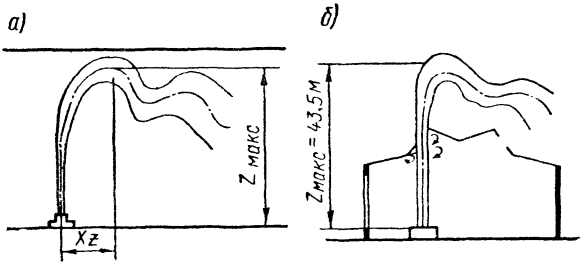


Рис. III.23. Траектории тепловых струй в воздушной среде:

а — траектория в спокойной воздушной среде с положительным температурным градиентом; *б* — то же, в термическом цехе

ложительной температурой даже в наиболее холодные периоды зимы.

В зоне распространения этих тепловых струй невозможно образование льда и выпадение снега на покрытия цеха; снег на лету обращается в дождь.

При прерывистом действии тепловых струй ограждающие конструкции цеха и особенно его верхнее покрытие подвергаются многократному (даже в течение суток) замораживанию и оттаиванию, в результате чего конструкции даже из таких стойких материалов, как железобетон разрушаются в течение двух-трех десятков лет, а иногда и в более короткие сроки.

Типичная двухмерная траектория смешения тепловой струи (рис. III.23) может быть установлена по величине ее максимального поднятия $Z_{макс}$ [38], имеющего место при некоторой абсциссе x_z.

Эта величина $Z_{макс}$ приближенно может быть определена из дифференциального уравнения переноса, приведенного к кинематической форме:

$$\frac{d^2z}{dx^2} + c_1 c x^2 z = c_2 x \qquad \text{(III.13)}$$

как

$$Z_{макс} = 0{,}83 \frac{c_2^{1/4}}{c_1^{3/4}}\ м, \qquad \text{(III.14)}$$

$$c_1=\frac{2{,}18ba}{\Delta T_0 r_0};\quad c_2=\frac{2{,}18\Delta T_0 ga}{T_{a0}r_0 v_0^2}$$

b — градиент температуры, *град/м*; a — коэффициент структуры струи; ΔT_0 — разность температур воздуха в струе у источника тепла и в окружающей среде; r_0 — начальный радиус струи, *м*; g — ускорение силы тяжести (9,81 *м/сек*^{2}); T_{a0} — абсолютная температура воздуха за пределами струи; v_0 — начальная скорость воздуха в струе, *м/сек*.

Пример III.2. Вычислить максимальное поднятие тепловой струи от внешней поверхности круглой в плане печи для термической обработки металлоизделий. Температура окружающей воздушной среды $T_{a.o}=20°=293°$ К; средняя величина градиента температуры в воздушной среде цеха $b=1{,}5$ *град/м*; избыточная температура струи в начальном ее сечении $\Delta T_0=50°$; начальный радиус струи $r_0=1{,}0$; начальная скорость $v_0=0{,}5$ *м/сек*. Коэффициент структуры струи $a=0{,}08$. При этих условиях вспомогательные величины:

$$c_1=\frac{2{,}18\cdot 1{,}5\cdot 0{,}08}{50\cdot 1}=0{,}0052;\quad c_2=\frac{2{,}18\cdot 50\cdot 9{,}81\cdot 0{,}08}{293\cdot 1\cdot 0{,}5^2}=1{,}16.$$

Тогда максимальная высота поднятия струи (рис. III.23б)

$$Z_{\text{макс}}=0{,}83\frac{1{,}16^{0{,}25}}{0{,}0052^{0{,}75}}=0{,}83\frac{1{,}04}{0{,}0194}=0{,}83\cdot 53{,}6=43{,}5\ м.$$

Вычисленная величина $Z_{\text{макс}}$ превосходит высоту производственного здания, в связи с этим необходимо выполнить конструкцию покрытия из материалов стойких против умеренного периодического нагрева и, кроме того, предусмотреть эффективные средства аэрации для удаления из цеха нагретого и загрязненного воздуха.

Поскольку высота производственных помещений обычно меньше максимального поднятия тепловой струи, внутренняя поверхность покрытия пролета промышленного здания накладывает ограничения на свободное струйное распространение нагретого воздуха. Над производственными пролетами с интенсивными выделениями тепла как правило необходимо предусматривать вытяжные устройства в виде дефлекторов, шахт или специальных аэрационных фонарей.

Чем меньше производительность этих устройств, тем более выражены геометрические ограничения, накладываемые строительной оболочкой здания на свободное распространение струи.

При рассмотрении в условиях естественного воздухообмена без ветра особенностей распространения в плоском сечении здания струйного конвективного потока от сосредоточенного источника тепла [41] уместно различать три характерных зоны по высоте струи (рис. III.24):

1) нижнюю с высотой z, находящуюся под сильным влиянием смешивающегося главным образом приточного воздуха, около источника тепла;

2) среднюю с высотой Z_0—z, аналогичную по особенностям распространения изотермической турбулентной струе;

3) верхнюю, особенности которой связаны с производительностью вытяжного устройства и делением струйного потока (на прямой струйный и рециркуляционный, направляемый обратно, параллельно поверхностям ограждений здания).

Рециркуляционные потоки, распространяясь от границ струи вдоль поверхностей покрытия и стен к зоне приточных отверстий, ограничивают отмеченную на рис. III.24 застойную область с медленным движением воздуха и при устойчиво установившемся режиме циркуляции частично смешиваются с воздушным потоком, вновь поступающим через приточные отверстия в нижней части наружных стен.

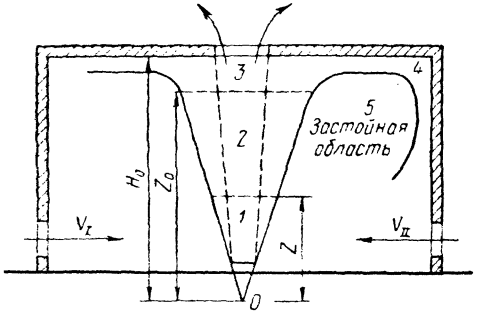


Рис. III.24. Схема струйных конвективных потоков в плоском вертикальном сечении здания (по данным Э. И. Реттера):

1, 2, 3 — характерные зоны распространения струи; *4, 5* — застойная область

Натурные исследования, их теоретические обобщения и эксперименты на интерферометрах* показывают, что интенсивность рециркуляционных потоков воздуха, размеры, положение и даже само существование застойной области зависят от производительности и постоянства работы вытяжных устройств над производственным пролетом, определяющих характер циркуляции токов воздуха в плоском сечении промышленного здания (рис. III.25).

Если средства аэрации ограничены по своей производительности (например, дефлекторы или шахты ограниченной площади, расположенные в отдельных местах покрытия), в верхней зоне цеха образуется устойчивая во времени застойная область теплого воздуха с наиболее высокой температурой (так называемая тепловая подушка) рис. III.25, *а*. Применение средств аэрации в виде обычных фонарей со створными переплетами (отличающихся пульсирующей производительностью, связанной с постоянными изменениями направлений и скорости ветра) приводит к тому, что застойная зона расположения наиболее нагретого и загрязненного воздуха несколько смещается вниз; при этом пульсации значений температуры и степени загрязнения в этой зоне возрастают (рис. III.25, *б*).

Использование вытяжных фонарей с устойчивыми аэродинамическими характеристиками (отличающихся высокой и постоянной производительностью) обычно приводит к увеличению скорости в пределах струи, уничтожению застойной или пульсирующей подуш-

---

* Интерферометры — приборы, позволяющие исследовать распределение температур в воздушной среде с помощью изучения явлений, сопутствующих интерференции света.

ки нагретого воздуха под покрытием (рис. III.25, *в*), уменьшению положительного или даже возникновению отрицательного градиента и общему понижению температуры в зоне мостовых кранов и верхних рабочих площадок. Это связано с необходимостью сезонной регулировки вытяжных проемов аэродинамически устойчивых фонарей с целью ограничения переохлаждения верхней зоны цеха в холодный период года и увеличения производительности аэрации — в теплый. При наличии выделений влаги в цехе такие регулировки связаны также с предупреждением процессов конденсации на поверхности световых проемов и недостаточно утепленного покрытия.

Особенности естественного воздухообмена связаны с закономерностями свободной конвекции токов воздуха, направление которых определяется и ограничивается поверхностями помещения.

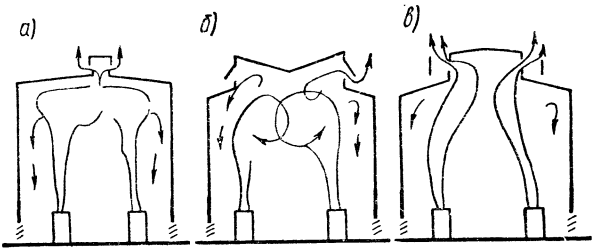


Рис. III.25. Распространение тепла и газов в виде струй в производственных помещениях с различными средствами аэрации:

а — при дефлекторах ограниченной производительности; *б* — при аэрационном фонаре с пульсирующей производительностью; *в* — при аэродинамически устойчивом фонаре, обеспечивающем постоянную разность давлений в зонах притока и вытяжки и постоянную высокую производительность

Интенсивность свободного распространения вдоль этих поверхностей естественно возникающих воздушных потоков определяется в самом общем виде произведением безразмерных критериев Грасгофа и Прандтля (Gr Pr) *.

---

* На основе анализа размерностей физических величин, входящих в уравнение движения вертикального конвективного потока, и экспериментов на моделях зданий, Э. И. Реттером [41] установлены зависимости для скорости воздуха v_m и избыточной по сравнению с окружающей средой температуры Δt_m в этом потоке:

$$v_m = 0{,}07 z^{-1} Q_к^{1/3}; \quad \Delta t_m = B z^n Q_к^{2/3},$$

где z — высота, *м*, от полюса О конвективной струи до рассматриваемого ее сечения (рис. III.24); $Q_к$ — конвективное тепло, *ккал/ч*, выделяемое источником.

Эти формулы даны для струи, распространяющейся в изотермической воздушной среде и проверены экспериментально на сечениях струй с высотой в натуре не более 8 *м*, а потому весьма приближенны для зданий большей высоты с неравномерным распределением температуры по вертикали.

Наличие явно выраженных обратных рециркуляционных струй, направленных вниз вдоль наружных стен, почти неизбежно при большой высоте светопроемов и значительной площади остекления; в этом случае вблизи приточных отверстий происходит смешение опускающегося и более энергично поступающего приточного воздуха. Скорость $v_{см}$ смешавшегося воздушного потока, направленного к середине помещения или к источнику тепла, может быть приближенно рассчитана по формуле:

$$v_{см}=\frac{\gamma_{пр}v_{пр}+\gamma_{р}v_{р}}{\gamma_{пр}+\gamma_{р}}, \qquad (III.15)$$

где $v_{пр}$ и $v_{р}$ — средние скорости приточного и рециркуляционного потоков; $\gamma_{пр}$ и $\gamma_{р}$ — средние удельные веса воздуха этих потоков.

Среднее значение избыточной температуры смешавшегося воздуха * может быть определено как:

$$\Delta t_{см}=\frac{G_{р}\Delta t_{р}}{G_{пр}+G_{р}}, \qquad (III.16)$$

где $G_{р}$ и $G_{пр}$ — весовые расходы рециркуляционного и приточного воздуха; $\Delta t_{р}$ — избыточная температура рециркуляционного потока.

Расчеты по формулам (III.15) и (III.16), по данным Э. И. Реттера, дают хорошее совпадение с результатами экспериментов на моделях зданий.

Однако в подавляющем большинстве случаев температура воздуха после смешения низка и близка к температуре приточного воздуха; особо низкая температура и большая скорость воздуха отмечаются вблизи пола, поскольку холодные потоки приточного воздуха, обладающие большей кинетической энергией по сравнению с рециркуляционными, интенсивно притекают вдоль пола к источнику тепла, слабо смешиваясь с более теплым воздухом, опускающимся сверху.

Это является основной причиной того, что в целях предупреждения переохлаждения ног работающих людей, низко расположенные и значительные по своей площади приточные проемы, исполь-

---

Показатель степени n в формуле для избыточной температуры, зависит от воздухообмена в помещении, уменьшаясь по мере его увеличения. Если интенсивность воздухообмена выразить безразмерной величиной $F=\frac{F_{пр}\sqrt{\psi}}{LH}$, где $F_{пр}$ — площадь приточных проемов на 1 *пог. м.* помещения, $м^2$; $\psi=\frac{1}{1+\left(\frac{F_{пр}}{F_{ух}}\right)^2}$ — коэффициент, учитывающий соотношение приточных и вытяжных $\frac{F_{пр}}{F_{ух}}$ проемов на 1 *пог. м.*; L и H — соответственно ширина и высота помещения. Показатель степени n при увеличении F от 0,004 до 0,014 уменьшается от 0,2 до —0,1.

* Под избыточной температурой $\Delta t=t_{с}-t_{о}$ понимается разность средней температуры в рассматриваемом сечении струи и температуры окружающего пространства.

зуются только в теплый период года при избыточной температуре помещения, не превышающей 5—8° по сравнению с температурой наружного воздуха.

Приточные отверстия, назначенные для использования в холодный период года, следует располагать в верхней части нижнего яруса остекления; в практике эксплуатации их обычно открывают неполностью, в целях уменьшения весового расхода холодного воздуха, поступающего в помещение, и обеспечения необходимого повышения его температуры при постепенном смешении с внутренним воздухом.

При значительных выделениях тепла, большой высоте остекления и существенной величине положительного градиента, рециркуляционный поток теплого воздуха, направленный сверху вниз вблизи остекления, значителен по своему весовому расходу, что обеспечивает интенсивное смешение холодного приточного воздуха с рециркуляционным и позволяет несколько уменьшить высоту расположения приточных отверстий.

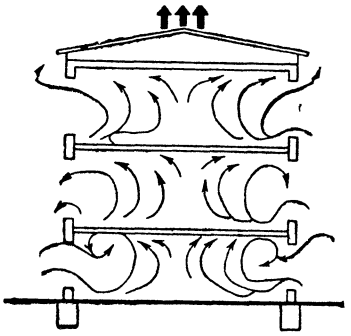


Рис. III.26. Схема конвективных потоков тепла в многоэтажном здании ограниченной ширины

Наоборот, при отсутствии значительных выделений тепла и слабо выраженных рециркуляционных потоках теплого воздуха у остекления высота расположения приточных отверстий должна быть увеличена. В производственных пролетах большой высоты (8—10 *м* и более) с аэрационными фонарями и отсутствием выделений тепла или очень умеренных их значениях (например, от изолированных и редко расположенных термических печей) в холодный период года отмечается возникновение отрицательного градиента температуры. Это связано с общей закономерностью деформирования на определенной высоте слабых тепловых струй с малым диаметром и ограниченной начальной разностью температур.

В любых зданиях следует различать зоны преобладающего во времени притока наружного воздуха (т. е. зоны отрицательных давлений в помещениях), располагающиеся преимущественно в нижней их части, и зоны преимущественного влияния теплого, удаляемого из здания воздуха (зоны положительных давлений обычно в верхней части помещений).

В нешироких многоэтажных зданиях значительную часть объема занимают зоны с отрицательными или неустойчивыми давлениями, прилегающие к наружным остекленным стенам; в этих зонах градиент температуры имеет меньшую величину, а в центральной части здания — большую (рис. III.26).

В соответствии с этим возникают конвекционные потоки воздуха и располагаются зоны с различной температурой.

Для зданий с различной высотой неизолированных друг от друга пролетов или с резко отличающейся этажностью отдельных смежных объемов зона притока распространяется в холодный период года на всю высоту более низких частей здания; температурный градиент внутри помещений, расположенных в этих частях, имеет ничтожную величину или даже отрицательный знак (см. рис. III.10).

В одноэтажных многопролетных промышленных зданиях с пролетами существенно различной высоты отрицательный градиент температуры обычно отмечается в низких пролетах (из-за подсасывания воздушных потоков к более высокой части здания); при равной высоте пролетов наименьшие величины положительного градиента характерны для пролетов по наружному периметру здания, а наибольшие — в его центральной части.

Распространение тепла в объеме производственных зданий происходит в основном путем конвекции, случаи сильного нагрева ограждающих конструкций лучистым теплом относятся главным образом к металлургическим цехам. Необходимо различать естественную конвекцию, вызываемую тепловым напором и вынужденную конвекцию, создаваемую токами воздуха механической вентиляции, работой производственных механизмов и т. д. В цехах, где имеются производственные участки с значительными выделениями тепла или высотой, существенно превосходящей среднюю высоту здания, влияние естественной конвекции является превалирующим; системы механической вентиляции целесообразно проектировать в этих случаях с учетом самопроизвольно и неизбежно возникающих естественных конвекционных потоков. Наиболее надежная работа вытяжных устройств механической вентиляции обеспечивается при расположении их в зонах здания с преобладающими во времени отрицательными аэродинамическими давлениями, приточных — в зонах устойчивых положительных давлений.

В частности, забор воздуха с кровли одноэтажных промышленных зданий в приточные воздуховоды, как правило, гигиенически нецелесообразен, и достаточно надежен только в тех случаях, когда ему не противодействуют потоки естественной конвекции.

Особенности распространения влаги в объеме помещений сходны с характером конвективного распространения тепла и в сильной степени зависят от него.

По высоте помещений с равномерным распространением влаги конвективными токами отмечается довольно постоянное распределение абсолютной влажности; при этом значения относительной влажности (т. е. степени насыщения воздуха водяным паром) тем меньше, чем выше температура.

При положительном градиенте температуры и равномерном распределении абсолютного влагосодержания относительная влажность воздуха в верхней зоне помещения может несколько уменьшаться.

Источники выделения влаги чаще всего располагаются в нижней части рабочей зоны; на этом же уровне обычно происходит подача свежего воздуха в цех путем естественной, а иногда и механической вентиляции. В связи с интенсивной ассимиляцией тепла и влаги сравнительно холодным и сухим приточным воздухом, градиенты температуры и влагосодержания в нижней зоне помещений обычно наиболее значительны.

При равномерном распространении влаги в преобладающей части объема помещения и спокойном состоянии воздуха постепенно происходит некоторое перераспределение влагосодержания, вызванное процессами молекулярной диффузии.

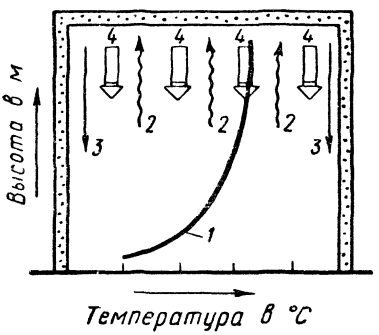


Рис. III.27. Схема диффузии водяного пара и газов, входящих в состав воздуха, в помещении с неравномерным распределением температуры:

1 — кривая распределения температуры по высоте помещения; *2* — направление диффузии водяного пара в малоподвижном воздухе; *3* — то же, газов, входящих в состав воздуха; *4* — направление потока тепла в малоподвижном воздухе

Существенное различие молекулярных весов водяного пара и сухого воздуха (в 1,62 раза) вызывает диффузионное перемещение парообразной влаги, содержащейся в воздухе, в наиболее высокую и теплую зону помещения. Объясняется это тем, что при наличии внутри газовой смеси неравномерного распределения температуры, газ с бо́льшим молекулярным весом (воздух) диффундирует по направлению потока тепла в газовой смеси, а газ с меньшим молекулярным весом (водяной пар) — в направлении обратном (рис. III.27).

Наличие конвективных потоков воздуха, нисходящих у остекленных поверхностей и направленных вверх у противолежащих внутренних стен или перегородок, способствует более быстрому переносу парообразной влаги в верхнюю зону, что весьма часто и наблюдается в практике эксплуатации помещений с значительными выделениями влаги, струйным ее распределением по помещению и отсутствием систематического удаления под покрытием.

Отмеченные особенности распространения влаги по объему помещения находят отражение в средних значениях влажности внутреннего воздуха.

Значения температуры и относительной влажности внутреннего воздуха позволяют установить величину абсолютного влагонасыщения воздуха помещения водяным паром и определить количество влаги, конденсирующейся на поверхности конструкции при охлаждении последней до температуры, соответствующей точке росы.

В количественном отношении это наиболее нежелательный вид увлажнения, непосредственно связанный с опасностью постепенно-

го разрушения конструкций, что, в частности, свойственно ограждениям в помещениях с мокрым режимом или влажных помещениях с периодическими повышениями выделений влаги.

Процесс конденсации влаги при достаточно высокой относительной влажности зависит от величины абсолютного пересыщения, выраженной в виде безразмерного критерия:

$$\frac{f_в - F_\omega}{\gamma_в} \text{ [б/р]},$$

где $f_в$ — абсолютная влажность внутреннего воздуха, *г/м*^{3}; вычисленная по формуле $F_t\varphi/100$ (F_t — максимальное влагосодержание при данной температуре) в том случае, если известна температура $t_в$ и относительная влажность $\varphi_в$ в помещении; F_ω — максимальное влагосодержание воздуха (при температуре поверхности конструкции, обращенной в помещение), *г/м*^{3}; $\gamma_в$ — плотность воды (при температуре поверхности конструкции), *г/м*^{3}.

Поскольку изменения плотности воды при колебаниях температуры от 0 до +30° незначительны и величина этой плотности может быть принята постоянной, количество влаги P, конденсация которой возможна на поверхности ограждающей конструкции, обращенной в помещение, определится по формуле:

$$P = \kappa (f_в - F_\omega)\alpha_к \ г/м^2 \cdot ч. \qquad \text{(III.17)}$$

Здесь $\alpha_к$ — коэффицент теплообмена конвекцией и кондукцией на поверхности ограждения, обращенной в помещение, который зависит от размеров помещения и скорости движения воздуха, но приближенно может быть в соответствии с исследованиями Каммерера принят равным 5,0+0,05 ($t_в - t_\omega$) *ккал/м*$^2 \cdot ч \cdot$ *град*; κ* — переходный коэффициент в *град·г/ккал·мм рт. ст.*

По экспериментам Л. С. Соколовой, проведенным в отношении конденсации влаги на поверхности глазурованных плиток, величина κ оказалась равной 3,3.

В соответствии с экспериментальными данными Ф. В. Ушкова, относящимися к процессам конденсации на поверхности бетонных и керамзитобетонных панелей, средняя величина $\kappa \approx 4{,}7$. Исследователь указывает, что отклонения достигали ±30%.

Можно полагать, что дальнейшие экспериментальные исследования внесут необходимые уточнения в величины констант влагообмена в зависимости от размеров, свойств и влажностного состоя-

---

* Величина κ может быть определена по формуле Пиенинга [46], как $k = \dfrac{13\,600\,(D/\lambda)^{0,75}}{RT\,(\gamma c)^{0,25}}$, где D/λ — отношение коэффициента диффузии водяного пара в воздушной среде к теплопроводности последней; RT — произведение газовой постоянной для водяного пара и абсолютной температуры; γc — произведение объемного веса и теплоемкости смеси воздуха с паром при постоянном давлении; 13 600 — переводный множитель для получения размерности $\alpha_к$, *г/м*$^2 \cdot ч \cdot$ *мм рт. ст.*

ния поверхности, на которой происходит конденсация, крупности конденсирующихся капель и т. д. *

Пример III.3. Определить количество влаги, которое может конденсироваться на внутренней поверхности ограждающей конструкции во влажных помещениях при одинаковой относительной влажности внутреннего воздуха $\varphi_в = 75\%$), но различной его температуре (8; 22 и 30°).

Первые температурно-влажностные условия характерны, например, для зданий фильтровальных (водопроводных) станций, вторые — для зданий цехов электролиза меди и никеля, а третьи — для банных помещений.

Температура внутренней поверхности конструкции (стен) принята во всех случаях ниже температуры внутреннего воздуха на 6°; тогда, принимая переходный коэффициент $\kappa = 4{,}0$, получим: $\kappa\alpha_к = 4{,}0\ (5{,}0 + 0{,}05 \cdot 6) = 21{,}2$ *г/м²·ч·мм* рт. ст

Количество влаги, которое может конденсироваться на внутренней поверхности стен фильтровальной станции, будет:

$$P_1 = \kappa\alpha_к (f_в - F_\omega) = 21{,}2\,(6{,}03 - 5{,}29) = 15{,}69\ г/м^2 \cdot ч,$$

где

$$f_в = \frac{8{,}05 \cdot 75}{100} = 6{,}03\ г/м^3;\ F_\omega$$ при температуре $(8-6) = 2°$, равно 5,29 *г/м³*.

Количество влаги, которое может конденсироваться на внутренней поверхности стен цеха электролиза меди или никеля, составит:

$$P_2 = 21{,}2\,(14{,}82 - 13{,}63) = 25{,}23\ г/м^2 \cdot ч,$$

где

$$f_{в22} = \frac{19{,}83 \cdot 75}{100} = 14{,}82\ г/м^3;$$

$$F_{\omega 16} = 13{,}63\ г/м^3.$$

Количество влаги, которое может конденсироваться на внутренней поверхности стен в банных помещениях, составит:

$$P_3 = 21{,}2\,(23{,}86 - 22{,}38) = 31{,}38\ г/м^2 \cdot ч,$$

где

$$f_{в.30} = \frac{31{,}82 \cdot 75}{100} = 23{,}86\ г/м^3;$$

$$F_{\omega 24} = 22{,}38\ г/м^3.$$

Таким образом, при одинаковой относительной влажности внутреннего воздуха на поверхности наружных стен банных помещений может конденсироваться влаги вдвое больше, чем на стенах фильтровальных станций.

Эти существенные особенности конденсации влаги в помещениях с различной температурой, сильно отражающиеся на влажностном состоянии ограждений, учитываются классификацией температурно-влажностного режима помещений, представленной в табл. III.3.

---

* Экспериментальные исследования, проведенные в Институте строительной физики, установили, что величины коэффициентов тепло-влагообмена и количество конденсирующейся влаги определяются зависимостью между критериями Нуссельта и Грасгофа. Расчет получается достаточно сложным и для практического пользования им требуются специальные номограммы или вспомогательные таблицы.

Полезно обратить внимание на то, что указанные в этой классификации предельные величины относительной влажности для помещений с пониженной температурой, могут быть во многих случаях легко уменьшены при использовании вентиляции (естественной или механической), которая при сравнительно небольших затратах в состоянии существенно снизить влажность воздуха, благодаря его ограниченному влагосодержанию, позволив тем самым применить для ограждающих конструкций таких помещений менее ценные, хотя и менее стойкие против действия влаги строительные материалы.

§ 4. КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ В ПОМЕЩЕНИЯХ

При проектировании зданий и их ограждающих конструкций принимают расчетные значения температуры и влажности внутреннего воздуха, в зависимости от назначения помещений, располагаемых в зданиях.

Такие значения относятся к температуре и влажности в рабочей зоне помещений в холодный период года и устанавливаются нормами в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями к данному помещению. Самые общие сведения о расчетных значениях температуры и влажности в рабочей зоне отдельных видов помещений приведены в табл. III.3.

Фактические значения температуры и влажности внутреннего воздуха в эксплуатируемых зданиях отклоняются от расчетных, не одинаковы в различных зонах помещения и, кроме того, изменяются в пределах годичного, а иногда суточного или даже меньшего периода, в зависимости от наружных условий и особенностей функциональных и технологических процессов, происходящих в помещениях.

В жилых и общественных зданиях, где существенные выделения тепла и влаги отсутствуют, эти отклонения и изменения наименее заметны и ощущаются главным образом в пределах годичного периода, что сказывается на различных значениях температуры и влажности в холодное и теплое время года. При этом в правильно запроектированных и нормально эксплуатируемых зданиях этого вида такие отклонения и изменения в умеренном климате сравнительно невелики* и не приводят к дискомфортным условиям для людей, пребывающих в здании, а также к возникновению каких-нибудь физических явлений на поверхности ограждений, могущих вызвать постепенное разрушение отделочных слоев или даже конструкций в целом.

В частности процессы конденсации влаги на поверхности конструкций или отсутствуют совершенно или не характерны для помещений рассматриваемого здания, они могут быть вызваны лишь теплофизическими дефектами ограждений, нуждающимися в соответствующем устранении. При правильно запроектированных

* $t=18$—$22°$ зимой, до $28°$ летом; при влажности $40\% \pm 10\%$.

ограждающих конструкциях не возникает конденсата на их поверхности и отделочный слой в таких помещениях может быть любым.

В помещениях с естественными изменениями температуры и влажности, преимущественно в годичном цикле, градиенты этих физических параметров в течение суток или других коротких интервалов времени невелики, а условия эксплуатации ограждающих конструкций отличаются неизменными физическими условиями и потому благоприятны в отношении их сохранности.

Наоборот, в помещениях с резкими колебаниями температуры и влажности в течение суток или более коротких периодов можно ожидать возникновения физических процессов, вызывающих постепенное разрушение отделочных слоев и даже ограждающих конструкций в целом (конденсация, температурные деформации, набухание, усушка и т. п.). Неблагоприятные в смысле сохранности конструкции колебания температуры и влажности могут быть вызваны также циклическими изменениями внешних климатических условий в короткие периоды времени, однако в умеренном климате наиболее разрушительными обычно оказываются колебания, вызванные функциональными или технологическими процессами.

Период таких колебаний связан с особенностями функционального процесса; для производственных помещений — это длительность рабочих смен или продолжительность основных рабочих операций, например, плавки металла, загрузки и разгрузки нагревательных колодцев, травильных ванн и других технологических агрегатов.

Естественно, что такие колебания температуры и влажности наиболее характерны для производственных помещений; однако менее интенсивные циклические повышения температуры и влажности могут наблюдаться также и в помещениях гражданских зданий.

В производственных помещениях с большой тепловой напряженностью (например, мартеновские или другие металлургические цехи) под покрытием образуется нагретый слой воздуха, толщина и температура которого периодически увеличиваются при закономерных циклах выпуска, разливки, остывания, обработки или транспорта нагретого металла.

Для таких помещений температура воздуха под покрытием может быть определена как [44]:

$$t_h = t_{р.з} + \Delta t, \qquad \text{(III.18)}$$

где Δt — разность температур под покрытием и в рабочей зоне. Например, для мартеновских цехов (с печами емкостью от 150 до 600 $т$) Δt изменяется от 15 до 30° в зависимости от характера происходящих в цехе технологических операций (минимальное значение Δt — при плавке металла в закрытых агрегатах, максимальное — при его выпуске).

В металлургических цехах, где преобладающая часть тепла (до $^2/_3$ и более) выделяется в виде лучистой составляющей, температу-

ра поверхности верхней части стен и особенно покрытий значительно превышает температуру воздуха.

При неизменной тепловой напряженности в помещении, значения максимальной температуры внутренней поверхности стен и покрытий определяются путем специального теплофизического расчета [3].

При периодическом действии источников тепла поверхность ограждений подвергается циклическому нагреву и остыванию, что более опасно, чем постоянный высокий нагрев, так как приводит к постепенному разрушению конструкций.

В качестве расчетных изменений температурных импульсов на поверхности ограждений принимаются периодические колебания с амплитудой и периодом, зависящими от интенсивности и технологического режима выделений тепла. Например, для конверторных цехов амплитуда составляет около 25° от среднего значения 75° при периоде, примерно, 0,5 *ч*; для цехов нагревательных колодцев, соответственно, около 15° от среднего значения 35° при периоде около 2 *ч* (рис. III.28).

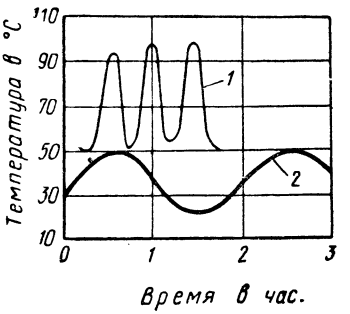


Рис. III.28. Характер изменений температуры в верхней зоне металлургических цехов в летнее время года:

1 — конверторное отделение (A_t = =25°; τ=0,5 *ч*); *2* — цех нагревательных колодцев (A_t =15°; τ=2 *ч*); A_t — амплитуда колебаний температуры; τ — период колебаний

Чем выше нагрев поверхности конструкций и короче период повторения температурных импульсов, тем вероятнее появление трещин и постепенное разрушение ограждений из бетона.

Соответствующие расчеты прогрева и структурных изменений ограждений показывают, что в современных конверторных цехах целесообразны металлические покрытия; железобетонные ребристые плиты, производимые по обычной, применяемой в настоящее время технологии, относительно быстро разрушаются, а рубероидные кровли подвергаются сухой перегонке и постепенному обугливанию (медленному сгоранию).

Различная влажность воздуха в объеме помещений связана не только с характером распространения конвекционного тепла, но также и с изменениями кратности воздухообмена в отдельных зонах.

В зданиях с незначительными выделениями влаги, нормальной влажностью воздуха и естественным воздухообменом (жилых, производственных с холодной обработкой металла и т. д.), наивысшие значения относительной влажности (около 55—60%) характерны для верхней зоны помещений и обычно отмечаются в периоды ослабления действия отопительных систем при температуре наружного воздуха близкой к 0° (т. е. в условиях мягкой зимы или в пе-

реходные периоды года, когда влагосодержание наружного возду достаточно высоко).

При более высокой наружной температуре относительная влажность в помещении уменьшается за счет увеличения кратности естественного воздухообмена, а при очень низкой — за счет интенсификации отопления и осушающего действия активно фильтрующегося наружного воздуха.

Между абсолютным влагосодержанием $f_в$ ($г/м^3$) внутреннего воздуха, влаговыделениями в помещении g ($г/м^3 \cdot ч$), кратностью естественного воздухообмена v ($1/ч$) и абсолютным влагосодержанием наружного воздуха $f_н$ ($г/м^3$) существует следующая зависимость:

$$f_в = \frac{g}{v} + \beta f_н, \qquad \text{(III.19)}$$

где β — отношение объемных весов внутреннего и наружного воздуха.

Этой зависимостью можно пользоваться для определения кратности естественного воздухообмена, необходимой для возможного понижения влажности воздуха, особенно в помещениях с ограниченными и равномерно распределенными выделениями влаги.

Помещения с интенсивными влаговыделениями обычно характеризуются определенной их периодичностью, продолжительность периодов связана с рабочим и технологическим режимом (например, продолжительность и сменность работы и т. д.). Интенсивное удаление средствами аэрации больших количеств периодически выделяющейся влаги возможно в ограниченных пределах и в сравнительно мягких климатических условиях; для удаления больших количеств избыточной влаги средствами недостаточно производительной механической вытяжной вентиляции требуется определенное время.

Во многих производственных помещениях с большими выделениями влаги (например, красильные цехи текстильных фабрик) периодичность изменений температуры и влажности внутреннего воздуха связана с числом смен работы.

Наибольшие повышения влажности отмечаются в середине или конце сменного времени и в холодный период года соответствует максимальной конденсации влаги на поверхности наружных ограждающих конструкций.

При трехсменной работе в таких помещениях продолжительность выпадения конденсата на поверхности ограждений может составлять более половины всей длительности холодного периода года, что связано с увлажнением и разрушением конструкций от влаги и мороза (рис. III.29). Для предупреждения этого следует увеличивать производительность средств удаления влаги из помещения и одновременно защищать ограждения от увлажнения, выполняя их внутреннюю часть из плотных невлагоемких материалов, повышая теплозащитные свойства конструкций и предусматривая средства для отвода стекающей конденсирующейся влаги.

В помещениях с малым воздухообменом, периодическим присутствием большого числа людей и ограниченной кубатурой, относительная влажность из-за увеличившихся выделений влаги может периодически повышаться до величин, соответствующих точке росы на поверхности ограждений.

Если количества конденсирующейся влаги невелики, а периоды времени между повышениями влажности достаточно длительны, целесообразно использование для отделки потолка и стен пористых материалов, обладающих сорбционной влагоемкостью, достаточной для поглощения конденсирующейся влаги. При этом поглощенная и вызвавшая некоторое увлажнение пористой отделки влага будет

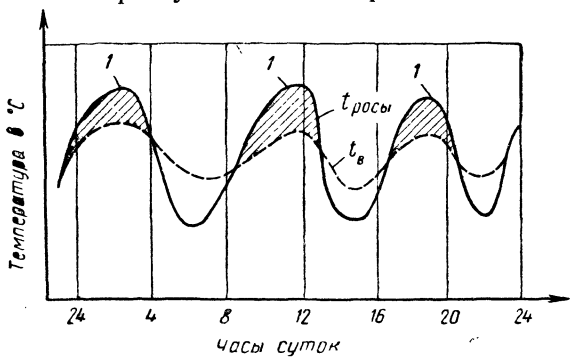


Рис. III.29. Периодическая конденсация влаги на стенах красильных отделений с трехсменной работой (неполное удаление выделяющейся влаги производится местными агрегатами механической вентиляции):

1 — штриховкой отмечены периоды конденсации влаги на поверхности стен; $t_{росы}$ — изменения температуры точки росы; $t_в$ — изменения температуры поверхности стен

испаряться в течение длительных периодов между повышенными влаговыделениями. Подобная отделка уместна, например, для помещений театров и концертных залов, плотно населенных жилых помещений ограниченной высоты, а также для верхней части стен и потолка ванных комнат в жилых квартирах. Целесообразность использования такой отделки для других помещений с периодическими выделениями небольших количеств влаги может быть определена расчетом, учитывающим количество выделений и влагоемкость отделки, а также интенсивность и полноту испарения влаги, поглощенной отделочным слоем в периоды между влаговыделениями.

Клеевая окраска, побелка или бумажные обои, выполненные по поверхности плотного бетона или другого материала, медленно поглощающего влагу, быстро портятся.

Отделка поверхностей ограждений рассматриваемых помещений влагозащитными материалами или составами обычно не применяется по экономическим соображениям. Однако такая отделка

становится единственно возможной и необходимой при непрерывной или периодической, но интенсивной конденсации влаги на поверхности конструкций.

Непрерывная конденсация на поверхности наружных ограждающих конструкций отмечается обычно в тех случаях, когда устойчивое значение относительной влажности воздуха при любых изменениях положительной температуры в помещении, превышает 75%; периодическая, но интенсивная — при нормальной или повышенной температуре и прерывистых влаговыделениях, сопровождаемых резкими колебаниями относительной влажности.

Первый вид конденсации характерен, например, для наружных ограждений помещений фруктохранилищ ($t_в=4°$; $\varphi=90\%$) или

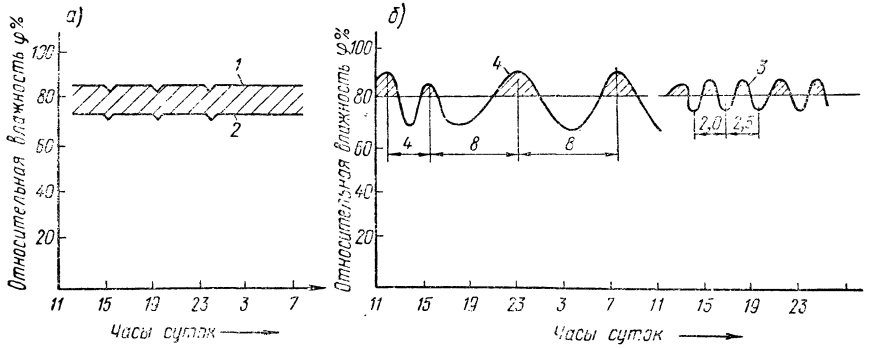


Рис. III.30. Характер конденсации влаги на поверхности наружных ограждающих конструкций травильных отделений (по материалам В. К. Городецкого):

а — в отделениях с непрерывным травлением; *б* — в отделениях с периодическим травлением; *1* — относительная влажность воздуха помещения; *2* — относительная влажность, соответствующая точке росы на поверхности ограждающих конструкций (заштрихованы эпюры непрерывной или периодической конденсации); *3* — конденсация с периодом 2—2,5 *ч*; *4* — конденсация с периодом 4—8 *ч*

травильных отделений с непрерывным травлением металлических деталей (рис. III.30, *а*); второй — для душевых, бань, прачечных, а в промышленных зданиях для красильных и травильных отделений с периодическим технологическим процесом (рис. III.30, *б*). При этом периодическая обильная конденсация более разрушительна для ограждающих конструкций, чем непрерывная, но менее интенсивная. Циклическое увлажнение, чередующееся с процессами частичного высыхания, вызывает быстрое разрушение многих видов влагоизоляционных слоев и наибольшие нарушения структуры пористых материалов, расположенных под этими слоями. Разрушительные процессы во много раз ускоряются в присутствии агрессивных химических примесей, растворяемых влагой.

Возможность эффективной и длительной защиты ограждающих конструкций от разрушительного действия конденсационных процессов осложняется тем обстоятельством, что в строительстве до самого последнего времени применялись весьма несовершенные

средства влагозащиты (например, цементная штукатурка, окрасочные пленки, наносимые в один-два слоя, а в нижней части стен — глазурованные керамические плитки, приораживаемые на обычном цементном растворе и т. д.).

Эти виды влагозащиты не в состоянии полностью предохранить ограждающие конструкции в течение длительного времени от проникания влаги, конденсирующейся на их поверхностях, обращенных в помещение.

При интенсивной периодической конденсации влаги непроницаемость таких влагозащитных слоев сохраняется лишь в течение срока, измеряемого месяцами или ограниченным числом лет; далее в результате возникновения микротрещин она нарушается, а ограждающие конструкции с предполагаемым сроком службы в десятки (и даже сотни лет) увлажняются и подвергаются преждевременному разрушению. Возобновление влагозащитных слоев, производимое по влажной поверхности пористых материалов, малоэффективно и обычно не обеспечивает надежной и длительной защиты.

Более совершенными являются непроницаемые отделочные слои из рулонных пластикатов с герметизируемыми швами или многослойная (в 6—8 слоев) изоляция из высокомолекулярных смол с большой адгезионной способностью (эпоксидных и аналогичных им). Однако такие отделочные средства дороги и пока мало распространены в строительстве.

Необходимость применения стойких (против постепенного разрушения) изолирующих материалов для помещений с явно выраженными процессами конденсации влаги на ограждающих поверхностях продолжает оставаться весьма актуальным вопросом, связанным с проблемой повышения долговечности конструкций.

В производственных зданиях с незначительными выделениями влаги, на изменения относительной влажности внутреннего воздуха в течение года закономерно влияют колебания кратности естественного воздухообмена и влагосодержания наружного воздуха.

Экспериментальные исследования внутреннего температурно-влажностного режима таких промышленных зданий, как отапливаемые цехи станочной обработки металла, показали, что наивысшие значения относительной влажности (около 60%) характерны в переходные периоды года при температуре наружного воздуха, близкой к 0°.

Наименее благоприятные эксплуатационные условия для ограждающих конструкций (с точки зрения их влажностного режима) создаются при температуре от 0 до —10°. При этих значениях наружной температуры влажность воздуха помещений, сообщающихся с внешней средой, наиболее высока, диффузия водяного пара в ограждающих конструкциях наиболее интенсивна,* а конденсация влаги на остеклении фонарей при наружной температуре выше

---

* Из-за высоких значений разности парциальных давлений и повышенных величин коэффициентов переноса влаги для более влажных материалов и конструкций.

$-10°$ наиболее вероятна, но как раз особенно нежелательна, т как влага конденсируется в жидкой фазе и капли могут отрываться и падать в рабочую зону. При более низкой температуре процесс конденсации на одинарном остеклении проявляется в выпадении инея, который при достаточном воздухообмене в цехе не тает, а испаряется (сублимируется), переходя непосредственно в парообразную фазу.

Изучение изменений температуры и влажности воздуха в производственных помещениях с фонарями верхнего света показывает, что при расчетах конденсации влаги на поверхности ограждающих конструкций, которая могла бы происходить при низкой экстремальной температуре наружного воздуха, расчетное значение $\varphi_в$ следует принимать с понижающим коэффициентом (например, 0,75) от максимальной величины, возможной в данном помещении.

Понижение влажности внутреннего воздуха в периоды устойчивых и сильных морозов характерно для любых помещений с естественным воздухообменом.

В зданиях с ограниченной герметизацией ограждающих конструкций такое понижение влажности при низкой температуре наружного воздуха является неизбежным следствием увеличения теплового напора и усиления инфильтрации.

В жилых домах герметизация ограждающих конструкций выше, чем в производственных зданиях с использованием аэрации. Однако и в этих домах с менее проницаемыми ограждающими конструкциями и более стабильным режимом отопления отмечается повышение влажности внутреннего воздуха (при наружной температуре близкой к 0°) по сравнению с влажностью в более холодные периоды зимы. В особенности существенно такое повышение к концу холодного периода года, когда влажность материалов наружных стен достигает наибольшего значения. Исследованиями температурно-влажностного состояния жилых помещений в Москве, проведенными Б. Ф. Васильевым, установлено, что в марте средняя относительная влажность воздуха этих помещений выше, чем в январе на 12—15%.

В устойчиво влажных районах, где повышенное влажностное состояние стен к весеннему периоду является не только результатом диффузионного увлажнения в течение холодного периода года, но в большой мере связано с высокой влажностью наружного воздуха и непосредственным увлажнением стен дождями, относительная влажность в помещениях возрастает до предельно высоких значений — 80—85%. Подобное положение характерно, например, для жилых зданий во Владивостоке,* где наступление весны сопровождается устойчивыми ветрами, несущими влагу с Тихого океана.

Такая же предельно высокая влажность отмечается в жилых помещениях с длительно засыревшими стенами, независимо от причин этого нежелательного явления.

---

* По данным Н. С. Рябова.

Проведенные в период с 1958 по 1972 г. исследования в современных многоэтажных жилых домах с поквартирным заселением подтвердили общую зависимость значений влажности в помещениях от разности температур внутреннего и наружного воздуха. Чем выше такая разность и создаваемый ею тепловой напор, тем меньше относительная влажность.

Наряду с этим, исследования установили, что существует общее понижение относительной влажности воздуха жилых помещений в холодный период года, связанное с массовым применением в строительстве современных систем центрального отопления, а также с посемейным заселением квартир и повышением нормы жилой площади на каждого человека.

Особенно низкие значения относительной влажности индивидуальных квартир многоэтажных домов отмечены в районах с суровой зимой, где усиленная инфильтрация, а также поддерживаемая в помещениях повышенная температура, физиологически необходимая при предельно охлажденной поверхности стен, способствуют сухому состоянию воздуха.

В настоящее время действующими нормами установлены для жилых помещений в умеренных климатических условиях температура $+18°$ и относительная влажность 55%. В местностях с суровой зимой (средняя температура пятидневки $-31°$ и ниже) расчетная температура жилых помещений повышается до $+20°$. Весьма вероятно, что эти нормируемые значения в дальнейшем будут еще более дифференцированы в зависимости от особенностей климата.

Опыт эксплуатации жилых зданий и данные натурных исследований дают право считать, что нормируемые температуры внутреннего воздуха следовало бы более решительно повышать для больших значений ΔT, снижая вместе с тем величины $\varphi_в$.

Так, например, при $\Delta T=60°$ (Новосибирск, Кузнецк и др.) ближе к действительности будут параметры $t_в=22°$ и $\varphi_в=50\%$, а для предельно большой величины $\Delta T=75°$ (Якутск) — $t_в=24°$ и $\varphi_в=45\%$.

Прогрессивными следует считать гигиенические нормы микроклимата жилищ, разработанные институтами Академии Медицинских Наук СССР.

Этими нормами для холодных районов устанавливается внутренняя температура до $+22°$ при $\varphi_в$ до 45%.

Наименьшее влияние наружных климатических условий и общего температурного перепада на влажность помещений отмечается в безоконных и бесфонарных промышленных зданиях, где более высокая степень герметичности ограждающих конструкций позволяет обеспечивать необходимые параметры внутреннего воздуха, независимо от внешних условий.

Отапливаемые здания этого типа являются особенно целесообразными в районах с резко выраженными неблагоприятными климатическими влияниями (Заполярье, крайние юго-восточные районы СССР и т. д.), а также для размещения производственных процессов, требующих кондиционирования температуры и влажности.

ГЛАВА IV

НЕОБХОДИМЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 1. СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОРОДНЫХ В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ

Наиболее распространенными видами конструкций однородных в теплофизическом отношении, т. е. обладающих равными теплофизическими свойствами в любом поперечном сечении, являются ограждения с параллельными, ограничивающими их поверхностями и размерами по длине и высоте во много раз превышающими толщину.

Однородные конструкции выполняются из какого-либо одного материала (рис. IV.1, *а*) или могут быть слоистыми, состоящими

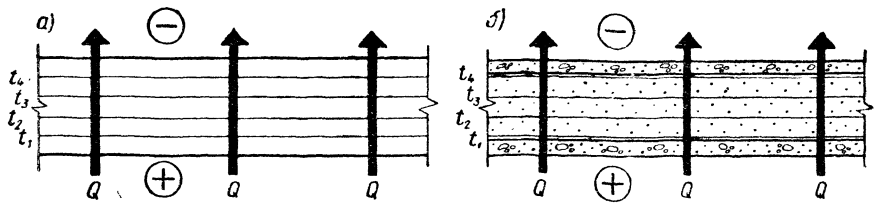


Рис. IV.1. Схема распределения температур и одномерного направления потоков тепла в плоских ограждающих конструкциях, однородных и теплофизическом отношении:

а — конструкция, выполненная из одного материала; *б* — конструкция слоистая, выполненная из различных материалов; t_1—t_4 — изолинии распределения температур; Q — одномерное направление потока тепла, нормальное к изолиниям температур

из нескольких конструктивных слоев, осуществленных из различных материалов, но расположенных параллельно внешним поверхностям, ограничивающим конструкцию (рис. IV.1, *б*).

В любом сечении однородных конструкций их теплозащитные качества, выражаемые величиной сопротивления теплопередаче, равны; отличительным свойством распределения температур при установившейся теплопередаче через такую конструкцию является параллельность изотерм друг другу и ограничивающим поверхностям.

Распространение тепла, которое происходит в направлении, нормальном к изотермам, возможно только в одном направлении, или, иначе говоря, всегда является одномерным. Изменения температур являются функцией только одной координаты, т. е. $t=f(x)$.

Расчет необходимых теплозащитных свойств однородных ограж-

дающих конструкций при установившемся потоке тепла сводится к определению необходимого сопротивления одномерной теплопередаче в любом произвольном сечении.

Это необходимое сопротивление теплопередаче должно превышать требуемую нормами величину сопротивления, устанавливаемую при равенстве потоков тепла в любой плоскости поперечного сечения, из выражения (I.24а). Из этого выражения следует, что

$$R_o^{тр} = \frac{t_в - t_н}{t_в - t_{в.п}} R_в \; град \cdot м^2 \cdot ч/ккал. \qquad (IV.1)$$

Это равенство используется для нормирования теплозащитных свойств ограждающих конструкций, однородных в теплофизическом отношении.

Требуемое минимальное сопротивление ограждающих конструкций теплопередаче $R_o^{тр}$ принимается на основе ограничения физических факторов, влияющих неблагоприятным образом на условия пребывания людей в помещении.

Основной нормируемый гигиенический параметр в равенстве (IV.1) — это перепад температур внутреннего воздуха и поверхности конструкции, обращенной в помещение, т. е. величина $t_в - t_{в.п}$, влияющая на особенности теплообмена.

Эта величина устанавливается в зависимости от назначения помещения и вида ограждающей конструкции. Чем меньше нормируемая величина перепада $t_в - t_{в.п}$, тем более значительным сопротивлением теплопередаче обладает ограждающая конструкция, но обычно тем выше ее стоимость.

В помещениях жилых и общественных зданий на поверхности наружных стен нормами не допускается перепад более 6°, а на поверхности чердачных перекрытий — более 4,5°. Такие величины температурных перепадов обеспечивают некоторое ограничение резкого ощущения холода (холодной радиации) от поверхности ограждений в наиболее суровые периоды зимы.

Эти наибольшие допустимые величины температурных перепадов целесообразно уменьшать (т. е. повышать требуемое сопротивление теплопередаче) во всех тех случаях, когда длительность суровых периодов зимы велика, предельно допустимая холодная радиация в помещении продолжительна, а эксплуатационные расходы на отопление здания становятся повышенными из-за чрезмерной стоимости отопительных систем и топлива.

В отапливаемых производственных помещениях, где люди заняты физической работой, что связано с выделением большого количества тепла человеческим организмом, температурные перепады на поверхности ограждений допускаются до 7—8 и даже 10°.

При высокой влажности воздуха в помещении температура на поверхности конструкций ниже точки росы * не может быть допущена, во избежание конденсации влаги.

---

* Точка росы $t_{росы}$ — температура, при которой содержащийся в воздухе водяной пар достигает насыщения (относительная влажность 100%).

Нормируемые величины температурных перепадов приведены в табл. IV.1.

Таблица IV.1

Нормируемые величины температурного перепада $t_в - t_{в.п} = \Delta t_в$

Вид помещений и зданий	$\Delta t_н$, *град*	
	для наружных стен	для бесчердачных покрытий и чердачных перекрытий
	не более	
Жилые помещения, а также помещения общественных зданий (больниц, поликлиник, детских яслей садов и школ)	6	4,5
Помещения общественных зданий (за исключением указанных выше), административных зданий, а также вспомогательные здания и помещения промышленных предприятий, за исключением помещений влажных и мокрых	7	5,5
Отапливаемые помещения производственных зданий с расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха менее 50%	10	8
То же, но с расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха от 50 до 60%	8	7
Помещения производственных зданий с избыточными тепловыделениями и расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха не более 45%	12	12
Помещения производственных зданий (промышленных, сельскохозяйственных и т. п.) с расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха выше 60%:		
а) в которых не допускается конденсация влаги на внутренних поверхностях стен и потолков	$t_в - t_{росы}$	$t_в - t_{росы}$
б) в которых не допускается конденсация влаги на внутренних поверхностях потолков	7	$t_в - t_{росы}$

При теплофизическом расчете ограждающих конструкций, на которые непосредственно воздействует наружная воздушная среда, в формуле (IV.1) принимается значение $t_н$, соответствующее расчетной температуре наружного воздуха для конструкции рассматриваемой массивности. Однако теплофизический расчет может производиться и для ограждений, отделяющих отапливаемые помещения от холодного чердака, подвала и подполья, где температура воздуха близка к наружной.

В этих случаях к расчетной температуре $t_н^{расч}$, входящей в формулу (IV.1), уместно вводить коэффициент $n \approx 0{,}9$ для чердачных перекрытий и $n \approx 0{,}75$ для перекрытий над холодными непроветриваемыми подпольями.

С учетом этого практического уточнения формула (IV.1) может быть представлена в следующем виде *:

$$R_0^{тр}=\frac{(t_в-nt_н^{расч})}{t_в-t_{в.п}}R_в \; град\cdot м^2\cdot ч/ккал. \qquad (IV.1а)$$

Фактическое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, вычисленное по формуле (I.23), должно во всех случаях превышать величину, установленную по (IV.1 или IV.1а), или, по крайней мере, быть равным этой величине.

Основным требованием расчета однородной в теплофизическом отношении конструкции при установившемся потоке тепла является соблюдение условия:

$$R_0=R_в+\sum\frac{\delta}{\lambda}+R_н\geqslant\frac{t_в-nt_н^{расч}}{t_в-t_{в.п}}R_в \; град\cdot м^2\cdot ч/ккал. \qquad (IV.2)$$

§ 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В строительной практике далеко не всегда применяются ограждающие конструкции, поперечное сечение которых на любом участке их площади неизменно и соответствует конструктивной схеме, принятой для теплофизических расчетов.

Для многих современных конструкций недопустимо принимать для теплофизического расчета конструктивную схему, относящуюся к преобладающей и наиболее благополучной части ограждения, оставляя без внимания его пониженные теплозащитные свойства на других участках, например, в местах конструктивных ребер, стыков и сопряжений.

На таких отдельных участках поперечное сечение ограждающей конструкции часто состоит из других более теплопроводных материалов и обладает меньшим сопротивлением теплопередаче.

В этих случаях задачей теплофизического расчета является:

а) определение средней приведенной величины сопротивления теплопередаче: именно эта величина должна превышать требуемое нормами сопротивление; б) определение необходимых теплозащитных свойств наименее утепленных участков конструкции в целях обеспечения температур выше точки росы на их поверхности и исключения образования конденсата.

---

* В главе СНиП «Строительная теплотехника» коэффициент n вводится к разности температур $t_в-t_н$, т. е. выражение для $R_0^{тр}$ представляется в виде:

$$R_0^{тр}=\frac{(t_в-t_н)n}{t_в-t_{в.п}}R_в.$$

Для практических целей это приемлемо, но физический смысл введения поправочного коэффициента к разности температур (в то время как изменяться может только наружная температура) несколько утрачивается.

Теплофизический расчет неоднородных ограждающих конструкций совершенно необходим для многих современных конструкций, выполняемых из крупных элементов (панельных, щитовых и т. д.).

Определение сопротивления теплопередаче таких конструкций по оптимальному характерному сечению дает завышенные результаты, существенно отличающиеся от действительных значений, получаемых при рассмотрении неоднородной ограждающей конструкции в целом.

При расчете общего сопротивления теплопередаче неоднородных конструкций различают два случая. Первый, более простой случай, относится к конструкциям, которые на отдельных (сравнительно небольших по площади) участках пересекаются по всей толщине

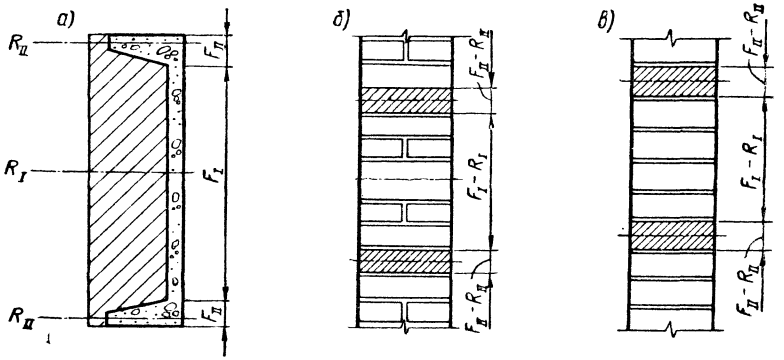


Рис. IV.2. Простейшие неоднородные ограждающие конструкции:
а — панельные конструкции с ребрами по контуру; *б* — стены с прокладными рядами из плотных теплопроводных материалов; *в* — заполнение стен по элементам бетонного каркаса или фахверка

конструктивными элементами с несколько большей теплопроводностью, чем преобладающая часть конструкции.

Таковы, например, стены с прокладными рядами, заполнение железобетонного каркаса или фахверка, панельные конструкции с обрамлениями или ребрами по контуру панели и т. д. (рис. IV.2).

В этом случае по поверхности ограждающей конструкции определяется площадь, занимаемая каждым характерным конструктивным элементом (F_I, F_{II} и т. д.), и по формулам (I.22) и (I.22а) вычисляется термическое сопротивление каждого такого конструктивного элемента (R_I, R_{II} и т. д.). После этого среднее приведенное значение термического сопротивления неоднородного ограждения в целом вычисляется по приближенной формуле:

$$R_{\text{расч}} = \frac{F_I + F_{II} + \ldots + F_n}{\frac{F_I}{R_I} + \frac{F_{II}}{R_{II}} + \ldots + \frac{F_n}{R_n}}, \qquad \text{(IV.3)}$$

а общее сопротивление теплопередаче — по формуле (I.23). Второй, более сложный случай, относится к конструкциям неоднородным в двух измерениях (например, стены из пустотелых камней и т. д.).

Теплофизический расчет таких ограждающих конструкций производится последовательно двумя различными приемами: а) путем вычисления среднего приведенного термического сопротивления при мысленной разрезке конструкции на отдельные характерные участки плоскостями, параллельными основному направлению потока тепла; при этом термические сопротивления отдельных участков находятся по формуле (I.22а), т. е.:

$$R=\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\ldots+\frac{\delta_n}{\lambda_n},$$

а среднее приведенное значение $R_{\parallel}$ термического сопротивления для конструкции в целом определяется по формуле (IV.3); б) путем вычисления среднего приведенного термического сопротивления при мысленной разрезке конструкции плоскостями, перпендикулярными основному направлению потока тепла, на отдельные характерные слои, которые могут состоять или из одного материала, или из нескольких. Для слоев, состоящих из нескольких материалов, вычисляется средний приведенный коэффициент теплопроводности по формуле:

$$\lambda=\frac{\lambda_1F_1+\lambda_2F_2+\ldots+\lambda_nF_n}{F_1+F_2+\ldots+F_n}, \qquad \text{(IV.4)}$$

где λ_1, λ_2, ..., λ_n — коэффициенты теплопроводности материалов; F_1, F_2, ..., F_n — площади, занимаемые в конструкции или характерном ее участке этими материалами (их выражают в процентах, принимая общую сумму площадей за 100%).

Термическое сопротивление однородных слоев определяется при этом виде разрезки по обычной формуле (I.22), а термическое сопротивление конструкции в целом $R_{\perp}$ получается суммированием сопротивлений отдельных слоев.

Для ограждающих конструкций, у которых величины $R_{\parallel}$ и $R_{\perp}$ отличаются друг от друга не более, чем на 25—40%, расчетное значение термического сопротивления $R_{\text{расч}}$ может быть вычислено по приближенной формуле:

$$R_{\text{расч}}=\frac{R_{\parallel}+2R_{\perp}}{3}. \qquad \text{(IV.5)}$$

В тех случаях, когда ограждающая конструкция состоит из одинаковых повторяющихся изделий (например, пустотных камней), целесообразно вычислить средние приведенные термические сопротивления этих изделий, после чего теплофизический расчет сопротивления теплопередаче может быть произведен как для обычной слоистой конструкции.

Пример IV.1. Определить сопротивление теплопередаче стены толщиной 0,19 *м* из шлакобетонных камней со щелевидными пустотами, утепленной с внутренней поверхности плитами из фибролита толщиной 0,07 *м* и покрытой наружной и внутренней штукатуркой (рис. IV.3). Стена проектируется для помещений с нормальной влажностью и умеренного наружного климата.

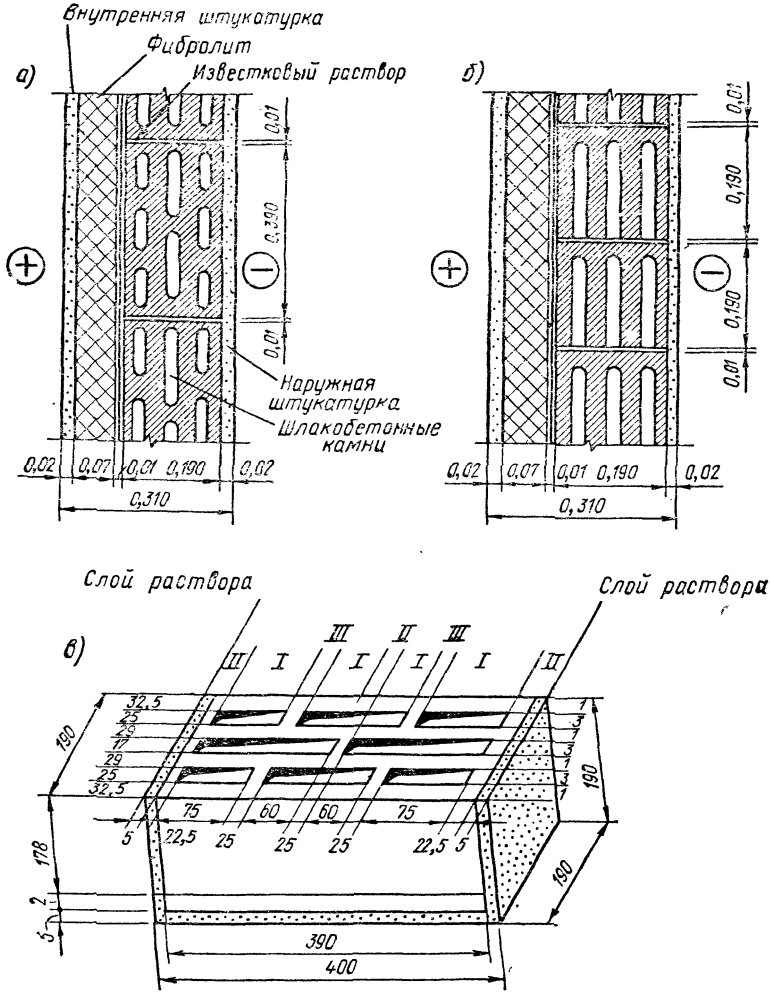


Рис. IV.3. Конструктивная схема неоднородной стены (из шлакобетонных камней, утепленной фибролитом):

а — план стены; *б* — разрез стены; *в* — расчетная схема шлакобетонного камня со щелевидными пустотами

Приняты коэффициенты теплопроводности: 1) шлакобетона с объемным весом 1600 *кг/м*^{3} $\lambda_1=0{,}65$ *ккал/м·ч·град*; 2) раствора известково-песчаного 1550 *кг/м*^{3} $\lambda_2=0{,}65$ *ккал/м·ч·град*; 3) фибролита с объемным весом 350 *кг/м*^{3} $\lambda_3=0{,}14$ *ккал/м·ч·град*; 4) известковой внутренней штукатурки с объемным весом 1600 *кг/м*^{3} $\lambda_4=0{,}60$ *ккал/м·ч·град*; 5) наружной штукатурки с объемным весом 1700 *кг/м*^{3} $\lambda_5=0{,}75$ *ккал/м·ч·град*.

Расчетная схема камня со щелевидными пустотами с разбивкой на отдельные характерные участки и слои изображения на рис. IV.3, *в*. Определяем среднюю приведенную величину термического сопротивления камня.

А. Расчет при разрезке плоскостями, параллельными потоку тепла.

Участок I. Наружные и внутренние шлакобетонные стенки камня и три щелевидных пустоты со средним термическим сопротивлением 0,20 *град м*^{2} *· ч/ккал* каждая.

Общая площадь участка *I*, через которую проходит поток тепла:

$$F_{\text{I}} = [(7{,}5\cdot 2) + (6{,}0\cdot 2)]\,17{,}8 = 480{,}6 \ см^2.$$

Термическое сопротивление

$$R_{\text{I}} = \frac{0{,}065 + 0{,}058}{0{,}65} + 0{,}20\cdot 3 = 0{,}19 + 0{,}60 = 0{,}79.$$

Участок II. Наружные шлакобетонные поперечные стенки камня и вертикальные швы раствора:

$$F_{\text{II}} = (2{,}25\cdot 2 + 0{,}5\cdot 2)\,17{,}8 = 97{,}9 \ см^2;$$

$$R_{\text{II}} = \frac{0{,}19}{0{,}65} = 0{,}29.$$

Участок III. Наружные и внутренние шлакобетонные стенки камня и одна центральная щелевидная пустота:

$$F_{\text{III}} = (2{,}5\cdot 2)\,17{,}8 = 89 \ см^2;$$

$$R_{\text{III}} = \frac{0{,}173}{0{,}65} + 0{,}20 = 0{,}27 + 0{,}20 = 0{,}47.$$

Участок IV. Наружные и внутренние шлакобетонные стенки по оси симметрии камня и две щелевидных пустоты:

$$F_{\text{IV}} = 2{,}5\cdot 17{,}8 = 44{,}5 \ см^2; \ R_{\text{IV}} = \frac{0{,}140}{0{,}65} + 0{,}20\cdot 2 = 0{,}22 + 0{,}40 = 0{,}62.$$

Участок V. Горизонтальная шлакобетонная диафрагма камня и раствор горизонтального шва:

$$F_{\text{V}} = (1{,}2 + 1{,}0)\,40 = 88 \ см^2; \ R_{\text{V}} = \frac{0{,}190}{0{,}65} = 0{,}29.$$

Сумма площадей характерных участков $\Sigma F = 480{,}6 + 97{,}9 + 89 + 44{,}5 + 88 = 800$ *см*², т. е. равна общей боковой вертикальной поверхности камня, уложенного на растворе в стену, $40 \cdot 20 = 800$ *см*².

Термическое сопротивление пустотного камня, уложенного в стену, по расчету при разрезке конструкции плоскостями, параллельными потоку тепла:

$$R_{II} \frac{800}{\frac{480{,}6}{0{,}79} + \frac{97{,}9 + 88}{0{,}29} + \frac{89}{0{,}47} + \frac{44{,}5}{0{,}62}} = \frac{800}{1512{,}5} = 0{,}53 \text{ } град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Б. Расчет при разрезке плоскостями, перпендикулярными потоку тепла

Слой 1. Продольные шлакобетонные стенки камня с учетом швов раствора и горизонтальной диафрагмы.

Площадь шлакобетона, через которую проходит поток тепла: $F_{1,\,ш} = 39 \cdot 19 = 741$ *см*²; площадь раствора: $F_{1,\,р} = 19 + 40 = 59$ *см*². Полная площадь $F_1 = 800$ *см*². Термическое сопротивление

$$R_1 = \frac{0{,}065 + 0{,}058}{0{,}65} = 0{,}19.$$

Слои — 2 и 3. Щелевидные пустоты камня с учетом разъединяющих их шлакобетонных стенок, а также швов раствора и горизонтальной диафрагмы.

1) Приведенная площадь воздушных прослоек:

$$F_{2,в} = \frac{(7{,}5 \cdot 2 + 14{,}5)\,2 + [390 - (45 + 25)]}{3}\,17{,}8 = 539 \text{ } см^2.$$

2) Площадь шлакобетона и раствора:

$$F_{2,ш} = \left(\frac{4{,}5 \cdot 3}{3} + \frac{2{,}5 \cdot 5}{3}\right)17{,}8 + 40 + 20 + 1{,}2 \cdot 39 = 261 \text{ } см^2.$$ Итого 800 *см*².

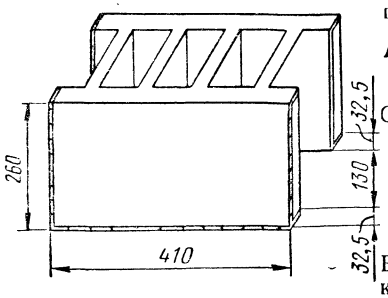


Рис. IV.4. Расчетная схема трехпустотного камня (с пустотами значительных размеров)

Термическое сопротивление воздушных прослоек $R_{в.п} = 0{,}20 \cdot 3 = 0{,}60$; шлакобетона $R_{ш} = \frac{0{,}067}{0{,}65} = 0{,}10$.

Среднее значение термического сопротивления:

$$R_{2,3} = \frac{800}{\frac{539}{0{,}60} + \frac{261}{0{,}10}} = 0{,}23.$$

В целом термическое сопротивление пустотного камня, уложенного в стену, по расчету при разрезке конструкции плоскостями, перпендикулярными потоку тепла: $R_{\perp} = 0{,}19 + 0{,}23 = 0{,}42$ *град* · *м*² · *ч/ккал*.

Расчетное значение термического сопротивления шлакобетонного камня в стене, полученное по формуле (IV.5), на основании приведенных выше двух приемов расчета:

$$R_{расч} = \frac{0{,}53 + 2 \cdot 0{,}42}{3} = 0{,}46 \text{ } град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Тогда среднее расчетное значение коэффициента теплопроводности шлакобетонного камня со щелевидными пустотами и глухой горизонтальной диафрагмой:

$$\lambda_{ср} = \frac{0{,}190}{0{,}46} = 0{,}41 \ ккал/м \cdot ч \cdot град.$$

Общее сопротивление теплопередаче всей слоистой конструкции в целом:

$$R_0 = 0{,}133 + \frac{0{,}02}{0{,}60} + \frac{0{,}07}{0{,}14} + \frac{0{,}190}{0{,}41} + \frac{0{,}02}{0{,}75} + 0{,}05 = 1{,}20 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Аналогичный расчет шлакобетонного трехпустотного камня с пустотами значительных размеров (рис. IV.4) показывает, что расчетное значение коэффициента теплопроводности, практически равное полученному выше значению для камня со щелевидными пустотами ($\lambda_{ср}=0{,}42$ *ккал/м·ч·град*), может быть получено только при заполнении шлаком трех крупных пустот каждого камня.

Слоистая конструкция стены с камнями, засыпанными шлаком, более трудоемка, а потому применение камней со щелевидными пустотами, не нуждающимися в засыпке, более предпочтительно.

§ 3. ДВУМЕРНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Простейшие расчетные формулы распределения температур в ограждениях зданий относятся к установившимся условиям теплопередачи через плоскую и протяженную ограждающую конструкцию, обладающую теплотехнической однородностью по всей своей площади. Изменения значений температуры происходят только по поперечному сечению такой конструкции, изотермы располагаются в плане параллельно ограничивающим стену поверхностям, а распространение тепла одномерно, т. е. имеет место только в одном, нормальном к этим изотермам направлении.

В действительности даже для однородных конструкций характерны отдельные участки с более сложным распределением температур, поскольку в здании имеются проемы, углы, пересечения стен. Условия теплообмена на притолоках простенков, в наружных углах зданий и в местах примыкания к наружным ограждениям поперечных стен или перегородок искажают простейшее температурное поле, изотермы утрачивают параллельность, а поток тепла — одномерность (рис. IV.5).

Температурное поле становится более сложным даже для простейших однородных конструкций из-за геометрического разнообразия их формы в плане.

В частности на условия теплопередачи влияет геометрическая форма наружных углов зданий. Она связана с уменьшением площади тепловосприятия и увеличением площади теплоотдачи, а также с понижением коэффициента тепловосприятия $\alpha_в$ из-за меньшей интенсивности конвекционных токов воздуха и лучистого теплообмена.

Температуры на внутренней поверхности угла ниже температур глади стены на 4—6°, что при отсутствии в наружных углах вертикальных труб центрального отопления приводит к отсыреванию углов, а в недостаточно отапливаемых зданиях — даже к появлению инея в наиболее холодные периоды зимы.

Устранение этих недопустимых явлений путем специального обогрева наружных углов отопительной системой связано с дополнительными потерями тепла. Распределение температур в простенках свидетельствует о сильном охлаждении поверхностей притолок, что в жилых и общественных зданиях не приводит к образованию кон-

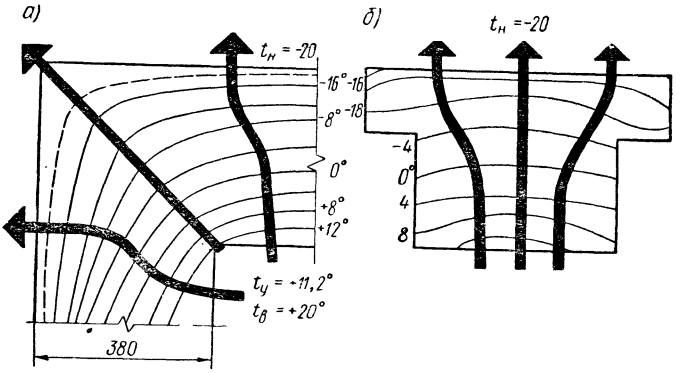


Рис. IV.5. Двумерные (плоские) температурные поля геометрически сложных элементов однородных наружных стен:
а — наружного угла; *б* — простенка

денсата на этих поверхностях только из-за теплоотдачи отопительных приборов и пониженного влагосодержания холодного воздуха, фильтрующегося через оконные переплеты.

Еще более сложным образом располагаются изолинии температур в сопряжениях и углах современных индустриальных конструкций.

Как уже говорилось ранее, такие конструкции часто неоднородны в теплофизическом отношении и распределение температур в их горизонтальной или вертикальной проекции выражается криволинейными изотермами, т. е., иначе говоря, является функцией от двух координат, одна из которых направлена от поверхности конструкции, обращенной в помещение, к наружной поверхности, а другая — параллельна этим поверхностям, т. е. $t = f(x, y)$.

В гл. I указывалось, что описывающее такое распределение температуры, дифференциальное уравнение Лапласа для двумерного температурного поля (при установившемся распределении температур в однородной материальной среде), выражается в виде:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0. \qquad \text{(I.8а)}$$

В неоднородной материальной среде дифференциальное уравнение плоского температурного поля имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y}\right)=0, \qquad \text{(IV.6)}$$

здесь λ является непрерывной функцией x и y.

Применяемый для решения уравнения (I.8а) метод конечных разностей дает возможность заменить непрерывное изменение λ — скачкообразным.

Применение метода конечных разностей обычно связано с нанесением на рассматриваемую проекцию конструкции расчетной сетки, что позволяет вычислить температуры в ее пересечениях.

Такую сетку чаще всего выбирают квадратной; желательно, чтобы стороны квадратов совпадали с поверхностью ограждения или его характерных элементов.

Сторона каждого квадрата может быть принята равной величине Δ; чем меньше эта величина, тем точнее расчет.

Направление одних линий сетки принимается параллельным, а других — перпендикулярным основному направлению потока тепла.

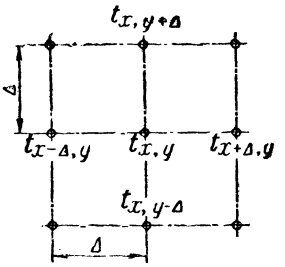


Рис. IV.6. Схема расчетной сетки плоского температурного поля

Уравнению (I.8а) температурного поля в однородной среде соответствует разностное уравнение

$$\frac{\Delta x^2 t}{\Delta x^2}+\frac{\Delta y^2 t}{\Delta y^2}=0. \qquad \text{(IV.7)}$$

Вторые производные заменяются их выражениями через разности, а решение дифференциального уравнения сводится к решению системы обычных линейных уравнений, неизвестными в которых являются температуры в узлах сетки (рис. IV.6).

Написав подробно вторые конечные разности функции t по x и по y, получим

$$\frac{1}{\Delta^2}[t_{x+\Delta,y}-2t_{x,y}+t_{x-\Delta,y}]+\frac{1}{\Delta^2}[t_{x,y+\Delta}-2t_{x,y}+t_{x,y-\Delta}]=0.$$

Решая полученное уравнение относительно $t_{x,y}$, получим:

$$t_{x,y}=\frac{t_{x+\Delta,y}+t_{x-\Delta,y}+t_{x,y+\Delta}+t_{x,y-\Delta}}{4}, \qquad \text{(IV.8)}$$

т. е. на поверхности однородной материальной среды установившаяся температура в каждом узле сетки равна средней арифметической температуре четырех соседних узлов *.

* Поскольку уравнение (I.8а) может быть справедливым для любого физического потенциала переноса энергии или вещества, а не только для температуры,

Формула (IV.8) справедлива только в том случае, если условия передачи тепла от рассматриваемого узла ко всем четырем, соседним с ним, одинаковы, что может иметь место только в материальной среде с одинаковой теплопроводностью во всех направлениях.

Если в рассматриваемом температурном поле имеются материалы с различной теплопроводностью, выбор расчетной сетки производится таким образом, чтобы ее узлы располагались в наиболее характерных точках поля, вычисление температуры в которых сможет установить общую закономерность распределения температур в неоднородной конструкции. Расчетная формула (IV.8) усложняется в этом случае из-за различных значений коэффициентов теплопередачи между рассматриваемой точкой и соседними.

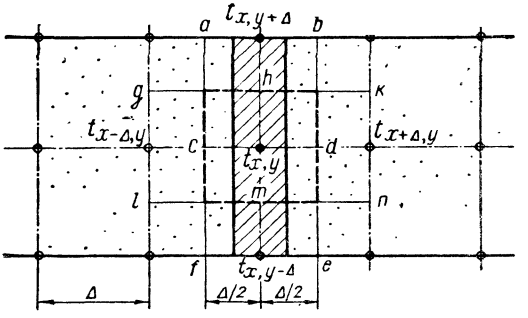


Рис. IV.7. Схема расчета плоского неоднородного температурного поля (в стыке крупных блоков)

Если в зонах передачи тепла от рассматриваемой точки к соседним, расположены материалы с различной теплопроводностью, коэффициенты теплопередачи могут быть вычислены только приближенно на основе практических методов расчета, предложенных К. Ф. Фокиным.

Существо этих практических методов рассмотрено далее на примере передачи тепла от узла $t_{x,y}$ в температурном поле стыка крупных блоков наружной стены (рис. IV.7).

Применительно к произведенной разбивке расчетной сетки может быть выделен квадрат, в центре которого расположен рассматриваемый узел (на рисунке этот квадрат отмечен пунктиром). Этот квадрат обменивается теплом по направлениям к четырем соседним

являющейся потенциалом переноса тепла, формула (IV.8) правомерна и при расчете поля электрического потенциала и даже для изучения распределения давлений в капиллярно-пористой материальной среде.

В этих случаях значения температуры в уравнении (I.8а) заменяются соответственно величинами электрического потенциала или давления, а сопротивления проводимости тепла — соответствующими омическими или капиллярными сопротивлениями.

узлам сетки, температуры в которых равны $t_{x-\Delta,y}$; $t_{x,y+\Delta}$; $t_{x+\Delta,y}$; $t_{x,y-\Delta}$. Количества тепла, перетекающие по этим направлениям, будут зависеть от разности температур в соответствующих узлах и коэффициента теплопередачи (λ/Δ) между этими узлами (обозначенных соответственно $\kappa_{x-\Delta}$; $\kappa_{x+\Delta}$; $\kappa_{y+\Delta}$; $\kappa_{y-\Delta}$).

В установившемся температурном поле, сумма количеств тепла, передаваемых от узла x, y к соседним узлам, должна быть равна нулю и из этого условия может быть получено наиболее общее выражение для $t_{x,y}$, а именно:

$$t_{x,y}=\frac{\kappa_{x-\Delta}t_{x-\Delta,y}+\kappa_{y+\Delta}t_{x,y+\Delta}+\kappa_{x+\Delta}t_{x+\Delta,y}+\kappa_{y-\Delta}t_{x,y-\Delta}}{\kappa_{x-\Delta}+\kappa_{y+\Delta}+\kappa_{x+\Delta}+\kappa_{y-\Delta}}. \quad \text{(IV.9)}$$

Если рассматриваемые смежные узлы расположены в пределах одного материала ($\lambda=\text{const}$), то все четыре коэффициента теплопередачи равны друг другу и выражение (IV.9) превращается в формулу (IV.8). При вычислении коэффициентов теплопередачи между узлами сетки перенос тепла принимается одномерным в пределах квадратов с размером сторон равным Δ, но центральных по отношению к линиям, соединяющим соответствующие узлы.

Так, например, от узла с температурой $t_{x,y}$ к узлам с температурой $t_{x,y+\Delta}$ и $t_{x,y-\Delta}$ передача тепла происходит только в пределах квадратов *abdc* и *cdef*.

Коэффициент теплопередачи этих квадратов, т. е. величина обратная их термическому сопротивлению, определяется как средняя приведенная для элементов, состоящих из двух материалов, с учетом площадей каждого материала, по которым происходит теплообмен.

$$\kappa=\frac{\lambda_{ср}}{\Delta},$$

где $\lambda_{ср}=\frac{\lambda_1F_1+\lambda_2F_2}{\Sigma F}$.

Теплообмен между узлом x, y и узлом $x+\Delta$, y происходит в пределах квадрата *hknm*, а к узлу с температурой $t_{x-\Delta,y}$ в пределах квадрата *ghml*.

Коэффициенты теплопередачи этих квадратов вычисляются как для двухслойной стенки $\left(\kappa=\frac{\lambda_1}{\Delta_1}+\frac{\lambda_2}{\Delta_2}\right)$.

Для квадратов из однородного материала $\kappa=\lambda/\Delta$. В этом случае, если расчетная сетка выбрана таким образом, что узел с температурой $t_{x,y}$ лежит на поверхности конструкции, граничащей с воздушной средой (крайнюю первую нить расчетной сетки обычно совмещают с поверхностью конструкции, обращенной в помещение), коэффициент теплопередачи к воздуху принимается равным соответствующей величине коэффициента теплообмена (тепловосприятия $\alpha_в$ или теплоотдачи $\alpha_н$), т. е. $\kappa=\alpha F_1$; $R=\frac{1}{\alpha F_1}$.

При этом величины коэффициентов теплопередачи к соседним узлам, лежащим в этой плоскости, вводятся в расчет с коэффициентом 0,5, поскольку передача тепла по материалу происходит только по площади $0{,}5\Delta$, а по воздуху, в котором расположена вторая половина квадрата, теплообмен отсутствует.

Температурное поле, вычисленное для определенных значений температур внутреннего $t_в$ и наружного воздуха $t_н$ легко преобразовать для других значений этих температур, поскольку для любой точки n температурного поля

$$t_в - t_n \sim t'_в - t'_н.$$

Описанный выше приближенный метод расчета плоского неоднородного температурного поля значительно облегчается при использовании счетно-решающих устройств (в частности, электроинтеграторов), сокращающих трудоемкую вычислительную работу.

Без применения этих устройств расчет температурного поля производился методом последовательного приближения (итерации). Во всех узлах расчетной сетки устанавливаются ориентировочные значения температуры, назначаемые по интуиции. Затем, пользуясь расчетными формулами (IV.8) или (IV.9), последовательно вычисляют значения температур во всех узлах, заменяя ими предыдущие до тех пор, пока эти значения в каждом узле сетки не будут удовлетворять соответствующим уравнениям.

Процесс расчета заканчивается, когда в пределах заданной точности значения температур становятся неизменяемыми во всех узлах сетки.

Число последовательных приближений, а следовательно, продолжительность и трудоемкость расчета зависят от того, насколько правильными были приняты начальные значения температур.

Моделирование температурных полей. Процессы переноса тепла путем теплопроводности и процессы электропроводности в материальных средах описываются дифференциальным уравнением одного и того же вида.

Для установившихся условий переноса в плоском поле это уравнение, как было указано в гл. I, имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0, \qquad \text{(I.8а)}$$

где Θ — потенциал переноса тепловой энергии (температура) или электроэнергии (электрический потенциал).

Полная аналогия потенциалов переноса определяет соответственную аналогию и для таких физических понятий, как тепловой поток и поток электричества, термическое сопротивление и омическое сопротивление. При этом преимуществом электростатического поля является то обстоятельство, что его параметры могут быть легко и быстро установлены измерительными приборами; аналогичные измерения для температурного поля обычно более затруднительны.

Полная аналогия между процессами переноса тепла и электричества и связанная с этим однотипность дифференциальных уравнений теплопроводности и электропроводности позволяет при расчете температурных полей пользоваться счетно-решающими устройствами типа электроинтегратора.

Электроинтегратор для моделирования плоских двумерных температурных полей представляет собой координатную сетку, между узлами которой могут быть подобраны и включены омические сопротивления, пропорциональные заранее вычисленным термическим сопротивлениям в рассматриваемом температурном поле. Координатная сетка накладывается на все изучаемое сечение ограждающей конструкции. Электроинтегратор присоединяется к сети постоянного тока. Крайние узлы сетки соединяются с токопроводящи-

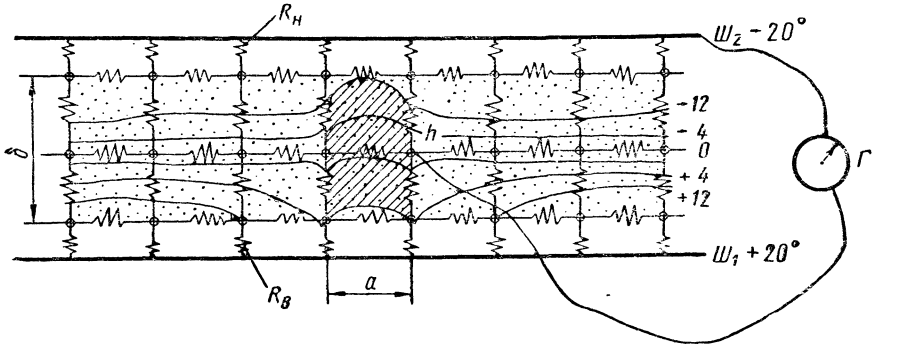


Рис. IV.8. Электромоделирование плоского температурного поля наружной стены со сквозным прямоугольным теплопроводным включением:
$Ш_1$ и $Ш_2$ — токопроводящие шины с разностью потенциалов $\Theta_0 \sim t_в - t_н$; $R_н$ и $R_в$ — омические сопротивления, моделирующие сопротивления теплообмену

ми шинами $Ш_1$ и $Ш_2$, имеющими разность потенциалов Θ_0, пропорциональную разности температур внутреннего и наружного воздуха, $t_в - t_н$.

Омические сопротивления между крайними узлами сетки и шинами подбираются пропорциональными сопротивлениям тепловосприятию и теплоотдаче.

На рис. IV.8 изображено моделирование температурного поля наружной стены с сквозным теплопроводным включением в виде прямоугольного элемента железобетонного каркаса.

Измерение величин электрических потенциалов в узлах сетки производится с помощью гальванометра *Г*, присоединенного к шине, и гибкого контакта, подключаемого к любому из узлов сетки. Гальванометр показывает разность потенциалов между шиной и соответствующим узлом сетки или непосредственно потенциал в узле.

Измеренные величины пропорциональны соответствующей разности температур или значению температур в рассматриваемом узле.

Замерив гальванометром или вычислив на основе замера разность потенциалов Θ_n между $Ш_2$ и узлом n, получим на основании пропорциональности температурных перепадов и разности электрических потенциалов:

$$\frac{t_n - t_н}{t_в - t_н} = \frac{\Theta_n}{\Theta_0},$$

откуда температура в произвольно выбранном узле n будет:

$$t_n = \frac{\Theta_n}{\Theta_0}(t_в - t_н) + t_н. \qquad (IV.10)$$

В узлах электрической модели температурного поля потенциалы, соответствующие искомым температурам, устанавливаются мгновенно после подбора надлежащих омических сопротивлений и включения электроинтегратора в сеть.

Время для проведения подготовленного эксперимента по вычислению температур в узлах плоского поля близко к продолжительности необходимых измерений гальванометром.

Трудоемких последовательных приближений не требуется. Счетно-решающие устройства типа электроинтегратора во много раз сокращают время для решения системы линейных уравнений, что необходимо при расчете температурных полей.

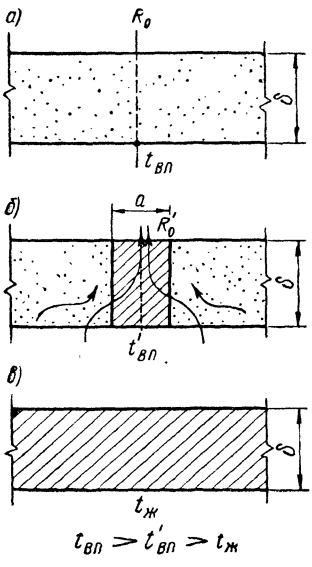


Рис. IV.9. Расчетные схемы конструкций стен: *а* — без теплопроводного включения; *б* — со сквозным теплопроводным включением; *в* — полностью выполненной из материала теплопроводного включения

§ 4. РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Местные понижения температуры на обращенной в помещение поверхности неоднородной ограждающей конструкции, имеющей конструктивные включения из материалов с относительно большей теплопроводностью, чем основная масса материала, могут привести к образованию конденсата. Такими теплопроводными включениями являются элементы бетонного, железобетонного или стального каркасов; в железобетонных слоистых панелях — неутепленные обрамления и контурные ребра жесткости; в утепленных, пустотных и засыпных каменных конструкциях — связующие ряды кладки (например, прокладные ряды), включения плотного материала между пустотами или отдельными участками утепления, сквозные швы тяжелых растворов, применяемых при укладке камней или плит из малотеплопроводных материалов.

В общем случае распределение температур в одной из проекций (чаще всего в плане) конструкции с теплопроводными включениями может быть установлено кратко описанным выше построением плоского температурного поля на основе численного решения дифференциального уравнения Лапласа. Однако для теплопроводных включений простейшей формы (см. схемы в табл. IV.2), пересекающих всю толщину ограждающей конструкции или половину ее, существуют приближенные инженерные расчеты, позволяющие судить о достаточности теплозащитных свойств конструкции.

Основой для разработки таких инженерных методов расчета послужили многочисленные построения двумерных температурных полей ограждающих конструкций, пересекаемых элементами железобетонного каркаса. Обобщение результатов этих построений было выполнено следующим образом.

Если рассмотреть значения температур на поверхности стены: а) по сечению конструкции вдали от теплопроводного включения, $t_{в.п}$ и б) по теплопроводному включению, $t'_{в.п}$; в) полностью выполненной из материала теплопроводного включения, $-t_{ж}$, то будет очевидно, что (рис. IV.9)

$$t_{в.п} > t'_{в.п} > t_{ж}.$$

Результаты построений температурных полей показали, что значение $t'_{в.п}$ зависит главным образом от соотношения ширины включения к толщине стены $\frac{a}{\delta}$; чем меньше это соотношение, тем выше $t'_{в.п}$ и ближе к значению $t_{в.п}$. В пределе, при $a=0$, $t'_{в.п}=t_{в.п}$. Наоборот, чем больше соотношение a/δ, тем ниже $t'_{в.п}$ и ближе к значению $t_{ж}$. При достаточно большом соотношении $\frac{a}{\delta} > 2$; $t'_{в.п}=t_{ж}$.

Можно полагать, что разность температур поверхности стены и поверхности включения $t_{в.п} - t'_{в.п}$ составляет некоторую часть от разности $t_{в.п} - t_{ж}$, т. е.

$$t_{в.п} - t'_{в.п} = \eta (t_{в.п} - t_{ж}), \qquad (а)$$

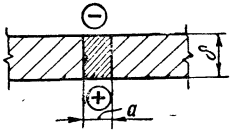
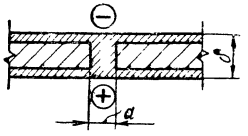
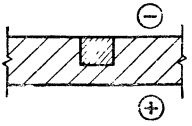
где η — коэффициент, представляющий собой безразмерное соотношение разностей температур $\left(\text{равное} \frac{t_{в.п} - t'_{в.п}}{t_{в.п} - t_{ж}} \right)^*$, характеризующее интенсивность перетекания тепла к теплопроводному включению и зависящее от его геометрической формы, расположения в стене и соотношения a/δ.

Значения коэффициента η для наиболее характерных видов теплопроводных включений принимаются по табл. IV.2.

---

* В числителе разность температур на поверхности конструкции и поверхности теплопроводного включения заданной ширины, а в знаменателе — разность температур на поверхностях конструкции и бесконечно протяженного теплопроводного включения.

Таблица IV.2

Форма и расположение теплопроводного включения	Значения η в зависимости от отношения $\frac{a}{\delta}$								
	0,02	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5
1. Прямоугольное сквозное 	0,12	0,24	0,38	0,55	0,74	0,83	0,87	0,90	0,95
2. Сквозное с теплопроводными поверхностными слоями 	0,07	0,15	0,26	0,42	0,62	0,73	0,81	0,85	0,94
3. Заглубленное с более теплой поверхности на половину толщины ограждения 	0,25	0,50	0,96	1,26	1,27	1,21	1,16	1,10	1
4. То же, но с более холодной поверхности 	0,04	0,10	0,17	0,32	0,50	0,62	0,71	0,77	0,89

Из выражения для температуры на поверхности конструкций (I.24а), получим:

$$t_{в.п} - t_{ж} = R_{в}\left(\frac{t_{в} - t_{н}}{R_{o}'} - \frac{t_{в} - t_{н}}{R_{o}'}\right),$$

где R_o и R_o' — сопротивления теплопередаче конструкции и теплопроводного включения.

Подставив полученное выражение в уравнение (*а*), после преобразования, получим:

$$t_{в.п} - t'_{в.п} = \eta R_в \frac{(R_0 - R'_0)(t_в - t_н)}{R_0 R'_0}. \qquad (б)$$

Замечая, что поток тепла Q, проходящий через ограждающую конструкцию при отсутствии в ней теплопроводных включений, может быть представлен выражением $Q = \frac{t_в - t_н}{R_0}$, а произведение $R_в Q$ — выражено разностью температур $t_в - t_{в.п}$, и подставляя эти выражения в (*б*), получим:

$$t_{в.п} - t'_{в.п} = \eta (t_в - t_{в.п}) \frac{R_0 - R'_0}{R'_0}.$$

Далее, обозначая безразмерное отношение $\frac{t_{в.п} - t'_{в.п}}{t_в - t_{в.п}} = \theta$, имеем

$$\frac{R_0 - R'_0}{R'_0} = \frac{t_{в.п} - t'_{в.п}}{(t_в - t_{в.п})\eta} = \frac{\theta}{\eta},$$

откуда результат для R_0' выражается весьма простой формулой:

$$R'_0 = \frac{R_0 \eta}{\theta + \eta} \; град \cdot м^2 \cdot ч/ккал. \qquad (IV.11)$$

Введение безразмерного симплекса θ, характеризующего надежность проектируемой конструкции против появления конденсата на наиболее опасном участке поверхности, позволяет упростить расчетное выражение.

Формула (IV.11) дает возможность вычислить необходимое сопротивление теплопередаче проектируемой ограждающей конструкции в месте расположения теплопроводного включения, если предельно допустимое значение температуры $t'_{в.п}$ на внутренней поверхности включения принять равным температуре точки росы $t_{росы}$.

Безразмерная величина θ, входящая в формулу (IV.11), зависит от температуры $t_в$ и влажности воздуха $\varphi_в$ в помещении, а также от степени утепленности конструкции. Такая степень может быть выражена отношением принятого при проектировании сопротивления теплопередаче к его требуемой величине $\left(\text{т. е. } \frac{R_0}{R_0^{тр}}\right)$. Иначе говоря $\theta = f\left(t_в; \varphi_в; \frac{R_0}{R_0^{тр}}\right)$. Значения величины θ для ограждений в помещениях различного назначения указаны в табл. IV.3.

Выражение для вычисления температуры на внутренней поверхности теплопроводных включений может быть приведено к нагляд-

Таблица IV.3

Здания или помещения и влажность воздуха в них	Значения θ в зависимости от отношения $R_0/R_0^{тр}$						
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,8	2,1
Жилые с влажностью 55% при $t_в=18°$	0,40	0,53	0,68	0,82	1,10	1,54	1,9
Общественные и конторские с влажностью 50% при $t_в=18°$ . .	0,50	0,64	0,81	0,95	1,24	1,72	2,1
Производственные с влажностью 60% при $t_в=15°$	0,03	0,13	0,22	0,33	0,54	0,84	1,1
Производственные с влажностью 45% при $t_в=15°$	0,31	0,44	0,57	0,71	0,97	1,4	1,83
Производственные с влажностью 75% при $t_в=18°$	0,00	0,10	0,18	0,29	0,50	0,80	1,10

ному и удобному для пользования виду путем преобразования формулы (IV.11).

Обозначив $R_0/R_0' = \beta$, получим:

$$\beta = \frac{\theta + \eta}{\eta} = \frac{\dfrac{t_{в.п} - t'_{в.п}}{t_в - t_{в.п}} + \eta}{\eta},$$

откуда, определяя $t'_{в.п}$, найдем:

$$t'_{в.п} = t_{в.п} - \eta(\beta - 1)(t_в - t_{в.п}). \qquad (IV.12)$$

Из этого выражения можно видеть, что понижение температуры на поверхности теплопроводного включения по сравнению с температурой на поверхности нормально утепленных участков ограждения, зависит от геометрических размеров, формы и расположения включения (характеризуемых величиной η), а также от степени утепленности конструкции (оцениваемой величинами β и $t_в - t_{в.п}$).

Результаты, получаемые по формуле IV.12, полностью совпадают с данными расчета по более сложной формуле IV.13, устанавливающей зависимость температуры внутренней поверхности ограждения в местах теплопроводных включений от температуры воздуха помещения $t_в$ [3]:

$$t'_{в.п} = t_в - \frac{R'_0 + \eta(R_0 - R'_0)}{R'_0 R_0} R_в (t_в - t_н). \qquad (IV.13)$$

Поскольку наименьшие величины η соответствуют включениям с теплопроводными слоями на поверхностях конструкции и особенно включениям, расположенным в более холодной наружной части ограждения, понижение температур на поверхности конструкции, обращенной в помещение, будет при наличии включений указанных

видов наименьшим. Температуры распределяются более равномерно, поскольку тепло, распространяющееся вдоль поверхности конструкции, обращенной в помещение, способствует выравниванию их значений. Однако протяженность зоны искажений температурного поля (из-за наличия включения) возрастает. Наоборот, понижение температуры будет более значительным и резким (хотя и распространяющимся на меньшую длину ограждения) при сквозных включениях прямоугольной формы и включениях, расположенных с более теплой поверхности конструкции *.

Необходимое сопротивление теплопередаче R_0' по теплопроводному включению зависит от формы и расположения включения (что характеризуется величиной η и температурно-влажностной характеристикой помещения, выражаемой значением θ).

Из выражения IV-11 видно, что при $\theta=0$ и любых возможных (в пределах от 0 до 1) значениях η, $R_0'=R_0$; это означает, что для конструкций, ограждающих влажные помещения и имеющих ограниченные минимальными требованиями норм теплозащитные

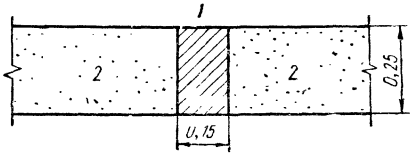


Рис. IV.10. Конструкция стены из пенобетонных камней со сквозным элементом железобетонного каркаса:
1 — железобетонный каркас; *2* — кладка из пенобетонных камней

свойства, наличие теплопроводных включений любой геометрической формы и размера недопустимо. Возможность появления теплопроводных включений в ограждениях влажных помещений появляется лишь для конструкций с сопротивлением теплопередаче, значительно превышающим нормируемые значения.

По мере уменьшения влажности воздуха в ограждаемых помещениях и увеличения степени утепленности конструкций, возрастает возможность применения ограждений с теплопроводными включениями.

В частности, применение изделий из легких бетонов с малой теплопроводностью, но стандартными размерами может обеспечить высокую утепленность наружных стен сухих производственных помещений и позволяет использовать ограждающие конструкции со сквозными элементами каркаса ограниченной ширины.

Пример IV.2. Пенобетонные блоки толщиной 0,25 *м* применены для заполнения каркасной стены производственного помещения с сухим режимом.

Расчетная температура наружного воздуха равна —30°, внутреннего воздуха +15°. Расчетная относительная влажность 45%. Сечение элемента бетонного каркаса 0,25 · 0,15 *м*.

---

* Такие особенности распределения температур в зоне теплопроводных включений различного вида подтверждаются опытом эксплуатации зданий с соответствующими конструктивными решениями панельных стен. Если ребра в стыках панелей покрыты с теплой стороны теплопроводным защитно-отделочным слоем, распределение температур на внутренней поверхности стены более равномерно; при отсутствии достаточно толстого и теплопроводного слоя отмечается явно выраженное понижение температуры вблизи стыка.

Требуется определить, можно ли вести заполнение блоками в одной плоскости с каркасом с тем, чтобы элементы последнего пересекали всю толщину стены (рис. IV.10).

Отношение $\frac{a}{\delta} = \frac{0,15}{0,25} = 0,60$; тогда по табл. IV.2 $\eta = 0,83$.

Сопротивление теплопередаче заполнения стены из пенобетонных блоков:

$$R_0 = 0,133 + \frac{0,25}{0,22} + 0,05 = 1,31 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Здесь 0,22 — коэффициент теплопроводности пенобетона при объемном весе 800 *кг/м*^{3} и сухих условиях эксплуатации.

Это сопротивление теплопередаче превышает нормируемую величину 0,62 *град* · *м*^{2} · *ч/ккал* примерно в 2,1 раза $\left(\text{т.е.}, \frac{R_0}{R_0^{тр}} = \frac{1,31}{0,62} = 2,1\right)$. При этой величине отношения $R_0/R_0^{тр}$ величина θ равна 1,83 (табл. IV.3) и необходимое сопротивление теплопередаче конструкции по теплопроводному включению:

$$R_0' = \frac{R_0\eta}{\theta + \eta} = \frac{1,31 \cdot 0,83}{1,83 + 0,83} = 0,41 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Фактическое сопротивление теплопередаче элемента бетонного каркаса (бетон с кирпичным щебнем в сухих условиях эксплуатации $\lambda = 0,80$ *ккал/м* · *ч* · *град*):

$$R_0' = 0,133 + \frac{0,25}{0,80} + 0,05 = 0,49 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал,$$

что практически равно необходимому.

Таким образом, при высоких теплозащитных свойствах стен сухих помещений сквозные элементы бетонного каркаса с ограниченным поперечным сечением не всегда являются причиной появления конденсата на внутренней поверхности стены *.

В отапливаемых зданиях с более теплопроводными элементами каркаса из железобетона или стали необходимо располагать такие элементы у внутренней поверхности стен, не заглубляя их в конструкцию даже в сухих помещениях.

При облегченнных ограждающих конструкциях, малая толщина которых достигается за счет применения эффективных утеплителей, расположение ограждения с внешней стороны каркаса является обязательным правилом.

Теплопроводные включения в стенах из легкобетонных камней или блоков могут быть образованы за счет большей теплопроводности строительного раствора, примененного для заполнения швов.

---

* Это подтверждается практикой эксплуатации термических, кузнечных и других сухих и хорошо вентилируемых цехов. Однако и в таких цехах следует избегать расположения элементов каркаса вблизи наружных углов, где величина коэффициентов тепловосприятия $\alpha_в$ меньше чем на поверхности плоских участков стены, что связано с возможностью понижения температуры в зоне углов.

Сквозное пересечение стен указанных выше помещений элементами каркаса возможно преимущественно в том случае, если эти элементы выполнены из бетона с небольшой теплопроводностью (с легкими заполнителями и небольшим процентом армирования) и имеют небольшое поперечное сечение.

Теплофизический расчет сопряжений между блоками и камнями с заполнением стыков тяжелым раствором может быть выполнен при использовании выражения (IV.11).

Пример IV.3. Для жилых домов в местности с расчетной температурой наружного воздуха $t_н = -34°$, проектируется применение стен толщиной $\delta = 0{,}25$ *м* из блоков ячеистого бетона. Требуется установить, можно ли вести кладку на цементно-песчаном растворе, если толщина швов $a = 0{,}015$ *м*.
Отношение

$$a/\delta = \frac{0{,}015}{0{,}25} = 0{,}06;$$ тогда по табл. IV.2 $\eta = 0{,}27$.

Сопротивление стены теплопередаче:

$$R_o = 0{,}133 + \frac{0{,}02}{0{,}60} + \frac{0{,}25}{0{,}25} + \frac{0{,}02}{0{,}75} + 0{,}05 = 1{,}24 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал,$$

где 0,60; 0,25; 0,75 — коэффициенты теплопроводности внутренней фактуры, ячеистого бетона с объемным весом 800 *кг/м*^{3} и наружной фактуры.

Нормируемое сопротивление стены теплопередаче $R_o^{тр} = 1{,}16$ *град* $\cdot$ *м*^{2} $\cdot$ *ч/ккал*.

Сопротивление теплопередаче стены по шву (при λ цементно-песчаного раствора равном 0,80):

$$R_o' = 0{,}133 + \frac{0{,}25}{0{,}80} + 0{,}05 = 0{,}49 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал,$$

тогда как по IV.11 требуется:

$$R_o' = \frac{R_o \eta}{\theta + \eta} = \frac{1{,}24 \cdot 0{,}27}{0{,}49 + 0{,}27} = 0{,}44 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Здесь величина $\theta = 0{,}49$ определена интерполяцией по табл. IV.3 для $\frac{R_o}{R_o^{тр}} = \frac{1{,}24}{1{,}16} = 1{,}07$.

Разница между необходимым и имеющимся сопротивлениями теплопередаче по шву незначительна (0,49—0,44=0,05) и появление конденсата на внутренней поверхности швов в большой мере будет зависеть от колебаний влажности воздуха в помещении, а также от степени увлажнения цементного камня в шве и от действительной величины его коэффициента теплопроводности. При уменьшении коэффициента теплопроводности цементно-песчаного раствора, например, до 0,65 *ккал/м* $\cdot$ *ч* $\cdot$ *град*, что соответствует сухому состоянию мелкопористого цементного камня, вероятность конденсации в местах расположения швов полностью устраняется, даже при кратковременных повышениях влажности воздуха в помещении.

Вероятность конденсации влаги на внутренней поверхности стен из легкобетонных камней и блоков в местах расположения швов особенно велика во влажных климатических районах, где раствор, заполняющий шов, может быть увлажнен атмосферной влагой. В этом случае выполнение швов с пустотой внутри препятствует капиллярным перемещениям влаги по всей толщине стены, обеспечивает быстрое высыхание затвердевшего раствора после возможных эпизодических увлажнений и одновременно увеличивает сопротивление теплопередаче конструкции в месте шва.

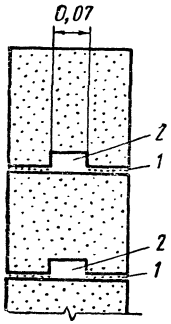


Рис. IV.11. Легкобетонные камни с профилированной нижней поверхностью для получения пустот в швах раствора:
1 — раствор; *2* — воздушная прослойка

Таким конструктивным приемом при возведении стен предотвращается также возможное промерзание швов, что в особенности важно для суровых климатических районов с повышенной влажностью.

Внутренние пустоты в швах могут быть образованы при помощи стальной или деревянной рейки-шаблона, укладываемой на поверхность камня при нанесении раствора, а также при использовании легкобетонных камней с профилированной нижней поверхностью, получаемой при изготовлении (рис. IV.11).

Стена из ячеистобетонных камней, рассмотренная в предыдущем примере, полностью удовлетворяет теплофизическим требованиям даже при повышении влажности помещения до 60% в том случае, если швы будут выполнены пустотными.

В самом деле, сопротивление теплопередаче пустотного шва

$$R_0' = 0{,}133 + \frac{0{,}25 - 0{,}07}{0{,}80} + 0{,}20 + 0{,}05 = 0{,}61 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал,$$

где 0,20 — термическое сопротивление воздушной прослойки по табл. I—8. Эта величина сопротивления теплопередаче пустотного шва превышает требуемое значение при влажности $\varphi = 60\%$:

$$R_0' = \frac{1{,}24 \cdot 0{,}27}{0{,}38 + 0{,}27} = 0{,}52 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

В действительности сопротивление теплопередаче пустотного шва будет еще выше за счет сухого состояния и меньшего значения коэффициента теплопроводности цементного камня.

Пользуясь формулой IV.12, легко вычислить значения температуры на поверхности теплопроводных включений, обращенной в помещение.

Пример IV.4. Вычислить температуру на внутренней поверхности стены из пенобетонных блоков (см. пример IV.2) и на поверхности бетонного каркаса, пересекающего эту стену, при расчетной температуре наружного воздуха —30°.

Сопротивление теплопередаче стены из пенобетонных блоков $R_0 = 1{,}50 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал$, а элемента бетонного каркаса $R_0' = 0{,}49 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал$.

Температуру на внутренней поверхности стены вычисляем по формуле (I.24, а):

$$t_{в.п} = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0} R_в = 15{,}0 - \frac{15{,}0 + 30{,}0}{1{,}50} 0{,}133 = 11{,}00°.$$

Отношение $\beta = \frac{R_0}{R_0'} = \frac{1{,}50}{0{,}49} = 3{,}06$; величина коэффициента $\eta = 0{,}83$ (см. пример IV.3).

Температура на внутренней поверхности бетонного каркаса, пересекающего заполнение стены (IV.12):

$$t_{в.п}' = t_{в.п} - \eta (\beta - 1)(t_в - t_{в.п}) = 11{,}0 - 0{,}83 (3{,}06 - 1)(15{,}0 - 11{,}0) = 4{,}20°.$$

Такой же результат может быть получен расчетом по формуле (IV.13).

Приведенные выше приближенные способы теплофизических расчетов теплопроводных включений относятся к однородным ог-

раждающим конструкциям с теплопроводными включениями простейшей геометрической формы и при этом расположенными на значительном удалении друг от друга, что исключает влияние соседних включений на процессы перетекания тепла.

Для других видов ограждающих конструкций и более сложной формы или более близкого расположения теплопроводных включений, что часто встречается в практике проектирования, простых расчетных формул не существует.

Исключение представляет инженерный метод расчета температуры на поверхности вертикальных стыков трехслойных панелей, предложенный Ф. В. Ушковым на основе исследования большого количества температурных полей подобных стыков.

Обычно к вертикальному стыку панелей жилых зданий примыкает поперечная перегородка, влияющая на распределение темпе-

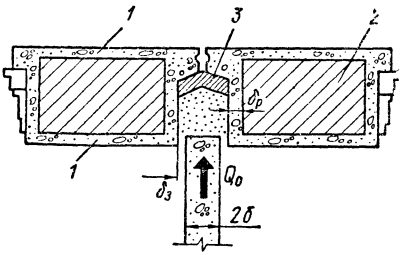


Рис. IV.12. Схема горизонтального стыка трехслойных панелей с примыкающей поперечной перегородкой:
1 — железобетонные элементы панелей; *2* — утепление панелей; *3* — утепление стыка; 2δ — толщина перегородки; Q_0 — количество тепла, передаваемое перегородкой стыку; $\delta_з$ — толщина зазора между перегородкой и ребром панели; $\delta_р$ — толщина ребра, обрамляющего панель

ратур (рис. IV.12), поскольку по перегородке передается в зону стыка некоторое количество тепла, пропорциональное эквивалентному коэффициенту теплопередачи перегородки, равному:

$$\alpha_{в.экв} = \alpha_в \frac{1}{\sqrt{Bi}} \; ккал/ч \cdot м^2 \cdot град^*, \qquad (IV.14)$$

где $\alpha_в$ — коэффициент теплообмена на внутренней поверхности перегородки; Bi — критерий Био для перегородки, характеризующий отношение тепла, поступающего из помещения через ее поверхность, к количеству тепла, распространяющемуся внутри конструкции, а именно:

$$Bi = \frac{\alpha_в}{\lambda} \delta,$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала перегородки, *ккал/м·ч·град*; δ — характерный размер перегородки, равный половине ее толщины, *м*.

Делением эквивалентного коэффициента теплоотдачи перегородки на коэффициент теплообмена ее внутренней поверхности, получают относительный коэффициент интенсификации теплообмена

---

* Количество тепла Q_0, передаваемое перегородкой стыку, $Q_0 = 2\delta\theta_0\alpha_в \frac{1}{\sqrt{Bi}}$ *ккал/ч·м*, где 2δ — толщина перегородки, $\theta_0 = t_в - t^у_{в.п}$ — температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и более низкой температурой в углу у стыка.

$\alpha_{отн}$ между перегородкой и стыком (иначе называемый коэффициентом оребрения):

$$\alpha_{отн}=\frac{\alpha_{в.экв}}{\alpha_в}=\frac{1}{\sqrt{Bi}}\text{ (величина безразмерная).} \qquad (IV.15)$$

Для расчета температуры в углу стыка (рис. IV.12) необходимо предварительно вычислить приведенное сопротивление теплопередаче стыка, определяемое по формуле:

$$R_{о.стыка}=\frac{\delta_п+\delta_з+\delta_р}{\frac{\delta_п}{R_{о.п}}+\frac{\delta_з}{R_{о.з}}+\frac{\delta_р}{R_{о.р}}}, \qquad (IV.16)$$

где $\delta_п$ — половина толщины перегородки; $\delta_з$ — толщина зазора между перегородкой и ребром панели; $\delta_р$ — толщина обрамляющего ребра; $R_{о.п}$; $R_{о.з}$; $R_{о.р}$ — сопротивления теплопередаче панели в сечениях по оси перегородки, зазору и обрамляющему ребру.

При вычислении $R_{о.п}$ термическое сопротивление перегородки и сопротивление тепловосприятию принимаются: $R_{в.п}=\frac{1}{\alpha_в\alpha_{отн}}$. После этих предварительных вычислений, для приближенного расчета минимальной температуры в углу стыка $t^у_{в.п}$ можно пользоваться формулой:

$$t^у_{в.п}=t_в-\frac{t_в-t_н}{R_{о.стыка}}R_в\frac{2}{1+\alpha_{отн}}. \qquad (IV.16а)$$

Результат, получаемый по этой приближенной формуле, обычно отклоняется не более чем на 1° от значений температуры в углу, установленных точным расчетом двумерного температурного поля.

Пример IV.5. Определить наинизшую температуру в углу стыка трехслойных панелей и примыкающей к стыку перегородки. Наружная температура —30°, внутренняя +18°. Общая толщина панелей 0,25 *м*; утепление минераловатными плитами; перегородка бетонная, толщиной 0,12 *м* (рис. IV.13). Термовкладыш в стыке толщиной 0,04 *м* из минераловатных плит. Характерный размер (половина толщины) перегородки $\delta_п=0{,}06$ *м*; ширина зазора $\delta_з=0{,}02$ *м*; толщина ребра $\delta_р=0{,}04$ *м*.

Величина критерия Био для рассматриваемой перегородки $Bi=\frac{\alpha_в}{\lambda}\delta=\frac{7{,}5}{1{,}4}0{,}06=0{,}321$, где 7,5 и 1,4 — коэффициент тепловосприятия поверхности и коэффициент теплопроводности бетона; относительный коэффициент интенсификации теплообмена между перегородкой и стыком: $\alpha_{отн}=\frac{1}{\sqrt{Bi}}=1{,}765$. Сопротивление теплопередаче панели по оси стыка и перегородки:

$$R_{о.п}=0{,}05+\frac{0{,}04}{0{,}2}+\frac{0{,}02}{0{,}04}+\frac{0{,}04}{0{,}08}+\frac{0{,}10}{1{,}2}+\frac{1}{7{,}5\cdot1{,}765}=1{,}41\ град\cdot м^2\cdot ч/ккал,$$

где 0,2; 0,04; 0,08; 1,2 — коэфициенты теплопроводности мастики, упругой

прокладки, минераловатных плит, заполняющего стык бетона; $\left(\frac{1}{7{,}5 \cdot 1{,}765} = \right.$

$\left. = \frac{1}{\alpha_в \alpha_{отн}} = R_{в.п} \right)$ для перегородки.

Сопротивление теплопередаче стыка по зазору между перегородкой и панелью:

$$R_{о.з} = 0{,}05 + \frac{0{,}06}{1{,}2} + \frac{0{,}04}{0{,}08} + \frac{0{,}15}{1{,}2} + 0{,}133 = 0{,}86 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Сопротивление теплопередаче стыка по ребру панели:

$$R_{о.р} = 0{,}05 + \frac{0{,}25}{1{,}2} + 0{,}133 = 0{,}39 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Среднее приведенное сопротивление стыка теплопередаче (IV.16):

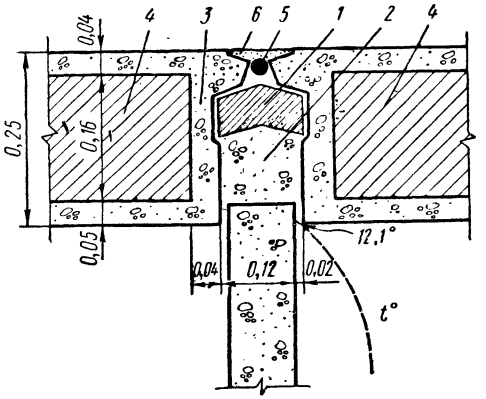


Рис. IV.13. Конструкция горизонтального стыка трехслойных панелей (с примыкающей к стыку перегородкой):

1 — вкладыш из минераловатных плит $\gamma = 300$ *кг/м*³; *2* — бетон, укладываемый на месте; *3* — ребра панелей; *4* — утепление панелей минераловатными плитами; *5* — упругая прокладка; *6* — эластичная мастика

$$R_{о.стык} = \frac{0{,}06 + 0{,}02 + 0{,}04}{\frac{0{,}06}{1{,}41} + \frac{0{,}02}{0{,}86} + \frac{0{,}04}{0{,}39}} + \frac{0{,}12}{0{,}042 + 0{,}027 + 0{,}102} =$$

$$= \frac{0{,}12}{0{,}167} = 0{,}72 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Тогда наинизшая температура в углу составит:

$$t^{у}_{в.п} = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_{о.стыка}} R_в \frac{2}{1 + \alpha_{отн}} = 18{,}0 - \frac{18 + 30}{0{,}72} \cdot 0{,}133 \frac{2}{1 + 1{,}765} =$$

$$= 18{,}0 - 6{,}50 = 11{,}50°.$$

Точный расчет температурного поля мог бы установить значение для $t^{у}_{в.п} = 12{,}1°$.

§ 5. ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В предыдущих разделах рассматривалось распределение температур, устанавливающееся внутри ограждающих конструкций ввиду наличия разности температур внутреннего и наружного воздуха и возникающих под влиянием этой разности процессов теплопередачи.

Температурное поле и теплотехнические качества конструкций могут существенно измениться при совместном действии процессов передачи тепла и фильтрации воздуха через ограждения зданий.

Фильтрация холодного наружного воздуха, возникающая под влиянием ветра и теплового напора, вызывает увеличение потерь тепла через ограждающую конструкцию и смещение температурного поля по сравнению с тепловым состоянием конструкции при отсутствии фильтрации. Такое смещение в распределении температур объясняется тем, что часть тепла, проходящего через ограждающую конструкцию, затрачивается на нагревание фильтрующегося холодного воздуха.

Дифференциальное уравнение теплопроводности при фильтрации воздуха выводится в предположении, что температура фильтрующегося воздуха и материала равны между собой в любом сечении конструкции, а физические параметры воздуха остаются постоянными при изменении температуры в пределах этого сечения *. Предполагая, что поток тепла одномерен, а фильтрационный поток совпадает с ним по направлению, или является встречным (т. е. отличается на 180° от направления потока тепла), можно выделить бесконечно тонкий слой конструкции dx и рассмотреть условия его теплового баланса.

При отсутствии фильтрации через этот слой проходит количество тепла

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx}.$$

Изменение количества тепла, проходящего через слой dx составит:

$$\frac{dQ}{dx} = -\lambda \frac{d^2t}{dx^2}. \qquad (а)$$

Если считать, что это изменение происходит только из-за затраты части тепла на согревание фильтрующегося воздуха на величину dt, то можно записать:

$$\frac{dQ}{dx} = -Wc \frac{dt}{dx}, \qquad (б)$$

---

* Температура фильтрующегося воздуха практически не отличается от температуры материала слоя при малых скоростях фильтрации

где W — количество воздуха, фильтрующегося через ограждающую конструкцию, *кг/м²·ч*; c — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, равная 0,24 *ккал/кг·град*.

Приравнивая правые части уравнений (*а*) и (*б*) имеем:

$$\lambda \frac{d^2t}{dx^2} - Wc \frac{dt}{dx} = 0. \qquad \text{(IV.17)}$$

Выражение (IV.17) является дифференциальным уравнением температурного поля плоской однородной стенки в стационарных условиях теплопередачи при наличии установившейся фильтрации холодного воздуха [55].

В основу уравнения положена математическая аналогия теплопроводности и фильтрации; такая аналогия справедлива для установившихся процессов переноса в идеально пористых материальных средах, с сообщающимися порами, размеры которых достаточны для возникновения фильтрационного потока.

Многие плотные строительные материалы (плотный бетон и т. д.) не всегда удовлетворяют этим условиям: на поверхности конструкций, выполненных из таких материалов, возникают сопротивления фильтрационному потоку *, в результате чего он может изменить свое направление — на параллельное внешней поверхности конструкции. Сквозной фильтрации при ограниченной разности давлений не возникает, и уравнение (IV.17) утрачивает свою физическую обоснованность.

Однако уравнение (IV.17) обычно оказывается справедливым для однородных пористых конструкций при значительной разности давлений и использовании экспериментальных значений констант воздухопроницаемости.

Если изобразить многослойную пористую стенку в масштабе термических сопротивлений (R) и считать, что сопротивления фильтрационному потоку на границах конструктивных слоев отсутствуют, уравнение (IV.17) примет вид, позволяющий применить его к расчету стационарного температурного поля слоистой ограждающей конструкции:

$$\frac{d^2t}{dR^2} - Wc \frac{dt}{dR} = 0. \qquad \text{(IV.18)}$$

Это уравнение справедливо для области $0 \leqslant R \leqslant R_0$; начало координат расположено со стороны фильтрации холодного воздуха.

Решение дифференциального уравнения (IV.18) было получено Ф. В. Ушковым [55] в следующем виде:

$$t_x = t_н + (t_в - t_н) \frac{e^{cWR_x} - 1}{e^{cWR_0} - 1}, \qquad \text{(IV.19)}$$

---

* Возникновение таких сопротивлений характерно при переносе любых видов вещества (массы); для газообразной фазы это будет, например, воздух, любые газы, парообразная влага и т. д.

где t_x — температура в любой плоскости ограждающей конструкции при установившейся фильтрации холодного воздуха, *град*; $t_в$ и $t_н$ — соответственно температуры внутреннего и наружного воздуха, *град*; R_x — термическое сопротивление части конструкции от наружной поверхности до рассматриваемой плоскости, *град·м²·ч/ккал*; $R_о$ — сопротивление теплопередаче всей конструкции, *град·м²·ч/ккал*; e — основание натуральных логарифмов.

Распределение температур при одномерной фильтрации холодного воздуха выражается кривой линией, отклоняющейся в сторону более низких значений от прямолинейного распределения температур, отвечающего условиям теплопередачи при отсутствии фильтрации (рис. IV.14).

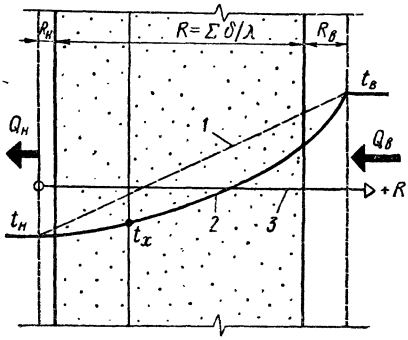


Рис. IV.14. Схема распределения температур и потоков тепла при одномерной установившейся фильтрации холодного воздуха через плоскую стенку из пористых материалов:

1 — распределение температур при отсутствии фильтрации; *2* — распределение температур при фильтрации; *3* — направление расчетных координат; $Q_в$ — поток тепла, входящий в стену; $Q_н$ — поток тепла, выходящий из стены

При установившейся фильтрации холодного воздуха потоки тепла, входящего в стену и выходящего из нее, не равны друг другу; разность между входящим и выходящим потоками тепла равна количеству тепла, затраченного на согревание холодного фильтрующегося воздуха, т. е.:

$$Q_в - Q_н = cW(t_в - t_н). \qquad \text{(IV.20)}$$

Поток тепла, входящий в стену, составляет:

$$Q_в = cW(t_в - t_н)\frac{e^{cWR_о}}{e^{cWR_о} - 1} \; ккал/ч \cdot м^2. \qquad \text{(IV.21)}$$

Величина выходящего из ограждающей конструкции теплового потока соответственно равна:

$$Q_н = cW(t_в - t_н)\frac{1}{e^{cWR_о} - 1} \; ккал/ч \cdot м^2. \qquad \text{(IV.22)}$$

Показатель степени cWR в выражениях (19), (21) и (22) — безразмерная величина, характеризующая относительную интенсивность фильтрации, и с точки зрения теории подобия представляет собой произведение критериев Рейнольдса и Прандтля (Re·Pr).

Вычисленная по входящему потоку тепла величина сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции при установившейся фильтрации холодного воздуха, определяется по формуле:

$$R_{\text{о}}^{\text{и}} = \frac{e^{cWR_{\text{о}}} - 1}{cWe^{cWR_{\text{о}}}} \; град \cdot м^2 \cdot ч/ккал. \qquad \text{(IV.23)}$$

При очень большом количестве фильтрующегося воздуха, т. е. при высоком значении cW, отношение $\frac{e^{cWR_{\text{о}}} - 1}{e^{cWR_{\text{о}}}}$ стремится к 1, а величина $R_{\text{о}}^{\text{и}} \to \frac{1}{cW} \to 0$.

В этих случаях становится практически справедливой приближенная формула для определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, с учетом интенсивного сквозного потока воздуха, фильтрующегося через нее:

$$R_{\text{о}}^{\text{и}} = \frac{1}{K_0 + cW}, \qquad \text{(23а)}$$

где $K_0 = 1/R_{\text{о}}$ — общий коэффициент теплопередачи, т. е. величина, обратная сопротивлению теплопередаче конструкции (при отсутствии фильтрации).

Это значит, что для ограждений с неплотностями и щелями, теплофизические свойства определяются преимущественно высокими показателями проницаемости для холодного воздуха, и при малой степени герметизации эти свойства могут быть полностью утрачены.

При решении уравнения (18) и выводе формул (19), (21), (23) принимается, что сопротивления фильтрационному потоку (массообмену) на поверхности конструкций, а также на границах слоев в слоистых ограждениях — отсутствуют, что справедливо при установившейся фильтрации через идеально пористые материалы, но не всегда соответствует действительным условиям воздухопроницания через материалы относительно плотные. Поэтому при применении приведенных выше формул, необходимо использовать экспериментальные характеристики воздухопроницаемости конструкций и их отдельных слоев, в которые по условиям проведения эксперимента входят и поверхностные сопротивления.

Фильтрация наружного воздуха особенно сильно влияет на понижение эксплуатационных качеств стен, выполненных из пористых материалов и не защищенных плотными отделочными слоями, а также покрытий с кровлями из штучных изделий, сопряжения между которыми обычно обладают неплотностями.

Выяснению и систематизации расчетных величин, характеризующих воздухопроницаемость строительных материалов и конструкций, способствовали многолетние экспериментальные исследования, проведенные в СССР Р. Е. Брилингом [52].

Расчет ограждающих конструкций на воздухопроницаемость обычно проводится при постоянной разности общих давлений воз-

душной среды и установившемся потоке воздуха, фильтрующегося сквозь конструкцию.

По аналогии с коэффициентом теплопроводности материалов предложен коэффициент воздухопроницаемости i с размерностью *кг/м·ч·мм* вод. ст. Эта величина должна представлять количество воздуха в *кг*, фильтрующееся при установившемся потоке воздуха через слой материала толщиной 1 *м* и сечением 1 $м^2$ в течение 1 *ч* при разности давлений 1 *мм вод. ст.*

Зная толщину однородной конструкции или отделочного конструктивного слоя и пользуясь величиной коэффициента воздухопроницаемости, можно (по аналогии с расчетами термического сопротивления) вычислить сопротивление воздухопроницанию по такой формуле:

$$R_{и} = \frac{\delta}{i} \; мм \; вод. \; ст. \; м^2 \cdot ч/кг, \qquad (IV.24)$$

где δ — толщина конструктивного слоя, *м*.

Сопротивление воздухопроницанию имеет размерность *мм вод. ст.·$м^2$·ч/кг* и представляет разность общих давлений, при которой поток воздуха через 1 $м^2$ ограждающей конструкции равен 1 *кг/ч*. Однако коэффиицент воздухопроницаемости, а следовательно, и вычисляемое на его основе сопротивление воздухопроницанию, являются гораздо менее строгими понятиями, чем коэффициент теплопроводности и термическое сопротивление.

Как было указано ранее, физический механизм переноса вещества в капиллярно-пористых материалах существенно отличен от механизма переноса тепловой энергии.

При переносе воздуха фильтрационного потока внутри конструкции может и не возникнуть, если разность давлений на ее противоположных поверхностях имеет ограниченные значения.

Фильтрационный поток возникает лишь в том случае, если разность давлений превысит (по своему энергетическому уровню) сопротивления этому потоку, возникающие на поверхности и в толще конструкции.

Некоторые плотные материалы с очень мелкими порами, однородной структурой, без трещин практически не пропускают молекул воздуха при умеренной разности давлений. Поэтому для плотной керамики, пластифицированных растворов, бетонов и других плотных материалов, не имеющих трещин и проницаемых сопряжений, коэффициент воздухопроницаемости в пределах разности давлений до 5 *мм вод. ст.* практически равен нулю. Такие же данные получают и при экспериментальных исследованиях влажных материалов, поры которых заполнены влагой, удерживаемой силами адгезии и капиллярного давления.

Совершенно естественно, что коэффициент воздухопроницаемости равен нулю и для таких предельно плотных материалов как стекло, плотные пластмассы, листовой алюминий, плотные прослойки битума, не имеющие трещин, многослойные рулонные кровли и т. д. Плотность и структура материала внешних поверхностных

слоев однородной ограждающей конструкции имеют решающее значение для общей величины ее воздухопроницаемости.

При хорошем качестве кладки кирпичные и другие каменные стены со сплошной, бесшовной, тщательно выполненной штукатуркой на наружной поверхности достаточно воздухонепроницаемы и при скорости ветров до 5—6 *м/сек* не требуют расчета на фильтрацию воздуха. В то же время, если в плотном материале имеются мельчайшие трещины, иногда неразличимые глазом, его воздухопроницаемость возрастает во много раз.

Неоднородные материалы (например, бетоны), в которых легко образуются микротрещины на границах инородных включений (особенно при различных величинах коэффициентов термического расширения отдельных компонентов материала), обычно обладают высокой воздухопроницаемостью. Таковы крупнопористые бетоны, состоящие из двух компонентов: цементного раствора и гравия с гладко окатанной поверхностью, цементные шлакобетоны с заполнителями из топливных шлаков и т. д. *.

При выполнении ограждающих конструкций (например, панельных) из ячеистых или других однородных легких бетонов наблюдается общее уплотнение поверхностных слоев конструкций в результате особенностей бетонирования и структурообразования бетона в этих слоях.

Поверхностные слои, даже неофактуренной конструкции, часто обладают большей плотностью по сравнению со средней ее частью [56].

Распределение объемного веса и плотности неравномерно по толщине конструкции (в частности, из-за явлений притока цементного раствора при бетонировании конструкции в зону опалубки, а также из-за процесса седиментации раствора, рис. IV.15), также неравномерно и сопротивление воздухопроницанию $R_и$, имеющее наибольшие величины в поверхностных слоях.

Отсюда следует, что сопротивление воздухопроницанию не является величиной, пропорциональной общей толщине δ однородной конструкции, как это отмечалось ранее для термического сопротивления, т. е $R_и \neq \frac{\delta}{i}$, поскольку фильтрационному потоку оказывают большее сопротивление внешние поверхностные уплотненные слои, реальная толщина которых измеряется миллиметрами.

Наличие уплотненных наружных слоев характерно не только для бетонных, но и для кирпичных конструкций, поскольку внешние слои кирпича и швов раствора могут обладать повышенной плотностью.

Воздухопроницаемость сопряжений между отдельными элементами ограждающих конструкций обычно во много раз больше воз-

---

* Возникновение микротрещин в таких материалах при колебаниях температуры окружающей среды объясняется значительной разницей в величинах $\alpha_т$ коэффициентов термического расширения (для портландцемента $\alpha_т = 11—12 \cdot 10^{-6}$; для гранитного гравия $\alpha_т = 2{,}6—3{,}0 \cdot 10^{-6}$; для топливных шлаков $\alpha_т = 2{,}1 \times \times 10^{-6}$ 1/*град*), а иногда недостаточным сцеплением вяжущего с заполнителем.

духопроницаемости материалов, из которых выполнены эти элементы.

При проектировании ограждающих конструкций с наличием стыков и неплотностей необходимо учитывать общее увеличение воздухопроницаемости таких ограждений.

Наибольший эффект для уменьшения воздухопроницаемости стыков и других сопряжений дает их плотное заполнение упругими прокладками и пластичными составами. Форма и очертания самого сопряжения также имеют существенное значение. Наличие воздухопроницаемых сопряжений наиболее характерно для конструкций, выполняемых из крупных элементов. Температурные деформации таких элементов особенно значитель-

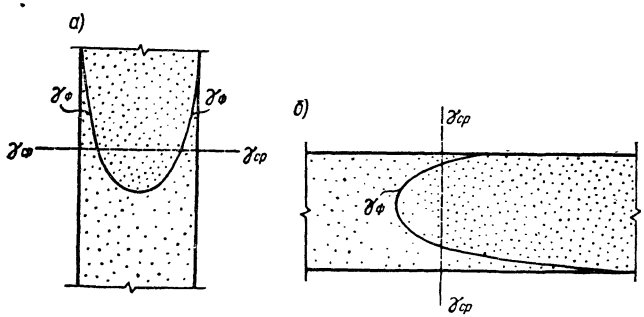


Рис. IV.15. Неравномерное распределение плотности легкого бетона в однородной конструкции панели:
а — бетонируемой в вертикальном положении; *б* — в горизонтальном положении; $\gamma_{ср}$ — среднее значение объемного веса бетона; $\gamma_ф$ — фактические изменения значений объемного веса

ны в подвергающейся резким температурным влияниям наружной части панелей и достаточное сопротивление сопряжений воздухопроницанию может быть обеспечено применением в этой части упругих прокладок и шнуров или эластичных непроницаемых заполнений мастиками, компенсирующих термические изменения размеров панелей. При большой амплитуде колебаний температур наружного воздуха в течение года (например в климатических условиях Сибири) упругие и эластичные свойства применяемых прокладок и покрытий должны быть особенно высокими и долговременными *.

Наличие воздухопроницаемых сопряжений и швов характерно также для каменных стен и облицовок, где более воздухопроницаемыми участками часто оказываются швы кладки, недостаточно плотно заполняемые раствором. Наибольшая воздухопроницаемость швов отмечается для зимних кладок, производство которых ведется при отрицательной температуре, а также при использова-

* Значительный интерес в этом отношении представляют, например, упругие прокладки и эластичные пленки на основе пористых фторосодержащих полимеров (фторопластов).

нии пористых и недостаточно пластичных растворов (особенно при слабом их сцеплении с поверхностью камней).

В связи с наличием неплотностей и недостаточно герметичных сопряжений в ограждениях для расчета их проницаемости надежнее пользоваться не величинами их толщины и коэффициентов воздухопроницаемости материалов, а результатами непосредственных исследований сопротивления фильтрации конструкции в целом.

Величины экспериментально установленных сопротивлений воздухопроницанию включают физические сопротивления на поверхности, а также активизацию фильтрации через мельчайшие трещины и неплотности.

Если величины разности давлений, использванные при эксперименте и рассматриваемые в дальнейших расчетных соображениях, совпадают по порядку величины, то фильтрационный поток W через конструкцию может быть определен, как

$$W=\frac{\Delta p}{R_{и}}\ кг/м^2\cdot ч, \qquad (IV.25)$$

где $R_{и}$ — сопротивление конструкции воздухопроницанию, установленное экспериментом.

В том случае, если ограждающая конструкция состоит из нескольких слоев, нормами строительной теплотехники ограждающих конструкций СНиПа предлагается устанавливать их общее сопротивление воздухопроницанию $R_{0и}$ по очень приближенной следующей формуле:

$$R_{0и}=R_{и1}+R_{и2}+\ldots+R_{ип}\ мм\ вод.\ ст.\cdot м^2\cdot ч/кг, \qquad (IV.26)$$

где $R_{и1}$, $R_{и2}$, ..., $R_{ип}$ — сопротивления воздухопроницанию отдельных конструктивных слоев ограждения.

Расчетной формулой (26) предполагается одномерное направление потока воздуха сквозь ограждающую конструкцию (сквозная фильтрация). Однако такое допущение достаточно справедливо лишь для конструкций, выполненных из очень пористых материалов, не имеющих структурной неоднородности.

Это допущение не соответствует особенностям распределения потоков воздуха внутри тех многослойных конструкций, отдельные слои которых существенно отличаются друг от друга по величинам сопротивления фильтрации, а контакты в плоскостях сопряжения слоев обладают значительными неплотностями. В этом случае, направленный сквозь ограждение поток воздуха, как только достигает поверхности более плотного слоя, распространяется параллельно этой поверхности, т. е. в направлении наименьшего сопротивления (так называемая «продольная фильтрация»).

Иначе говоря, поток воздуха W распределяется по двум направлениям W_x, W_y; при этом величины распределяющихся потоков прямо пропорциональны градиентам давлений Δp по соответствую-

щим направлениям x, y и обратно пропорциональны сопротивлениям $R_{и,x}$; $R_{и,y}$ *.

Количественное выражение потока воздуха W_x, продолжающего проникать сквозь ограждение, после того как часть общего начального потока $W_{нач}$ распространилась вдоль плотного слоя, составит:

$$W_x = W_{нач} \frac{\Delta p_x R_{и,y}}{R_{и,x} \Delta p_y} \quad кг/м^2 \cdot ч, \qquad (IV.27)$$

где Δp_x — расчетная разность давлений для сквозной инфильтрации; Δp_y — расчетная разность давлений для продольной инфильтрации.

Таким образом $W_x = W_{нач} - W_y$, т. е. расходимость в величинах потоков воздуха, фильтрующихся через смежные конструктивные слои многослойного ограждения, равна алгебраической сумме потоков сквозной и продольной инфильтрации.

В связи с этим формула (IV.26), устанавливающая общее сопротивление воздухопроницанию суммированием сопротивлений отдельных слоев, во многих случаях не является даже приблизительно точной, поскольку основное значение для $R_{0и}$ имеет плотный наружный слой, а значение последующих слоев все более и более падает.

Для приближенного решения проще определять общее сопротивление конструкции воздухопроницанию по величине сопротивления наиболее плотного слоя. В тех случаях, когда это не противоречит другим требованиям, такой слой следует располагать ближе к наружной поверхности конструкции.

Пример IV.6. Определить температуру на внутренней поверхности стены и понижение ее сопротивления теплопередаче при сквозной фильтрации холодного воздуха. Стена кирпичная, толщиной 0,51 *м*, выложена из кирпича на легком растворе и ограждает здание сборочного цеха. Разность давлений для расчета фильтрации наружного воздуха через стену устанавливается с учетом давления ветра и теплового напора и принята равной для нижней части стены $\Delta p = 2{,}21$ *мм вод. ст.*

Без учета фильтрации сопротивление теплопередаче стены, ограждающей рассматриваемое сухое помещение, составит:

$$R_0 = R_в + \frac{\delta}{\lambda} + R_н = 0{,}133 + \frac{0{,}51}{0{,}55} + 0{,}05 = 1{,}11 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал,$$

где величина $\lambda = 0{,}55$ *ккал/м·ч·град* соответствует нормальным условиям эксплуатации.

Сопротивление воздухопроницанию кирпичной кладки стены $R_и = 0{,}2$ *мм. час · м²/кг.*

---

* При распределении потока воздуха по двум направлениям $\nabla W = \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y}$, [4]

где $W_x = \frac{\Delta p_x}{R_{и,x}}$; $W_y = \frac{\Delta p_y}{R_{и,y}}$.

Количество воздуха, фильтрующегося сквозь стену, в соответствии с формулой (IV.25) составит:

$$W = \frac{2{,}21}{0{,}2} = 11{,}0 \ кг/м^2 \cdot ч.$$

Температура на внутренней поверхности стены будет:

$$t^{и}_{в.п} = t_н + (t_в - t_н) \frac{e^{cWR_x} - 1}{e^{cWR_0} - 1} =$$

$$= -26 + (18 + 26) \frac{e^{0{,}24 \cdot 11{,}0 \cdot 0{,}98} - 1}{e^{0{,}24 \cdot 11{,}0 \cdot 1{,}11} - 1} = +4{,}7°,$$

где $+18°$, $-26°$ — расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха; $R_x = 0{,}93 + 0{,}05 = 0{,}98$, т. е. оно равно сумме термического сопротивления кирпичной кладки и сопротивления теплоотдаче на наружной поверхности конструкции.

Величина сопротивления теплопередаче стены при сквозной фильтрации холодного воздуха:

$$R_{о.и} = \frac{e^{cWR_0} - 1}{cWe^{cWR_0}} = \frac{18{,}92 - 1}{2{,}65 \cdot 18{,}92} = 0{,}36 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал,$$

т. е. $R_{ои}$ снизилась примерно в три раза.

При расчетной температуре наружного воздуха $-26°$ и отсутствии фильтрации температура на внутренней поверхности стены была бы $+12{,}7°$, т. е. значительно выше, чем при фильтрации.

Если тщательно расшить плотным раствором швы по наружной поверхности кирпичной стены, сопротивление воздухопроницанию возрастет до 2,2 $мм \cdot ч \cdot м^2/кг$ (принимается, что поверхность кирпичной кладки с тщательно расшитыми швами, имеет:

$$R_и = 2{,}0 \ мм \cdot ч \cdot м^2/кг).$$

В этом случае количество фильтрующегося воздуха составит:

$$W = \frac{2{,}21}{2{,}2} = 1 \ кг/м^2 \cdot ч,$$

т. е. уменьшиться в 11 раз. Температура на внутренней поверхности конструкции повысится до следующей величины:

$$t_{в.п} = -26 + (18 + 26) \frac{e^{0{,}24 \cdot 1{,}0 \cdot 98} - 1}{e^{0{,}24 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}11} - 1} = +12°,$$

т. е. до допустимых пределов.

Из приведенного примера видна необходимость обеспечения достаточного сопротивления воздухопроницанию наружных слоев стен, ограждающих помещения сухие и с нормальной влажностью *.

Степень охлаждения и снижения эксплуатационных качеств наружных стен возрастает в многоэтажных зданиях, поскольку раз-

* Осуществление плотного наружного слоя стен влажных помещений возможно не во всех случаях, так как такое конструктивное решение может ухудшить влажностное состояние ограждений.

ность общих давлений воздуха, вызываемая тепловым напором, увеличивается с высотой здания.

Несущие кирпичные стены с недостаточно тщательно заполненными швами (например, зимняя кладка) утрачивают непроницаемость и при отсутствии уплотнения швов наружной облицовки, пропускают такое количество наружного воздуха, которое в состоянии охладить помещения нижних этажей многоэтажного здания до недопустимых пределов.

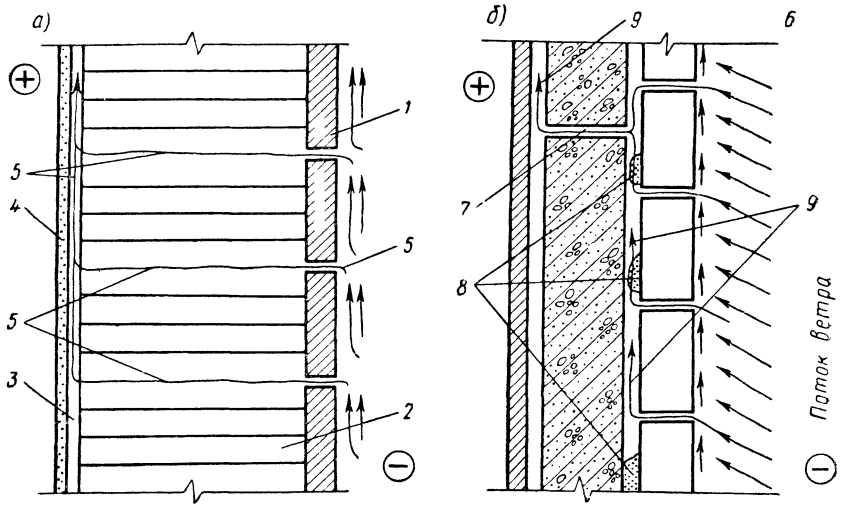


Рис. IV.16. Фильтрация холодного воздуха через конструкции стен с недостаточно плотным наружным слоем:

а — стена многоэтажного здания (схема поперечного разреза): *1* — керамическая облицовка с незаполненными швами; *2* — кирпичная кладка с проницаемыми швами; *3* — воздушная прослойка; *4* — сухая штукатурка, оклеенная обоями; *5* — холодный воздух, фильтрующийся сквозь стену;

б — утепленная пенобетонными плитами кирпичная стена (схема плана): *6* — кирпичная облицовка; *7* — стык пенобетонных плит, недостаточно заполненный раствором; *8* — отдельные места намета раствора, ниже и выше которых фильтруется холодный воздух; *9* — холодный воздух, фильтрующийся к подветренным участкам стены

На рис. IV.16, *а* приведена конструкция массивной несущей стены многоэтажного здания, отличающаяся повышенной воздухопроницаемостью (из опыта эксплуатации многоэтажных жилых зданий в Москве). Наружная керамическая облицовка, выполненная без расшивки (а часто и без плотного заполнения швов раствором), и такая же проницаемая зимняя кирпичная кладка обладают ничтожным сопротивлением воздухопроницанию (около 0,2—0,4 *мм вод. ст.·м²·ч/кг*), примерно в десять раз меньшим, чем отделенные от стены воздушной прослойкой гипсовая сухая штукатурка и оклейка обоями. Фильтрующийся сквозь стену воздух с низкой температурой распространяется вверх по воздушной прослойке, вдоль

плотного внутреннего отделочного слоя, резко понижая температуру на поверхности конструкции, обращенной в помещение.

В неправильно выполненных слоистых стенах невысоких зданий (с большими размерами в плане) большое количество холодного воздуха, проникшего в наружные, недостаточно уплотненные слои, встречает высокое сопротивление воздухопроницанию последующих конструктивных слоев и распространяется под облицовкой или даже под внутренним отделочным слоем вдоль стены (рис. IV.16, *б*). Это связано с различными величинами аэродинамических давлений на отдельных участках наружных стен здания.

Для случая, рассмотренного в предыдущем примере, разность аэродинамических давлений близ наружных углов и в середине здания составит около 0,44 *мм вод. ст.* Такой разности давлений достаточно для того, чтобы вызвать охлаждение стены на значительной части ее длины, если конструкция не обладает достаточным сопротивлением воздухопроницанию в плоскости соприкосновения слоев (например, в плоскости примыкания наружной облицовки к внутренним конструктивным слоям).

Если в стене, приведенной на рис. IV.16, *б*, поверхность пенобетонных плит примыкает к кирпичной облицовке насухо, т. е. в плоскости примыкания имеется воздушный зазор, или в том случае, если раствор неполностью заполняет шов, сопротивление воздухопроницанию незначительно и его можно приближенно принять равным 0,1 *мм·м²·ч/кг*. Тогда количество воздуха, проникающего под кирпичную облицовку и фильтрующегося вдоль более плотных слоев, составит в соответствии с (IV.27):

$$W_{\text{у}} = W_{\text{нач}} \frac{\Delta p_{\text{у}} R_{\text{и},x}}{R_{\text{и,у}} \Delta p_x} = 11{,}0 \frac{0{,}44 \cdot 0{,}2}{0{,}1 \cdot 2{,}21} = 4{,}4 \ кг/м^2 \cdot ч.$$

Такое количество воздуха охлаждает стену и в морозные ветренные дни понижает температуру на поверхности, обращенной в помещение, до отрицательных значений, что обычно связано с появлением инея.

Из практики эксплуатации зданий известно также охлаждение фильтрацией холодного воздуха неправильно спроектированных или неудовлетворительно выполненных бесчердачных покрытий с проницаемыми для ветра кровлями из штучных материалов (асбестоцементных листов, шифера, черепицы и т. д.). В ветренные периоды зимы отмечается, например, промерзание глухих скатов шедов с шиферной кровлей в цехах текстильной промышленности, ограждений жилых мансард, расположенных под черепичной кровлей и т. д. Для устранения таких явлений следует прокладывать под кровлей из штучных изделий слой рулонного материала, непроницаемого для холодного воздуха (например толя, плотной строительной бумаги и т. д.).Однако предусматриваемая в указанных ограждениях влагоизоляция (пароизоляция) вблизи поверхности, обращенной в помещение, должна превышать по сопротивлению проницанию изоляционный слой, уложенный под кровлей.

При проектировании ограждающих конструкций из крупных элементов основное значение имеет учет фильтрации в местах сопряжений, обладающих меньшим сопротивлением воздухопроницанию, по сравнению с основными участками конструкции. В связи с относительно высоким сопротивлением основных участков, поток холодного воздуха приобретает направленность вдоль поверхности ограждения и сквозная фильтрация происходит преимущественно через стыки (рис. IV.17).

Стыки с заполнением обычным цементным раствором (бетоном) без уплотнения упругими прокладками или без защиты специальными непроницаемыми покрытиями и мастиками обладают весьма непостоянным (постоянно уменьшающимся с течением времени) сопротивлением воздухопроницанию. Объясняется это процессами образования трещин в затвердевшем цементном камне, особенно легко возникающих в наружной части стыка, наиболее подверженной влиянию наружного климата и температурным деформациям.

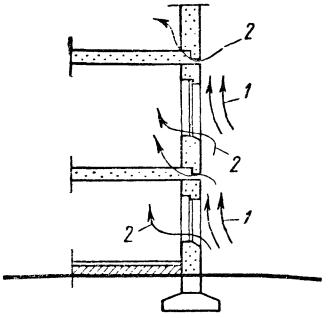


Рис. IV.17. Направление воздушных потоков у стен многоэтажных панельных зданий:

1 — поток воздуха, направленный вверх у поверхности стен; *2* — сквозная фильтрация через стыки

Изменения проницаемости стыков с уплотняющимися упругими прокладками и эластичными герметизирующими мастиками менее выражены и происходят более медленно; кинетика утраты герметичности и развития трещин зависит от сохранности упругих и эластичных свойств прокладок и мастик.

Через правильно запроектированный и тщательно уплотненный стык проникает малое количество холодного воздуха; в этих условиях на распределение температур в зоне стыка может влиять теплопроводность материала внутренней части панелей, поскольку с этим физическим свойством связано количество тепла, поступающего в охлаждаемую зону стыка от соседних участков конструкции с более высокой температурой. Минимальная температура на поверхности конструкций в зоне сопряжения может быть установлена в зависимости от отношения теплопроводности материала внутренней части панели к количеству тепла, необходимого для согревания воздуха, проникающего через стык, т. е. $\frac{\lambda}{cw}$. В зависимости от величины этого отношения и имеющегося сопротивления теплопередаче панели, по графику рис. IV.18 может быть определено значение безразмерной температуры $\frac{t_в - t'_{в.п}}{t_в - t_н}$ ($t_в$ и $t_н$ — соответственно температуры внутреннего и наружного воздуха, $t'_{в.п}$ — температура в зоне стыка с учетом его воздухопроницаемости), а затем и действительную температуру $t^{общ}_{в.п}$ в зоне воздухопроницаемого стыка с теплопроводным включением [57].

Пример IV.7. Определить температуру на внутренней поверхности панельной стены, в зоне стыка. Сопротивление воздухопроницанию стыка $R_и = 4{,}0$ *мм вод. ст.* $\cdot$ *ч* $\cdot$ *м/кг*, разность давлений воздуха с двух противоположных поверхностей ограждения $\Delta p = 2{,}0$ *мм вод. ст.* Панели выполнены из керамзитобетона; $\lambda = 0{,}20$ *ккал/м* $\cdot$ *ч* $\cdot$ *град*; $R_о = 1{,}2$ *град* $\cdot$ $м^2$ $\cdot$ *ч/ккал*.

Количество тепла, необходимое для согревания воздуха, проникающего через стык:

$$cW = c\,\frac{\Delta p}{R_и} = 0{,}24\,\frac{2{,}0}{4{,}0} = 0{,}12 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Отношение $\dfrac{\lambda}{cW} = \dfrac{0{,}20}{0{,}12} = 1{,}67.$

Тогда, по графику рис. IV.18 $\dfrac{t_в - t'_{в.п}}{t_в - t_н} = 0{,}17$, откуда температура в зоне стыка $t'_{в.п} = t_в - 0{,}17(t_в - t_н) = 18{,}0 - 0{,}17(18 + 32) = 9{,}5°$, где $t_в = +18°$; $t_н = -32°$.

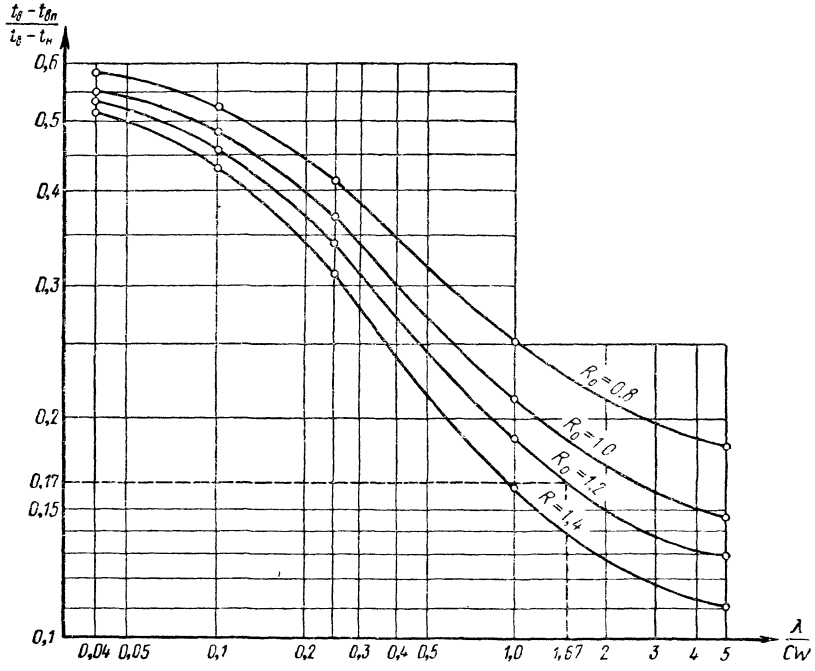


Рис. IV.18. График для определения безразмерной температуры при расчете воздухопроницаемости стыков

Если в зоне стыка имеется теплопроводное включение, то приближенно можно полагать, что температура на поверхности стыка, понизившаяся в результате воздухопроницания и повышенной теплопроводности включения, составит:

$$t^{общ}_{в.п} = t'_{в.п} - (t_{в.п} - t''_{в.п}) = t'_{в.п} - \eta(\beta - 1)\cdot(t_в - t_{в.п}), \qquad \text{(IV.28)}$$

где $t'_{в.п}$ — значение температуры на поверхности воздухопроницаемого стыка при отсутствии теплопроводного включения; $t_{в.п}$ — зна-

чение температуры на поверхности конструкции при отсутствии в ней воздухопроницаемых сопряжений и теплопроводных включений; $t''_{в.п}$ — значение температуры при наличии теплопроводного включения, но при отсутствии воздухопроницаемого стыка; η — коэффициент, устанавливаемый по табл. IV.2 в соответствии с геометрической формой теплопроводного включения; $\beta = \frac{R_0}{R'_0}$ — отношение сопротивлений теплопередаче в месте отсутствия включения и в пределах последнего.

Пример IV.8. Определить температуру в зоне стыка полагая, что панели выполнены из железобетонных ребристых плит, утепленных керамзитобетоном. Ребра железобетонных плит образуют теплопроводное включение в зоне стыка (рис. IV.19). Сопротивление воздухопроницанию стыка $R_и = 4{,}0$; сопротивление

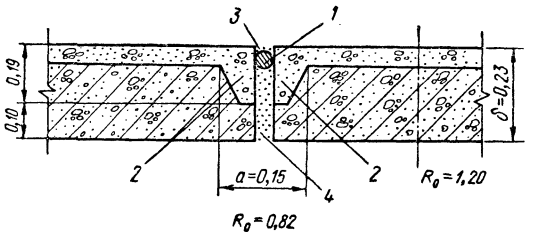


Рис. IV.19. Схема стыка панелей с контурными ребрами, образующими теплопроводное включение:

1 — упругая прокладка; *2* — железобетонные ребра панелей, образующие теплопроводное включение; *3* — эластичная мастика; *4* — раствор, заполняющий швов

теплопередаче панели $R_0 = 1{,}2$, коэффициент теплопроводности керамзитобетона $\lambda = 0{,}20$, т. е. те же самые, что в предыдущем примере. Температура в зоне стыка, пониженная только за счет его воздухопроницания (при отсутствии теплопроводного включения) $t'_{в.п} = +9{,}5°$.

Сопротивление теплопередаче по теплопроводному включению

$$R'_0 = 0{,}133 + \frac{0{,}10}{0{,}20} + \frac{0{,}13}{1{,}40} + 0{,}05 = 0{,}77 \ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал,$$

где 0,20 и 1,40 соответственно коэффициенты теплопроводности керамзитобетона и железобетона.

Отношение $\frac{R_0}{R'_0} = \beta = \frac{1{,}20}{0{,}77} = 1{,}55$; $a/\delta = \frac{0{,}15}{0{,}23} = 0{,}65$ и величина коэффициента $\eta = 0{,}75$ (по табл. IV.2).

Температура на поверхности панели вдали от стыка:

$$t_{в.п} = 18{,}0 - \frac{18 + 32}{1{,}20} \cdot 0{,}133 = 18{,}0 - 5{,}55 = 12{,}45 \ град.$$

Определяем температуру $t^{общ.}_{в.п}$ в зоне стыка с учетом воздухопроницания и наличия теплопроводного включения:

$$t^{\text{общ}}_{\text{в.п}} = t'_{\text{в.п}} - \eta(\beta - 1)(t_{\text{в}} - t_{\text{в.п}}) = 9{,}5 - 0{,}75(1{,}55 - 1)\cdot(18{,}0 - 12{,}45) =$$
$$= 9{,}5 - 2{,}3 = 7{,}2 \text{ } град.$$

Эта температура ниже точки росы, соответствующей в жилых помещениях (при 55% относительной влажности) температуре 8,5 *град.* Рассмотренный стык нуждается или в дополнительном утеплении или в более совершенном уплотнении.

Строительными нормами и правилами в целях устранения недопустимого охлаждения ограждаемых помещений при воздухопроницании установлен ряд требований, ограничивающих проницаемость конструкций в целом или их отдельных конструктивных слоев.

В прежних изданиях норм такие требования устанавливались в зависимости от квадрата скорости ветра (аэродинамическое давление, вызываемое ветром, принимается пропорциональным квадрату его скорости), поскольку в зданиях ограниченной этажности, преобладавших ранее в массовом строительстве, величины теплового напора не могли быть значительными.

В настоящее время, когда этажность зданий массового строительства возросла, необходимое сопротивление наружных ограждений воздухопроницанию правильнее устанавливать в зависимости от расчетной разности давлений, учитывающей тепловой напор и ветер.

Необходимое общее сопротивление воздухопроницанию $R_{\text{о.и}}$ ограждающей конструкции (стены или бесчердачного покрытия) может быть принято не менее:

$$R_{0\text{и}} = \varepsilon \Delta p R_{\text{о}}^{\text{тр}*}, \qquad \text{(IV.28)}$$

где ε — коэффициент, принимаемый для наружных стен жилых и общественных зданий равным 2,00 и для стен отапливаемых производственных — 1,00; Δp — расчетная разность давлений от теплового напора и ветра, $R_{\text{о}}^{\text{тр}}$ — нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции.

Нормирование общего сопротивления воздухопроницанию имеет целью ограничить дополнительные потери тепла, вызываемые сквозной фильтрацией холодного воздуха через ограждающие конструкции. Кроме этой основной цели, важно устранить и чрезмерное охлаждение ограждающих конструкций, ограничив проникание холодного воздуха в их толщу и возникновение продольной фильтрации.

Можно рекомендовать, чтобы в помещениях сухих и с нормальной влажностью наружная часть ограждающих конструкций (до $^1/_4$ общей толщины) обладала повышенной плотностью и сопротивлением воздухопроницанию не менее 0,5 Δp.

Для наружных конструкций с воздушными прослойками и пустотами устанавливается (в целях обеспечения необходимого тер-

---

* В нормах СНиП II-А. 7—71 это выражение представлено в виде $R_{0\text{и}} = \varepsilon \Delta p$.

мического сопротивления воздушных включений) требуемое сопротивление воздухопроницанию стенок, ограничивающих прослойки и пустоты. Для слоя, отделяющего воздушную прослойку от наружного воздуха, уместно принять $R_{и}^{тр} \geqslant 0{,}4$ *мм. вод. ст.* $м^2 \cdot ч/кг$, а для стенок, разделяющих воздушные прослойки $R_{и}^{тр} \geqslant 0{,}2$ *мм вод. ст.* $\cdot м^2 \cdot ч/кг$.

Для наружных стен жилых и общественных зданий, осуществляемых из крупных панелей или блоков, важно ограничение воздухопроницаемости стыков и сопряжений между отдельными крупными элементами.

Сопротивление воздухопроницанию 1 *пог. м* указанных стыков желательно обеспечить не менее $R_{о.и}^{тр} = 2{,}0\ \Delta p\ R_{о}^{тр}$, где $R_{о}^{тр}$ — нормируемое сопротивление стены теплопередаче. Поскольку величина $R_{о}^{тр}$ изменяется в ограниченных пределах, необходимое сопротивление стыков воздухопроницанию зависит, главным образом, от расчетной разности давлений.

Пример IV.9. Определить требуемое сопротивление стыков воздухопроницанию и установить возможные их конструктивные решения в стенах пятиэтажных крупноблочных зданий ($H = 15$ *м*), проектируемых для Москвы и Норильска. Сопротивление теплопередаче стен:

$R_{о}^{тр} = 1{,}1$ *град* $\cdot м^2 \cdot ч/ккал$ для Москвы и 1,3 — для Норильска.

Для Москвы $\Delta p = 0{,}7 \cdot 15(1{,}39 - 1{,}21) + 0{,}03 \cdot 1{,}39 \cdot 5^2 = 2{,}93$ *мм вод. ст.*

Для Норильска: $\Delta p' = 0{,}7 \cdot 15\ (1{,}45 - 1{,}19) + 0{,}03 \cdot 1{,}45 \cdot 13^2 = 10{,}08$ *мм вод. ст.*, где 1,39; 1,45; 1,21; 1,19 — объемные веса воздуха при —20, —30, +18 и +22°.

Тогда для Москвы $R_{о.и}^{тр} = 2{,}0 \cdot 2{,}93 \cdot 1{,}1 = 6{,}4$ *мм вод. ст.* $\cdot м \cdot ч/кг$.

Для Норильска $R_{о.и}^{тр} = 2{,}0 \cdot 10{,}08 \cdot 1{,}3 = 26{,}2$ *мм вод. ст.* $\cdot м \cdot ч/кг$.

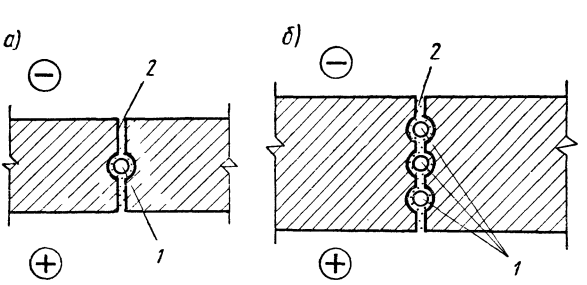


Рис. IV.20. Схемы конструктивных решений стыков крупноблочных стен:

а — стык с ограниченным сопротивлением воздухопроницанию; *б* — стык с большим сопротивлением воздухопроницанию; *1* — упругие прокладки; *2* — заполнение эластичным раствором

Возможные конструктивные схемы решений стыков, удовлетворяющих желательным сопротивлениям воздухопроницанию, приведены на рис. IV.20. Как видно из этих схем, высокое сопротивление стыков воздухопроницанию для суровых климатических условий обеспечивается большим числом упругих прокладок, каждая из которых размещается в специально предусмотренной полости блока.

ГЛАВА V

ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ПОМЕЩЕНИЙ

§ 1. НЕОБХОДИМОСТЬ РАСЧЕТОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ПОТОКЕ ТЕПЛА

Теплофизический расчет ограждающих конструкций при установившемся потоке тепла и стабильном тепловом состоянии производится при существенном допущении, заключающемся в том, что температуры воздуха как с наружной, так и с внутренней стороны принимаются постоянными, — это упрощающее расчет допущение, в реальных условиях обычно не имеет места.

Температура наружного воздуха в холодный период года колеблется; максимальные изменения на территориях с неустойчивой зимой при оттепелях возможны, например, от —30 до +5°, в течение нескольких суток. В летний период года закономерные колебания температур, происходящие в суточном периоде, наиболее выражены: в юго-восточных районах СССР возможны изменения температуры наружного воздуха от +15° ночью до +45° днем.

Происходящие во времени колебания температуры наружного воздуха вызывают охлаждение или нагрев слоев ограждающих конструкций, а величина потока тепла и распределение температур внутри ограждений претерпевают значительные изменения, по сравнению с результатами расчета по стационарным условиям теплопередачи, даже при постоянстве температуры воздуха в помещении. В тех случаях, когда колеблются значения и этой последней температуры, отмечаются еще более значительные отклонения от данных расчета по установившемуся потоку тепла.

Колебания температуры воздуха внутри помещений в холодный период года характерны, например, для зданий с периодически действующим отоплением (местными печами и т. п.). В теплый период года, даже в относительно умеренном климате (не говоря уже о южных районах), происходят периодические повышения температуры в помещении (обычно во второй половине дня), связанные с прогревом ограждений конвективным и радиационным теплом, а также солнечными лучами, проникающими через светопроемы. Периодически изменяющийся температурный режим наружных ограждающих конструкций здания отражается на тепловом состоянии помещений.

Периодические и значительные по своей величине изменения температуры наружного и внутреннего воздуха заставляют предъявлять к ограждающим конструкциям дополнительные теп-

лофизические требования (помимо тех, которые определяются расчетами для условий установившегося потока тепла).

При значительных (и нежелательных в гигиеническом отношении) колебаниях температуры (внешней или внутренней воздушной среды) ограждающие конструкции должны обладать теплоустойчивостью.

Под теплоустойчивостью следует понимать свойство ограждающей конструкции сохранять относительное постоянство температуры на поверхности, обращенной в помещение, при периодических изменениях температуры воздуха (наружного или внутреннего) и возникающих по этой причине колебаниях потока тепла, проходящего через конструкцию.

Температура воздуха в помещениях с недостаточно теплоустойчивыми ограждениями летом быстро поднимается (при прогреве солнечными лучами), а зимой падает при уменьшении теплоотдачи отопительных систем. Такие помещения обычно являются мало удовлетворительными в санитарно-гигиеническом отношении.

Особенно важны свойства теплоустойчивости ограждающих конструкций для устойчиво жаркого летнего периода, что подтверждается практикой эксплуатации зданий в сухих южных районах, где колебания температуры на наружной поверхности ограждений особенно высоки. В этих условиях важно обеспечить понижение температуры наружного воздуха путем озеленения и обводнения территории, прилегающей к зданию. В ночное время целесообразно использовать более низкую температуру наружного воздуха для проветривания и охлаждения крыш и экранированных стен зданий и тем самым повысить теплофизические свойства этих ограждений даже в том случае, если они отличаются сравнительно малой массивностью.

Летом разность между температурами внутреннего и наружного воздуха относительно мала, а при устойчивой солнечной погоде колебания температур наружного воздуха в течение суток выражены более определенно, чем зимой. В связи с этим теплофизические расчеты по установившемуся потоку тепла, учитывающие лишь неизменную и при этом достаточно большую разность температур наружного и внутреннего воздуха, утрачивают физическую достоверность и соответствие реальным условиям.

§ 2. ПОНЯТИЯ О ТЕОРИИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ

В основе разработки теории теплофизических расчетов при нестационарных условиях теплопроводности лежит дифференциальное уравнение (I.7), практически используемое главным образом в форме для одномерного распространения тепла.

Аналитические решения этого уравнения известны лишь для простейших случаев (например, для бесконечно толстой стенки из однородного материала, для однородной стенки конечной толщины с аналогичными условиями теплообмена на противоположных по-

верхностях и т. д.), что недостаточно для удовлетворения запросов практики.

Гораздо большие возможности для развития практических расчетов и приведения их в единую достаточно целеустремленную систему возникают при решении указанного дифференциального уравнения для периодически повторяющихся тепловых воздействий на рассматриваемую конструкцию. Такой характер воздействий типичен для условий эксплуатации зданий, поскольку их наружные ограждающие конструкции подвергаются влиянию внешней воздушной среды, температура которой закономерно изменяется в течение суток или более длительных периодов времени.

Предполагается, что такие периодические воздействия гармонически изменяются и происходят во времени по закону косинусоиды. Можно считать, что эти воздействия многократно повторяются (например, ежесуточно) и в связи с такой многократностью изменения температур внутри конструкции (независимо от ее первоначального теплового состояния) приобретают устойчиво установившийся или, иначе говоря, квазистационарный (как бы стационарный) характер.

Если период тепловых воздействий задан, изменения температур в рассматриваемой материальной системе определяются только затухающими по глубине конструкции отклонениями от среднего значения температуры и возрастающими запаздываниями этих отклонений во времени по сравнению с воздействиями, имеющими место на поверхности конструкции, воспринимающей колебания температуры. Иначе говоря, при заданном периоде воздействий гармонические изменения температур в любом сечении конструкции определяются только двумя параметрами: амплитудой колебаний и запаздыванием времени (фазы).

Главной задачей теплофизических расчетов ограждающих конструкций в нестационарных условиях является определение этих параметров.

Основной целью теории теплоустойчивости, разработанной в СССР О. Е. Власовым, является обеспечение развития практических расчетов колебаний температур в ограждающих конструкциях и помещениях, подвергающихся периодическим тепловым воздействиям. На основе этой теории развиты методы теплофизических расчетов ограждений помещений с периодическим отоплением и зданий в южных районах (Л. А. Семенов и А. М. Шкловер).

В теории теплоустойчивости принято, что гармонические колебания потока тепла, воспринимаемого поверхностью ограждающей конструкции, происходят с периодом в τ *ч*, соответствующим времени между максимумами поступления тепла к поверхности конструкции (периодическое действие солнечной радиации в ясные дни, последовательные топки теплоемких печей и т. д.). Прямая линия $Q_{ср} - Q_{ср}$ выражает среднее значение потока (рис. V.1) тепла, проходящего через 1 $м^2$ ограждающей конструкции в 1 *ч* и определяемого по формуле (I.21). Отклонения величин потока тепла от среднего значения $Q_{ср}$ выражаются амплитудами A_Q. Колебания потока тепла, воспринимаемого поверхностью конструкции, вызывают ко-

лебания температуры этой поверхности. Прямая линия представляет среднее значение температуры поверхности, соответствующее установившемуся потоку тепла и определяемое по формуле (I.24а). Отклонения температуры поверхности от среднего ее значения выражаются амплитудами A_t.

Амплитуда A_t зависит от колебаний потока тепла A_Q и их периода τ, а также от теплофизических свойств ограждающей конструкции и входящих в ее состав материалов. По мере углублени внутрь конструкции, амплитуда A_t уменьшается, а запаздывани ε — возрастает. С учетом этих закономерностей температурных ко

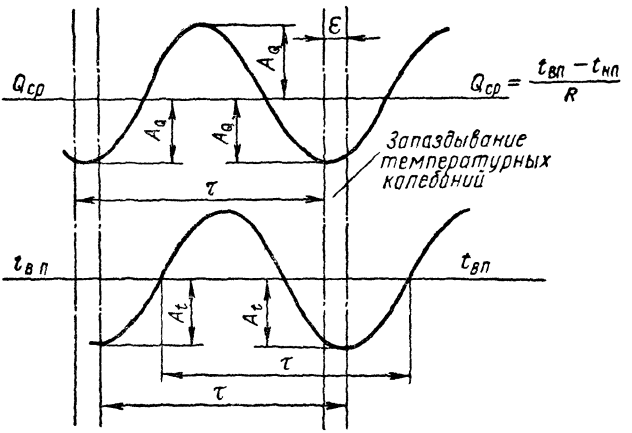


Рис. V.1. Колебания потока тепла и значений температуры на поверхности ограждающей конструкции:
$Q_{ср}$ и $t_{в.п}$ — средние значения потока тепла и температуры на поверхности конструкции; τ — период колебаний; A_Q и A_t — амплитуды колебаний потока тепла и значений температуры; ε — запаздывание колебаний температуры на поверхности ограждающей конструкции, по сравнению с колебаниями потока тепла

лебаний и их смещений во времени, нижняя кривая на рис. V.1 могла бы быть отнесена к произвольному сечению по глубине конструкции.

Чем меньше период колебаний потока тепла и его доля, отводимая в глубь конструкции, тем большее количество тепла периодически воздействует на поверхность ограждения, вызывая колебания ее температуры. Это количество тепла, влияющее на изменения указанной температуры, выражается так называемым коэффициентом теплоусвоения Y поверхности, воспринимающей поток тепла. Коэффициент теплоусвоения равен отношению амплитуды колебаний потока тепла к амплитуде колебаний температуры поверхности, периодически воспринимающей это тепло, иначе говоря, Y представляет максимальный поток, отнесенный к единице поверхности ограждения, единице времени и единичной амплитуде колебаний температуры, т. е.

$$Y = \frac{A_Q}{A_{t\,\text{в.п}}} \; ккал/м^2 \cdot ч \cdot град. \qquad (V.1)$$

Коэффициент теплоусвоения по своему физическому смыслу является коэффициентом тепловосприятия (теплообмена) в условиях передачи через поверхность конструкции периодических тепловых воздействий, происходящих только путем теплопроводности. Величина Y зависит от периода тепловых воздействий, а также от свойств материала и конструкции, а потому не является обычной теплофизической константой материала, подобной константам теплопроводности и температуропроводности. Коэффициент теплоусвоения Y связан с изменениями температуры поверхности конструкции и ее отдельных слоев, а отнюдь не с количеством тепла, аккумулируемым ограждением; понятие о потоке тепла, воспринимаемом поверхностью конструкции или отдельным ее слоем (при периодических тепловых воздействиях), облегчает задачу отыскания удобных для практики методов расчета распространения (т. е. затухания и запаздывания) колебаний температур внутри ограждающих конструкций зданий.

При относительно большой толщине конструктивного слоя, поверхность которого воспринимает периодический поток тепла, коэффициент теплоусвоения его поверхности зависит только от физических свойств материала и периода колебаний тепловых воздействий. В этом случае

$$Y = s = \sqrt{\lambda c \gamma \omega} \; ккал/м^2 \cdot ч \cdot град, \qquad (V.2)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, *ккал/м·ч·град*; c — удельная теплоемкость, *ккал/кг·град*; γ — объемный вес, *кг/м*^{3}; $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ — частота колебаний температуры 1/*ч*; (здесь τ — длительность периода колебаний, *ч*).

Для тепловых воздействий с периодом колебаний в 24 *ч* (солнечное облучение, топка печей один раз в сутки) формула принимает такой вид:

$$s_{24} = 0{,}51 \sqrt{\lambda c \gamma}, \qquad (V.2а)$$

а для тепловых воздействий с периодом в 12 *ч* (топка печей два раза в сутки):

$$s_{12} = 0{,}72 \sqrt{\lambda c \gamma}, \qquad (V.2б)$$

т.е. в 1,41 раза больше, чем для периода в 24 *ч* *.

---

* Вообще, если частота периодических тепловых воздействий возрастает в n раз, коэффициент теплоусвоения увеличивается в $\sqrt{n}$. При увеличении частоты температура на поверхности материала возрастает, глубина распространения тепла уменьшается, а при предельных условиях становится ничтожной (например, закалка металлоизделий токами высокой частоты). При увеличении длительности периодов тепловых воздействий (например, до суточных, а тем более до происходящих в годовом цикле) распространение тепла вглубь материальной среды соответственно возрастает.

Величины коэффициентов теплоусвоения s_{24} для толстых конструктивных слоев (т. е. коэффициенты усвоения тепла поверхностью однородных конструкций с достаточными теплозащитными свойствами, выполненных из определенного материала) указаны в приложении.

Величина усвоения тепла поверхностью относительно тонкого конструктивного слоя будет иной, поскольку на нее оказывают существенное влияние в слоистых конструкциях усвоение тепла поверхностью подстилающего слоя, расположенного под рассматриваемым, а в очень тонких, но однородных — отдача тепла с поверхности конструкции противоположной той, которая воспринимает периодическое тепловое воздействие.

Влияние усвоения тепла поверхностью подстилающего слоя будет иметь место, например, в бесчердачных покрытиях, где тонкий конструктивный слой (кровля или расположенная под ней стяжка) является внешней частью слоистой ограждающей конструкции, а влияние теплоотдачи, например, для стен неотапливаемых зданий (железобетонные панели или асбестоцементные листы), когда легкое ограждение состоит только из одного тонкого слоя, граничащего с обеих сторон с воздухом, подводящим или уносящим тепло.

В первом случае теплоусвоение внешней поверхностью тонкого слоя (если на него оказывает влияние только один соседний слой) приближенно может быть определено как:

$$Y_{\text{в}} = \frac{R_1 s_1^2 + s_2}{1 + R_1 s_2}, \qquad \text{(V.3)}$$

где R_1 — термическое сопротивление рассматриваемого слоя; s_1 — коэффициент теплоусвоения материала этого слоя; s_2 — коэффициент теплоусвоения материала смежного слоя.

Если тонкий слой непосредственно соприкасается с воздухом, вместо s_2 в формулу (V.3) подставляется величина коэффициента теплообмена α.

Колебания температуры, происходящие на поверхности, распространяются в глубь ограждающей конструкции, но их амплитуды уменьшаются, т. е. колебания постепенно затухают в ее толще. Отношение амплитуды A_t на поверхности конструкции, воспринимающей колебания температур внешней среды, к затухшей амплитуде A_t' на противоположной поверхности называется затуханием амплитуд ν внутри конструкции, т. е.:

$$\nu = \frac{A_t}{A_t'}, \qquad \text{(V.4)}$$

Мерой интенсивности затухания колебаний температуры внутри однородной ограждающей конструкции является безразмерная величина, представляющая произведение термического сопротивления на коэффициент теплоусвоения

$$D = Rs, \qquad (V.5)$$

называемая условной толщиной или характеристикой тепловой инерции. Тепловая инерция проявляется в свойстве конструкции сохранять или медленно изменять распределение температур, характерное для средних температурных условий окружающей воздушной среды.

Для ограждающих конструкций, состоящих из нескольких слоев, характеристика тепловой инерции очень приближенно * выражается как сумма условных толщин отдельных слоев, т. е.:

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + \ldots + R_n s_n. \qquad (V.5а)$$

При изучении особенностей распространения периодических тепловых воздействий по толщине ограждающей конструкции большое значение имеет так называемый «слой резких колебаний температуры», непосредственно прилегающий к поверхности, воспринимающей периодически поступающее тепло.

Внутри слоя резких колебаний однородной конструкции амплитуда колебаний температуры затухает примерно вдвое и на другой его поверхности составляет только половину по сравнению с амплитудой колебаний на поверхности, воспринимающей периодические тепловые воздействия. Характеристика тепловой инерции $D_д$ для слоя резких колебаний равна единице, т. е.:

$$D_д = R_д s = \frac{д}{\lambda} s = 1, \qquad (V.6)$$

где $R_д$ — термическое сопротивление слоя резких колебаний, *град·м²·ч/ккал;* s — коэффициент теплоусвоения материала этого слоя, *ккал/м²·ч·град;* $д$ — толщина слоя резких колебаний, *м*; λ — коэффициент теплопроводности материала этого слоя, *ккал/м·ч·град.*

Если рассматриваемая конструкция намного толще слоя резких колебаний, то ее следует считать толстой (в этом случае $Y = s$); в противном случае она является тонкой и величина теплоусвоения ее поверхности $Y \neq s$ вычисляется по формуле (V.3).

С некоторым приближением можно принять, что на распространение периодических тепловых воздействий по толщине ограждающей конструкции оказывают влияние только теплофизические свойства материалов, расположенных в ее слое резких колебаний. Вся же остальная часть конструкции, лежащая за пределами этого слоя, не влияет заметным образом на величину усвоения тепла поверхностью ограждающей конструкции.

---

* Приближенность (V.5а) связана с тем, что этой формулой не учитывается порядок расположения в конструкции отдельных конструктивных слоев с различным теплоусвоением и термическим сопротивлением.

Для однородной ограждающей конструкции толщина слоя резких колебаний определится из (V.6) так:

$$д=\frac{\lambda}{s}\ м. \qquad \text{(V.6а)}$$

Теория теплоустойчивости уже около полувека является основой для разработки и применения удобных в практике и достаточно обоснованных методов расчета изменений теплового состояния ограждений и помещений зданий при периодических воздействиях тепла. Эти периодические воздействия температуры типичны почти для любых, а в особенности для континентальных климатических условий, поскольку последние характеризуются наиболее резкими колебаниями температуры в течение суток, периодов года и всего годового цикла. Со слоем резких температурных колебаний $д=\frac{\lambda}{s}$ у строителей связано понятие об активной теплоемкости конструкций, т. е. об аккумуляции ими тепла; из этого понятия закономерно вытекает обоснованное представление о практически одинаковой теплоустойчивости толстой конструкции, выполненной из материала с определенными свойствами, и конструкции, у которой из такого материала выполнена лишь внутренняя часть на толщину слоя резких колебаний*. При этих допущениях теплофизические процессы, происходящие в действительности, отображаются теорией теплоустойчивости достаточно полно, а практические методы расчетов, вытекающие из нее, по-прежнему оказываются наиболее удобными для установления изменений во времени теплового состояния ограждающих конструкций зданий и ограждаемых ими помещений.

Пример (V.1). Определить коэффициент теплоусвоения и толщину слоя резких колебаний для стены из пенобетонных панелей при периоде колебаний, равном 24 и 12 *ч*.

Для пенобетона с объемным весом 600 *кг/м*^{3}, $\lambda=0{,}18$ *ккал/м·ч·град*, $c=0{,}20$ *ккал/кг·град*. При $\tau=24$ *ч* коэффициент теплоусвоения пенобетона, определяемый по формуле (V.2а), равен:

$$s_{24}=0{,}51\sqrt{0{,}18\cdot 0{,}20\cdot 600}=2{,}37\ ккал/м^2\cdot ч\cdot град.$$

---

* В литературе, критикующей теорию теплоустойчивости [4], в качестве величины, характеризующей аккумуляцию тепла, рекомендовано выражение $\xi=\sqrt{\frac{a}{\omega}}$, в котором вместо не принятого в общей теплофизике коэффициента теплоусвоения $s=\sqrt{\frac{2\pi\lambda c\gamma}{\tau}}$, использован коэффициент температуропроводности $a=\frac{\lambda}{c\gamma}$. Это выражение, имеющее размерность длины, является, как показано Е. И. Солдатовым, ничем иным, как слоем резких колебаний, поскольку $\sqrt{\frac{a}{\omega}}=\sqrt{\frac{\lambda\tau}{c\gamma 2\pi}}=\sqrt{\frac{\lambda^2\tau}{\lambda c\gamma 2\pi}}=\lambda\sqrt{\frac{\tau}{\lambda c\gamma 2\pi}}=\frac{\lambda}{\sqrt{\frac{2\pi\lambda c\gamma}{\tau}}}=\frac{\lambda}{s}=д.$

Тогда толщина слоя резких колебаний, определяемая по формуле (V.6а), равна:

$$д_{24} = \frac{0{,}18}{2{,}37} = 0{,}076 \ м = 7{,}6 \ см.$$

При $\tau = 12$ *ч*:

$$S_2 = 0{,}72\sqrt{0{,}18 \cdot 0{,}20 \cdot 600} = 3{,}35 \ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град;$$

$$д_{12} = \frac{0{,}18}{3{,}35} = 0{,}054 \ м = 5{,}4 \ см.$$

При уменьшении длительности периода колебаний потока тепла один и тот же конструктивный слой материала может превратиться в толстый, в связи с уменьшением толщины слоя резких колебаний и количества тепла, аккумулируемого им.

Слой резких колебаний занимает сравнительно небольшую часть общей толщины ограждающей конструкции. Поэтому даже отделочный слой, выполненный из плотного материала, влияет на колебания температуры на поверхности конструкции и изменение ее активной теплоемкости. Стена, имеющая на поверхности, обращенной в помещение, плотный фактурный слой или штукатурку, окажется более теплоустойчивой (обладающей большей активной теплоемкостью), чем такая же стена, но лишенная этого слоя.

При наличии плотной фактуры граница слоя резких колебаний обычно располагается в материале стены, находящемся под фактурой, поскольку характеристика тепловой инерции фактурного слоя, принятой в строительной практике толщины, меньше единицы.

Коэффициент теплоусвоения поверхности конструкции определяется в этом случае по формуле (V.3).

Пример V.2. Определить коэффициент теплоусвоения стены из пенобетона, рассмотренной в предыдущем примере, но с фактурным слоем на внутренней поверхности. Толщина фактуры 0,02 *м*; $\lambda = 0{,}60$; $c = 0{,}20$; $\gamma = 1600$ *кг/м*^{3}; $s_{24} = 7{,}05$; $s_{12} = 9{,}95$ (по формулам V.2а и V.2б); для пенобетона с объемным весом 600 *кг/м*^{3}; $s_{24} = 2{,}37$; $s_{12} = 3{,}35$ (см. предыдущий пример).

Термическое сопротивление фактуры $R_1 = \frac{0{,}02}{0{,}60} = 0{,}033$.

При $\tau = 24$ *ч* (например, при топке печи один раз в сутки) коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности стены, определенный по формуле (V.3), составит:

$$Y_{24} = \frac{0{,}033 \cdot 7{,}05^2 + 2{,}37}{1 + 0{,}033 \cdot 2{,}37} = 3{,}90 \ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град.$$

При $\tau = 12$ *ч* (например, при топке печи два раза в сутки)

$$Y_{12} = \frac{0{,}033 \cdot 9{,}95^2 + 3{,}35}{1 + 0{,}033 \cdot 3{,}35} = 6{,}00 \ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град.$$

Нанесение фактурного слоя привело к увеличению значений коэффициентов теплоусвоения поверхности стены на 60—80%.

Если штукатурка отделена от основного материала стены воздушной прослойкой или под штукатуркой имеется слой какой-либо дополнительной термоизоляции, имеющий малую величину D, зна-

чения коэффициентов теплоусвоения внутренней поверхности ограждения изменяются, поскольку слой резких колебаний располагается уже в трех слоях, состоящих из разнородных материалов.

В этом случае определение коэффициента теплоусвоения по формуле (V.3) производится сначала для второго слоя, а затем уже для первого, т. е. для внутренней поверхности ограждения. Коэффициент теплоусвоения воздушных прослоек принимается равным нулю при любом периоде колебаний теплового потока, а следовательно, принимается равной нулю и характеристика тепловой инерции воздушной прослойки (поскольку $D=R\mathrm{s}=R\cdot 0=0$).

Пример V.3. Определить коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности стены из пенобетона, имеющей внутреннюю отделку из гипсовых плиток толщиной 0,02 *м*, отделенную от стены воздушной прослойкой.

Термические сопротивления трех слоев стены, в которых располагается слой резких колебаний, величины коэффициентов теплоусвоения материалов этих слоев и их характеристики тепловой инерции приведены ниже. Поместим результаты вычислений в таблицу.

№ слоя	Наименование слоев	Термические сопротивления	Суточный период колебаний		Полусуточный период колебаний	
			s_{24}	D_{24}	s_{12}	D_{12}
1	Отделочный слой из гипсовых плиток (объемный вес 1250 *кг/м*³)	0,05	5,10	0,26	7,20	0,36
2	Воздух в прослойке	0,20	0	0	0	0
3	Пенобетон	—	2,37	Более 0,74	3,35	Более 0,64

При $\tau=24$ *ч* (т. е., например, при одной топке в сутки) коэффициент теплоусвоения предпоследнего (второго) конструктивного слоя, входящего в слой резких колебаний (т. е. воздушной прослойки), определяется по формуле (V.3) с соответствующим изменением индексов входящих в нее величин, а именно:

$$s_2'=\frac{R_2s_2^2+s_3}{1+R_2s_3}=\frac{0{,}20\cdot 0+2{,}37}{1+0{,}20\cdot 2{,}37}=\frac{2{,}37}{1{,}47}=1{,}61.$$

Тогда коэффициент теплоусвоения первого слоя, равный коэффициенту теплоусвоения внутренней поверхности стены:

$$s_{\text{в}}=\frac{R_1s_1^2+s_2}{1+R_1s_2}=\frac{0{,}05\cdot 5{,}10^2+1{,}61}{1+0{,}05\cdot 1{,}61}=\frac{2{,}91}{1{,}08}=2{,}69.$$

При $\tau=12$ *ч* (например, две топки печи в сутки):

$$s_2'=\frac{0{,}20\cdot 0+3{,}35}{1+0{,}20\cdot 3{,}35}=\frac{3{,}35}{1{,}67}=2{,}01;$$

$$s_{\text{в}}=\frac{0{,}05\cdot 7{,}20^2+2{,}01}{1+0{,}05\cdot 2{,}01}=\frac{4{,}61}{1{,}10}=4{,}19.$$

Штукатурки, отделенные воздушной прослойкой, значительно понижают коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждений по сравнению со штукатурками, нанесенными непосредственно на поверхность основного материала ограждения. При отсутствии воздушной прослойки под отделочным слоем коэффициент теплоусвоения при периоде 24 *ч* был бы:

$$s_в = \frac{0{,}05 \cdot 5{,}10^2 + 2{,}37}{1 + 0{,}05 \cdot 2{,}37} = 3{,}28 \ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град.$$

Из предыдущих примеров видно, что при уменьшении длительности периода τ колебаний потока тепла (т. е. при увеличении частоты этих колебаний $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$) величина коэффициента теплоусвоения поверхности конструкции возрастает, а толщина слоя резких колебаний уменьшается. При более частых колебаниях потока тепла поверхностными слоями ограждений поглощается большее количество тепла, а конструкции оказываются более теплоустойчивыми. В практике эксплуатации зданий с местным отоплением указанная закономерность используется путем проведения более частых топок в большие морозы, что может дать при приблизительно одинаковом расходе топлива лучший теплотехнический эффект по сравнению с топкой один раз в сутки.

Летние изменения температуры и солнечного облучения имеют период колебаний, равный 24 *ч*, и длительность этого периода не может быть уменьшена; в связи с этим обеспечение теплоустойчивости ограждений в южных районах представляет серьезную инженерно-экономическую задачу, некоторые направления в решении которой рассмотрены в последующем параграфе.

§ 3. ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Тепловые воздействия на наружную поверхность ограждающих конструкций в жаркое время года имеют явно выраженный периодический характер; необходимые теплофизические качества ограждений при нестационарном прогреве могут быть установлены путем применения описанных выше основных положений теории теплоустойчивости. Колебания температур на наружной поверхности ограждений постепенно затухают по мере распространения в глубь конструкций; наибольшее затухание (примерно вдвое) происходит в слое резких колебаний (см. рис. II.7). Общая величина затухания по толщине конструкции выражается отношением амплитуд колебаний на наружной и внутренней поверхностях ограждения в соответствии с формулой (V.4).

Распространение тепловой волны в толще конструкции требует определенного времени, в связи с чем максимальная температура на поверхности, обращенной в помещение, отмечается лишь через несколько часов после наибольшего нагрева наружной поверхности. Основные характеристики теплофизических процессов, подлежащие

расчету, — это степень затухания температурных колебаний внутр конструкции, а иногда и время, необходимое для полного прогрева последней.

Поскольку современные конструкции зданий обычно состоят из нескольких слоев, теплофизические расчеты указанных выше величин должны быть отнесены также и к слоистым конструкциям.

Затухание температурных колебаний в каком-либо произвольно выбранном слое слоистой ограждающей конструкции не может быть определено независимо от особенностей расположения этого слоя в конструкции, так как оно в большинстве случаев зависит от влияния соседних конструктивных слоев, расположенных далее по пути движения тепловой волны. Ранее эти же положения были рассмотрены в отношении вычисления коэффициентов теплоусвоения поверхности тонких конструктивных слоев, т. е. определения величин, связанных с процессом распространения температурных колебаний. Поэтому расчет затухания температурных колебаний внутри слоистой ограждающей конструкции необходимо начинать с последнего конструктивного слоя на пути движения тепловой волны и переходить последовательно от слоя к слою, приближаясь к поверхности конструкции, непосредственно воспринимающей периодические тепловые воздействия. Это значит, что при расчете теплоустойчивости в летних условиях, когда периодическому нагреву подвергается наружная поверхность ограждения, расчет начинается с конструктивного слоя, граничащего с воздухом помещения.

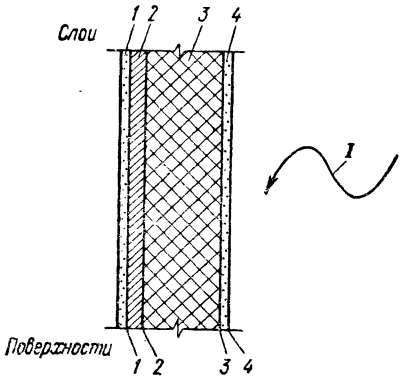


Рис. V.2. Нумерация конструктивных слоев и их поверхностей при расчете затухания температурных колебаний:
I — периодические тепловые воздействия; *1; 2; 3; 4* — нумерация слоев

Соответственно этому назначается нумерация слоев при расчете затухания колебаний температуры внутри конструкции (рис. V.2).

Метод расчета затухания [54] основан на решении дифференциального уравнения (I.7) нестационарного потока тепла для случая гармонических колебаний температуры с помощью гиперболических функций комплексного переменного и использования понятий о коэффициенте теплоусвоения и условной толщине.

Формулы для приближенного расчета, приведенные далее, получены путем исключения из точных формул комплексных чисел, что приводит к некоторому искажению закономерностей затухания температур, происходящему, однако, для распространенных конструкций зданий в допустимых для практики пределах.

Основная часть расчета затухания колебаний температур в ограждающей конструкции сводится к описанному выше последо-

вательному вычислению коэффициентов теплоусвоения Y поверхностей конструктивных слоев, в порядке их нумерации, указанной на рис. V.2. Для толстых слоев принимается, что $Y=s$.

Затухание амплитуд температурных колебаний в однородной ограждающей конструкции следует определять по формуле:

$$\nu=0{,}9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}}\frac{(\alpha_в+s)(\alpha_н+s)}{2s\alpha_н}, \qquad (V.8)$$

где D — характеристика тепловой инерции конструкции; $\alpha_в$ и $\alpha_н$ —

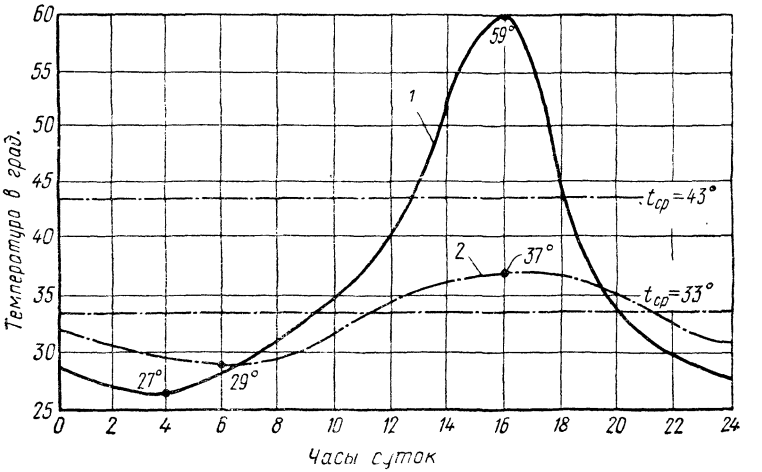


Рис. V.3. Изменения в течение суток температуры воздуха в межстекольном пространстве жилых зданий в сухом жарком климате (по данным Б. Ф. Васильева и К. Ширдатова):

1 — окно ю-з ориентации без солнцезащиты (Бухара, 1954 г.); *2* — окно ю-ю-з ориентации с солнцезащитой (наружные ставни-жалюзи); Ашхабад, 1955 г.

коэффициенты теплообмена на внутренней и наружной поверхностях ограждения; s — коэффициент теплоусвоения материала.

Затухание амплитуд колебаний температур в слоистой ограждающей конструкции определяется по формуле:

$$\nu=0{,}9e^{\frac{\Sigma D}{\sqrt{2}}}\frac{(s_1+\alpha_в)(s_2+Y_1)(s_3+Y_2)\ldots(s_n+Y_{n-1})}{(s_1+Y_1)(s_2+Y_2)(s_3+Y_3)\ldots(s_n+Y_n)}\cdot\frac{\alpha_н+Y_n}{\alpha_н}, \qquad (V.8а)$$

где ΣD — характеристика тепловой инерции ограждающей конструкции; s_1, s_2, s_3, ..., s_n — коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев; Y_1, Y_2, Y_3, ..., Y_n — коэффициенты теплоусвоения поверхности слоев, воспринимающей тепловую волну; $\alpha_в$, $\alpha_н$ — коэффициенты теплообмена на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции.

Индексы при буквенных обозначениях соответствуют порядку номеров слоев, причем нумерация последних принимается, как было сказано ранее, в направлении, обратном движению тепловой волны.

Если в конструкции имеется воздушная прослойка, ее коэффициент теплоусвоения $Y_{\text{вз.пр}}$ определяется по формуле (V.3), полагая, что для воздуха $s=0$, и тогда

$$Y_{\text{вз.пр}}=\frac{s_2}{1+R_{\text{вз.пр}}s_2}, \qquad \text{(V.3а)}$$

где s_2 — коэффициент теплоусвоения материала, ограничивающего прослойку; $R_{\text{вз.пр}}$ — термическое сопротивление воздушной прослойки. Затухание температурных колебаний в невентилируемой воздушной прослойке

$$\nu_{\text{вз.пр}}=1+Y_{\text{вз.пр.}}\cdot R_{\text{вз.пр}}. \qquad \text{(V.9)}$$

Например, если воздушная прослойка ($R_{\text{вз.пр}}=0{,}2$ *град·м²·ч/ккал*) имеется в конструкции из пенобетона, т. е. $s_2=2{,}37$ *ккал/м²·ч·град*, то $Y_{\text{вз.пр}}=\frac{2{,}37}{1+0{,}2\cdot 2{,}37}=1{,}61$ и затухание температурных колебаний в ней: $\nu_{\text{вз.пр}}=1+1{,}61\cdot 0{,}2=1{,}32$. Это значит, что в конструкции с воздушной прослойкой затухание температурных колебаний возрастает в 1,32 раза, поскольку в формуле (V.8а), дающей величину полного затухания в ограждающей конструкции, значения затухания в отдельных ее слоях перемножаются, т. е.

$$\nu_{\text{общ}}=\nu_1\nu_2\ldots\nu_n\nu_{\text{н}}. \qquad \text{(V.10)}$$

При предварительных ориентировочных вычислениях теплофизических свойств ограждающих конструкций, формулы (V.8) и (V.8а) могут быть заменены следующим упрощенным выражением [5], не требующим предварительного вычисления коэффициентов теплоусвоения поверхностей слоев Y:

$$\nu_{\text{общ}}=e^{0{,}7\Sigma D}\left(0{,}83+3\frac{\Sigma R}{\Sigma D}\right)\beta_{\text{сл}}\beta_{\text{в.п}}{}^{*}, \qquad \text{(V.11)}$$

где ΣD — характеристика тепловой инерции ограждающей конструкции; ΣR — термическое сопротивление ограждающей конструкции $\beta_{\text{сл}}=0{,}85+0{,}15\frac{s_2}{s_1}$ — множитель, учитывающий соотношение коэффициентов теплоусвоения $\frac{s_2}{s_1}$ материалов двух основных конструктивных слоев ограждения, расположенных по направлению тепловой волны; $\beta_{\text{в.п}}=1+0{,}5R_{\text{вз.пр}}\frac{\Sigma D}{\Sigma R}$ — множитель, вводи-

---

* Формулы этого вида неприменимы для особо легких ограждающих конструкций с тепловой инерцией $D<2{,}5$.

мый при наличии воздушной прослойки в ограждающей конструкции.

Для наиболее распространенных в строительстве конструкций формула (V.11), основанная на замене многослойной конструкции однородной, приближенно эквивалентной ей по теплофизическим свойствам, дает результаты, достаточно удовлетворительно совпадающие с расчетами по (V.8) и (V.8а).

Пример V.4. Определить для летнего времени года затухание колебаний температур в панельной конструкции стены, выполненной из пенобетона (толщиной 0,28 *м*), с наружным фактурным слоем (толщиной 0,02 *м*). Коэффициент теплоусвоения пенобетона $s_{24}=2{,}37$; фактурного слоя $s_{24}=7{,}06$ *ккал/м²·ч·град*. Термическое сопротивление пенобетона: $R_1=0{,}28/0{,}18=1{,}56$; фактурного слоя $R_2=0{,}02/0{,}6=0{,}033$ *град·м²·ч/ккал*, где 0,18 и 0,6 — коэффициенты теплопроводности пенобетона и плотной фактуры. Характеристика тепловой инерции конструкции: $\Sigma D=R_1s_1+R_2s_2=1{,}56\cdot 2{,}37+0{,}033\cdot 7{,}06=3{,}93$.

Коэффициент теплоусвоения наружной поверхности конструкции

$$Y_н=\frac{R_1s_1^2+s_2}{1+R_1s_2}=\frac{0{,}033\cdot 7{,}06^2+2{,}37}{1+0{,}033\cdot 2{,}37}=3{,}90\ ккал/м^2\cdot ч\cdot град$$

Для внутренней поверхности $Y=s=2{,}37$ *ккал/м²·ч·град*, поскольку толщина пенобетона превышает толщину слоя резких колебаний. Зная эти физические величины, производим расчет затухания колебаний температуры по формуле (8а):

$$\nu=0{,}9e^{\frac{\Sigma D}{\sqrt{2}}}\frac{(s_1+\alpha_в)(s_2+Y_1)}{(s_1+Y_1)(s_2+Y_2)}\frac{\alpha_н+Y_2}{\alpha_н}=$$

$$=0{,}9e^{\frac{3{,}93}{\sqrt{2}}}\cdot\frac{(2{,}37+7{,}5)(7{,}06+2{,}37)}{(2{,}37+2{,}37)(7{,}06+3{,}90)}\frac{18{,}0+3{,}90}{18{,}0}=$$

$$=0{,}9\cdot 16{,}28\frac{93}{52}1{,}22=32{,}3.$$

По формуле (V.11) имеем:

$$\nu_{общ}=e^{0{,}7\cdot 3{,}93}\left(0{,}83+3\frac{1{,}59}{3{,}93}\right)0{,}9=28{,}58,$$

что отклоняется от предыдущего результата примерно на 12%.

Если стена обращена на запад, то расчетная амплитуда колебаний температуры на ее наружной поверхности (см. пример II.1) может быть принята $A_t=24{,}9°$.

Амплитуда на поверхности, обращенной в помещение (затухшая в 32,3 раза): $A_t'=24{,}9/32{,}3=0{,}77°$ *.

---

* Допустимое значение амплитуды колебаний температуры на внутренней поверхности ограждающих конструкций может быть определено по формуле:

$$A_t\leqslant 2{,}5-0{,}1\,(t_н-20)\ град,$$

где $t_н$ — среднемесячная температура наружного воздуха за июль месяц.

Панельная стена, рассмотренная в примере, удовлетворяет требованиям норм для самых южных районов СССР. В отношении абсолютной величины колебаний температуры на поверхности, обращенной в помещение, можно считать, что амплитуда, равная или меньшая, чем 1°, допустима во всех тех случаях, когда ограждаемые помещения не имеют систем радиационного охлаждения или кондиционирования воздуха.

Значения затухания ν колебаний температур в наружных стенах и бесчердачных покрытиях проверяются расчетом при среднемесячных значениях дневных летних температур более 25°. При проектировании покрытий для зданий в южных районах целесообразно применять защиту водоизоляционного ковра светлым гравием, а покрытия жилых и общественных зданий осуществлять с вентилируемыми продухами достаточной высоты (не менее 0,25 *м*; однако из условий эксплуатации и производства ремонтов желательно увеличивать эту высоту до 0,5 *м* и более).

Наружную часть стен целесообразно выполнять из материалов светлых тонов с малым коэффициентом поглощения солнечной радиации. В многоэтажных зданиях, эксплуатируемых в южных районах, которые отличаются большими колебаниями температуры в течение суток, становится целесообразным устройство стен с наружными лучеотражающими экранами (например, из листового алюминия), отделенными от основной конструкции дополнительной изоляцией от лучистого тепла и воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом [61]. У фасадов многоэтажных зданий токи восходящего воздуха могут иметь существенную скорость, а при озеленении и обводнении территории, прилегающей к зданию, достигается более низкая температура приточного воздуха, по сравнению с температурой поверхности стен вышерасположенных этажей.

В результате этого, температура конструкции под экраном может быть значительно снижена по сравнению с температурой поверхности обычных неэкранированных стен, что является существенным в отношении возможности уменьшения температуры в ограждаемых помещениях. Особое значение имеет защита световых проемов солнцезащитными устройствами, без применения которых обеспечение приемлемого для людей теплового состояния помещений становится невозможным. Натурные исследования, проведенные на крайнем юге, показывают, что максимальная температура межстекольного пространства окон при их солнцезащите может быть снижена на 20—25° по сравнению с температурой этого пространства, характерной для незащищенных окон (рис. V.3).

Солнцезащита и применение вентилируемых ограждающих конструкций являются наиболее эффективными мероприятиями в целях улучшения теплового состояния жилых помещений естественными средствами. Однако известное влияние на ограничение прогрева слоистых ограждающих конструкций может оказать целесообразный выбор теплоизолирующих материалов и даже ра-

циональное размещение конструктивных слоев с различными теплофизическими свойствами.

При прочих равных условиях, предпочтительно утепление из легких, но обладающих высокой удельной теплоемкостью материалов (например, древесно-волокнистых плит и т. д.). Применения предельно пористых утеплителей (например, минеральной и стеклянной ваты, мипоры и других пенопластов с очень малым объемным весом и т. д.) уместно избегать, имея в виду быстрый и интенсивный перенос тепла через такие материалы, происходящий в летних условиях не только путем теплопроводности, но также излучением и даже конвекцией.

Анализируя формулу (V.8а), можно установить, что наибольшее затухание температурных колебаний имеет место в тех многослойных ограждающих конструкциях, в которых чередуются конструктивные слои с малым и большим теплоусвоением, так как затухание в каком-либо слое ограждения характеризуется величиной $\frac{s_n + Y_{n-1}}{s_n + Y_n}$, зависящей от отношения коэффициентов теплоусвоения смежных конструктивных слоев.

В соответствии с этим утепление из легких материалов будет наиболее эффективным в тех случаях, когда оно расположено между двумя слоями из тяжелых конструктивных материалов с большим теплоусвоением. Из конструкций с воздушными прослойками наиболее теплоустойчивыми будут те конструкции, в которых воздушная прослойка расположена между слоями с большим теплоусвоением (из конструктивного бетона и т. д.).

В холодный период года, в целях повышения общей теплоустойчивости ограждающих конструкций отапливаемых помещений, целесообразно выполнять их внутреннюю часть в пределах слоя резких колебаний из плотных материалов с большим теплоусвоением, а в наружной части применять более легкие пористые материалы с малым теплоусвоением (рис. V.4).

В этом случае температурный режим внутренней части ограждающей конструкции, обладающей большим теплоусвоением, будет близок к температурным условиям внутреннего воздуха и колебания температуры внутри помещения будут наименьшими.

Для южных районов в жаркий период года, когда чрезмерное и далеко выходящее за пределы комфортных условий повышение температуры воздуха жилых помещений становится вероятным, такое расположение конструктивных слоев будет целесообразным только при оборудовании помещений систематически действующими устройствами радиационного охлаждения; в этом случае выполнение внутренней части конструкции из плотных материалов способствует ее равномерному охлаждению и более удобно для размещения трубопроводов.

В ограждающих конструкциях помещений без систематически действующих охлаждающих устройств выполнение внутренней части конструкции из плотных материалов может привести к большей аккумуляции тепла к концу дневного периода; в вечернее и ночное

время это тепло будет поступать в помещение, усиливая дискомфортность его теплового состояния. Поэтому в районах с значительными колебаниями температур наружного воздуха в течение суток (и особенно при использовании конструкций, вентилируемых в ночное время этим воздухом) целесообразнее выполнять из более плотных материалов наружную часть конструкции, учитывая ее вероятное охлаждение при отсутствии прямого солнечного облучения и особенно в ночное время.

Такое расположение материалов будет способствовать более быстрому охлаждению конструкции в ночной период и меньшей аккумуляции тепла в конструктивных слоях, граничащих с помещением.

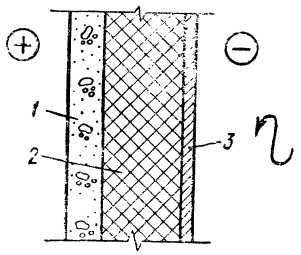


Рис. V.4. Расположение конструктивных слоев, обеспечивающее наибольшую теплоустойчивость ограждений отапливаемых помещений в холодный период года:

1 — внутренняя часть из плотных материалов с большим теплоусвоением (конструктивного бетона и т. д.); *2* — конструктивный слой из материалов с малым теплоусвоением (ячеистых бетонов и т. д.); *3* — наружный отделочный слой

Аналогичное расположение конструктивных слоев можно рекомендовать в слоистых конструкциях помещений с периодически используемыми системами или переносными агрегатами кондиционирования воздуха. В этом случае периодическое включение агрегатов с целью обеспечения необходимой степени комфортности теплового состояния помещений будет происходить с наименьшей затратой энергии; использование систем охлаждения окажется наиболее экономичным.

Запаздывание температурных колебаний на внутренней поверхности ограждающей конструкции по сравнению с колебаниями наружной суммарной температуры, т. е. сдвиг фаз ε_s в *ч*, вычисляется по следующей формуле:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{15}\left(40{,}5\Sigma D - \operatorname{arctg}\frac{\alpha_в}{\alpha_в + s_{в.п}\sqrt{2}} + \operatorname{arctg}\frac{s_{н.п}}{s_{н.п} + \alpha_н\sqrt{2}}\right), \quad (V.12)$$

где $s_{в.п}$ — коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения; $s_{н.п}$ — коэффициент теплоусвоения наружной поверхности, вычисляемые по формуле (V.3).

Величины arctg берутся в градусах, а не в радианах.

При предварительной оценке запаздывания наружных температурных колебаний на внутренней поверхности рассматриваемой ограждающей конструкции может быть использовано следующее простое выражение [5]:

$$\varepsilon_s = 2{,}7\Sigma D - 0{,}4, \quad (V.13)$$

где ΣD—суммарная характеристика тепловой инерции конструкции.

§ 4. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛОВ

Пол является одной из поверхностей помещений, с которой непосредственно соприкасаются ноги человека. В жилых зданиях возможен как кратковременный (измеряющийся минутами) контакт босой ноги с поверхностью пола, так и более длительный, но в легкой обуви; в общественных и производственных зданиях характерен весьма длительный, измеряющийся часами, контакт обутых ног с поверхностью пола.

Во всех этих случаях важны особенности теплообмена человеческого организма с поверхностью пола.

Если количество тепла, отдаваемое поверхности пола человеческой стопой меньше количества тепла, вырабатываемого терморегулирующей системой человеческого организма, ноги остаются теплыми, в противном же случае они охлаждаются, что связано с повышением вероятности простудных, ревматических и иных заболеваний [60].

Особенности теплообмена стопы с поверхностью пола определяются теплопоглощающей активностью этой поверхности; при выполнении конструкции пола и перекрытия из одного и того же материала (например, дерева), такая активность зависит только от теплопроводности, удельной теплоемкости и объемного веса этого конкретного материала, и выражается так называемым коэффициентом тепловой активности:

$$S=\sqrt{\lambda c\gamma}\ \ ккал/м^2\cdot ч^{1/2}\cdot град, \qquad (V.14)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, *ккал/м·ч·град;* c — удельная теплоемкость, *ккал/кг·град*; γ — объемный вес, *кг/м*^{3}.

У таких материалов, как древесина, легкие бетоны, теплоизоляционные плиты, коэффициент тепловой активности сравнительно мал; однако его величина существенно возрастает для плотных и тяжелых материалов, например, конструктивного бетона и железобетона.

В старинных гражданских зданиях, где полы и перекрытия выполнялись обычно из дерева (например, паркет по деревянной основе), многолетний опыт эксплуатации таких конструкций свидетельствовал о достаточно удовлетворительных их гигиенических качествах, не нарушающих заметным образом терморегуляцию человеческого организма. Удовлетворительные гигиенические качества дощатых и паркетных полов сохраняются и при укладке их по железобетонным перекрытиям. Коэффициент тепловой активности деревянных полов равен 10,0 (при $\lambda=0{,}15$ *ккал/м·ч·град,* $c=0{,}6$ *ккал/кг·град,* $\gamma=550$ *кг/м*^{3}), эта величина S и принята за нормируемую величину, необходимую для обеспечения требуемых гигиенических свойств пола в помещениях жилых домов, больниц, поликлиник и детских учреждений. Для полов в помещениях общественных, производственых и вспомогательных зданий допускается повышение коэффициента тепловой активности до 12,0, имея в виду

возможность устройства полов из ксилолита, паркета ограниченной толщины, покрытого защитным слоем, и других материалов.

Однако в строительстве зданий любого назначения большое распространение могут получить полы из однослойного линолеума и других синтетических покрытий, толщина которых настолько мала, что измеряется миллиметрами. Особенности теплообмена ноги человека с поверхностью такого пола, состоящего из очень тонкого покрытия, зависят уже и от свойств материала, из которого выполнено подстилающее основание, расположенное под таким покрытием. Если основание выполнено из плотного бетона, железобетона или других тяжелых материалов с большой тепловой активностью, конструкция такого пола с тонким покрытием оказывается неудовлетворительной в гигиеническом отношении. Поэтому, в целях придания полам из синтетических покрытий необходимых гигиенических свойств применяют двухслойные утепленные покрытия, нижняя часть которых выполняется из пористого материала.

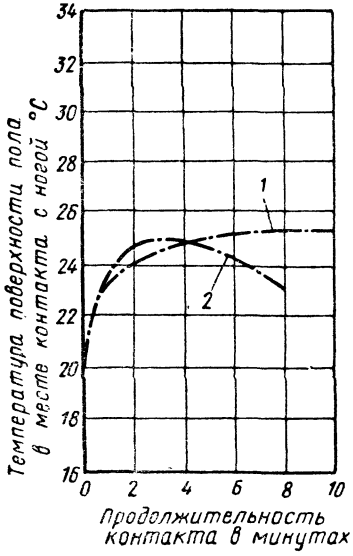


Рис. V.5. Изменение температуры поверхности пола в месте контакта с ней ноги без обуви (по данным А. Г. Гиндояна):
1 — паркетный пол на деревянном основании; *2* — пол из тонкого линолеума на бетонном основании

О степени соответствия гигиеническим требованиям условий теплообмена между босой ногой человека и поверхностью пола можно судить по экспериментальным исследованиям изменений температуры в месте соприкосновения ноги с полом (рис. V.5).

Если потери тепла меньше его количества, выделяемого организмом, наблюдается некоторое повышение температуры в месте контакта, что характерно, например, для паркетного пола; наоборот, если потери тепла превышают его количество, продуцируемое человеческим организмом, то температура в месте соприкосновения быстро начинает падать, что свидетельствует об охлаждении ноги, а следовательно, о неудовлетворительных качествах пола в гигиеническом отношении [60]. Такое охлаждение ноги человека наблюдается, например, при ее контакте с полом из тонкого однослойного линолеума, уложенного по основанию из плотного бетона или железобетона. Для того, чтобы такие полы стали удовлетворительными в гигиеническом отношении, необходимо укладывать тонкие синтетические покрытия по основанию из дерева, теплоизоляционных плит или легких бетонов, а при укладке синтетических изделий непосредственно по поверхности бетонного или железобетонного

основания увеличивать толщину этих изделий, применяя двухслойный линолеум и другие покрытия с повышенными теплоизоляционными свойствами.

В помещениях с температурой 23° и выше разность температур подошвы ноги без обуви (принимаемой около 32°) и пола настолько уменьшается, что теплофизические свойства пола становятся безразличными в гигиеническом отношении. Это позволяет выполнять полы из керамических плиток в банных и ванных помещениях.

Учитывая гигиенические требования, полы в помещениях с длительным пребыванием людей и нормальной температурой необходимо конструировать таким образом, чтобы количество тепла, поглощаемого поверхностью пола, было меньше количества тепла, продуцируемого организмом (и притекающего к ступням ног) или, по крайней мере, не превышало этого количества. Однако это гигиеническое условие осложняется неопределенностью в отношении длительности соприкосновения ноги человека с полом и теплозащитных свойств используемой при этом обуви.

Чем длительнее период соприкосновения ног человека с полом, тем больше глубина активного слоя конструкции, от теплофизических свойств которого зависит поглощение тепла поверхностью пола. Аналогичная зависимость толщины слоя активной теплоемкости (слоя резких колебаний температуры) от длительности периода внешних тепловых воздействий отмечалась ранее при изложении основных понятий теории теплоустойчивости.

Пределы колебаний длительности контакта ног человека с полом известны. Они могут изменяться от 1—2 *мин* при соприкосновении ног без обуви с полом спален и других жилых помещений и до 6—7 *ч* при контакте с полом рабочих помещений хорошо обутых ног.

Последняя наибольшая длительность является самой невыгодной для расчета, поскольку в этом случае в процесс охлаждения ног человека вовлекается наибольшая активная толщина конструкции; естественно, что при меньшей длительности контакта к конструкции пола предъявляются более ограниченные теплофизические требования, поскольку в процесс теплообмена вовлекаются только слои пола, непосредственно граничащие с его поверхностью.

Для расчета по наиболее невыгодным условиям максимальной длительности контакта ног человека с полом оказывается возможным использовать технику расчетов, основанных на теории теплоустойчивости.

В самом деле, если условно принять период тепловых воздействий в 6,28 *ч* (что примерно соответствует продолжительности рабочего дня), коэффициент теплоусвоения становится по своей абсолютной величине равным коэффициенту тепловой активности, т. е. основному теплофизическому показателю, характеризующему теплопоглощающую способность пола:

$$s_{6,28}=\sqrt{\lambda c\gamma\frac{2\pi}{\tau}}=\sqrt{\lambda c\gamma\frac{6,28}{6,28}}=\sqrt{\lambda c\gamma}=\bar{S}\approx 2s_{24}, \qquad (V.15)$$

где $\tau = 2\pi = 6{,}28$ — длительность периода тепловых воздействий.

Это позволяет определять активную глубину слоистой конструкции пола точно таким же образом, как ранее определялась толщина слоя резких колебаний температуры в любых слоистых конструкциях (см. примеры V-1 и V-5), т. е. с использованием формулы (V.3).

Поскольку коэффициент теплоусвоения при периоде тепловых воздействий в 24 *ч* $s_{24} = 0{,}51\sqrt{\lambda c\gamma} \approx 0{,}5\sqrt{\lambda c\gamma}$, для определения коэффициента тепловой активности достаточно принять удвоенную величину s_{24}, имеющуюся в таблице приложения.

В зарубежной строительной практике, где теория теплоустойчивости не используется для теплофизических расчетов, принята оцен-

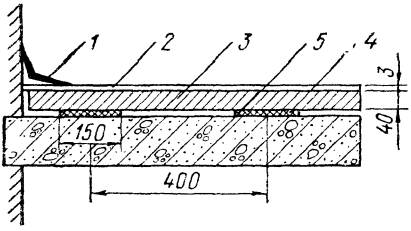


Рис. V.6. Конструктивная схема пола из линолеума с основанием из керамзитобетонных плит:

1 — покрытие пола (линолеум); *2* — прослойка клеящей мастики; *3* — плита основания пола; *4* — звукоизоляционные прокладки; *5* — железобетонные плиты перекрытия

ка гигиенических свойств пола и допустимой величины коэффициента тепловой активности его поверхности ($\bar{S} \leqslant 10{,}0$) по значениям отношения δ_1^2/a_1, где δ — толщина в *м* верхнего покрытия пола (например, линолеума), a_1 — коэффициент температуропроводности этого покрытия в $м^2/ч$. При значении этого отношения $\delta_1^2/a \geqslant 0{,}4$ *ч* величина тепловой активности поверхности слоистой конструкции пола принимается равной тепловой активности материала покрытия, т. е. $\bar{S} = \bar{S}_1$. Если верхнее покрытие настолько тонко и температуропроводно, что принятая длительность контакта ноги человека с поверхностью пола до утраты требуемого гигиенистами теплового равновесия достигается только при вовлечении в процесс теплообмена нижнего подстилающего слоя, т. е. $\delta_1^2/a_1 < 0{,}4$, но $\delta_1^2 a_1 + \delta_2^2/a_2 \geqslant 0{,}4$, то принимается, что $\bar{S} = \bar{S}_1\ (1 + k_{1-2})$, где k_{1-2} — коэффициент, устанавливаемый по специальным таблицам или графикам.

Порядок теплофизического расчета слоистой конструкции пола виден из следующего примера.

Пример V.5. Определить показатель теплопоглощения и допустимость применения в жилых квартирах пола из линолеума толщиной 3 *мм*, с объемным весом 1100 $кг/м^3$, уложенного по слою керамзитобетона толщиной 0,04 *м*, с объемным весом 1200 $кг/м^3$ (рис. V.6).

Теплофизические свойства: 1) линолеума:

$\lambda_1 = 0{,}16$ *ккал/м · ч · град*;

$c_1 = 0{,}35$ *ккал/кг · град*;

$S_1 = 2s_{24} = 2 \cdot 4{,}0 = 8{,}0$ $ккал/м^2 \cdot ч \cdot град$;

2) керамзитобетона:

$\lambda_2 = 0{,}35$ *ккал/м · ч · град*;

$c_2 = 0{,}20$ *ккал/кг · град*;

$S = 2s_{24} = 2 \cdot 4{,}68 = 9{,}36$ *ккал/м² · ч · град*.

Характеристика тепловой инерции двух верхних слоев конструкции:

$$R_1\overline{S}_1 + R_2\overline{S}_2 = \frac{0{,}003}{0{,}16}8{,}0 + \frac{0{,}04}{0{,}35}9{,}36 = 0{,}15 + 1{,}03 = 1{,}18 > 1;$$

следовательно, активный слой (слой резких колебаний) располагается в пределах двух верхних слоев конструкции.

Тогда по формуле (V.3) показатель теплопоглощения поверхности пола составит:

$$\overline{Y} = \frac{R_1\overline{S}_1^2 + \overline{S}_2}{1 + R_1\overline{S}_2} = \frac{0{,}019 \cdot 8^2 + 9{,}36}{1 + 0{,}019 \cdot 9{,}36} = 8{,}97 < 10{,}0 \text{ } \textit{ккал/м}^2\textit{·ч·град}.$$

Следовательно, конструкция пола удовлетворяет теплофизическим требованиям, предъявляемым к полам жилых помещений, и может быть применена в жилых квартирах.

При использовании методики теплофизического расчета, распространенной за рубежом, получим для линолеума:

$$a_1 = \frac{\lambda}{c\gamma} = \frac{0{,}16}{0{,}35 \cdot 1100} = 0{,}00041; \; \delta_1 = 0{,}003 \text{ } м;$$

тогда отношение $\frac{\delta_1^2}{a_1} = \frac{0{,}009}{0{,}00041} = 22 > 0{,}4$ и, следовательно, $\overline{S} = \overline{S}_1$, т. е. $\overline{S} = \sqrt{\lambda_1 c_1 \gamma_1} = \sqrt{0{,}16 \cdot 0{,}35 \cdot 1100} = 7{,}8 < 10{,}0$ и конструкцию пола можно считать удовлетворительной.

§ 5. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ПОМЕЩЕНИЙ

Каждое помещение в здании имеет несколько видов ограждающих конструкций.

Кроме наружных ограждений, например, внешних стен, окон или других остекленных поверхностей, бесчердачных покрытий, чердачных перекрытий и полов, основанных на грунте, имеются внутренние конструкции, т. е. перегородки и внутренние несущие стены, полы, основанные на междуэтажных перекрытиях и т. д. Каждое из этих ограждений оказывает свое влияние на распределение и колебания температур в отапливаемых помещениях. Резкие колебания температуры помещений в течение суток нежелательны в гигиеническом отношении; при проектировании здания такие колебания могут быть ограничены путем улучшения теплофизических свойств ограждений, в целях придания помещениям необходимой теплоустойчивости.

Под теплоустойчивостью помещения понимается его свойство сохранять относительное постоянство температуры при колебаниях внешних тепловых воздействий или теплоотдачи отопительных при-

боров. Чем меньше колебания температуры воздуха в помещении, тем более оно теплоустойчиво.

Меньшие колебания температуры воздуха отмечаются в помещениях, где площадь внутренних ограждающих конструкций сравнительно велика, а площадь наружных относительно мала.

Наоборот, из практики эксплуатации зданий известно, что угловые помещения и вообще помещения с относительно большой площадью наружных ограждений отличаются значительными колебаниями температуры внутреннего воздуха как в летнее время года (при периодическом облучении солнцем), так и в зимнее (при колебаниях теплоотдачи отопительных приборов).

Колебания температуры внутреннего воздуха неблагоприятно отражаются на самочувствии человека. В качестве допустимых наибольших пределов таких колебаний в зимнее время года нормы устанавливают их амплитуду $A_t = \pm 1{,}5°$ при центральных отопительных системах и $A_t = \pm 3°$ — при печном отоплении.

В летнее время года для помещений с отсутствием кондиционирования воздуха может быть принята $A_t = \pm 2°$.

Эти допустимые наибольшие величины амплитуд температурных колебаний в дальнейшем будут все более уменьшаться по мере применения в массовом строительстве более совершенных конструкций, а также систем отопления и охлаждения воздуха в зданиях.

Величина амплитуды колебаний температуры зависит от изменения потока тепла, поступающего в помещение. В холодный период года этот поток выражается теплом, отдаваемым отопительными приборами, а в жаркий — теплом солнечных лучей и наружного воздуха, периодически проходящим через прозрачные и глухие ограждающие конструкции.

Амплитуда колебаний потока тепла может быть выражена в зависимости от среднего количества тепла $Q_{ср}$, поступающего в помещение:

$$A_Q = \psi Q_{ср}, \qquad (V.16)$$

где ψ представляет величину так называемого коэффициента неравномерности поступления тепла в помещение.

Среднее значение общего потока тепла через все наружные ограждения помещения может быть представлено в следующем виде:

$$Q_{ср} = \frac{\Delta t \Sigma F_н}{R_o^{ср}} \; ккал/ч, \qquad (V.17)$$

где Δt — перепад температур между внутренним и наружным воздухом, *град*; $\Sigma F_н$ — сумма площадей наружных ограждений помещения, $м^2$; $R_o^{ср}$ — средняя приведенная величина сопротивления теплопередаче наружных ограждений помещения, определяемая в соответствии с формулой (IV.3), $град \cdot м^2 \cdot ч/ккал$.

Иначе говоря, стационарный тепловой поток, проходящий через все наружные ограждения помещения в холодный период года —

есть ни что иное, как средние часовые тепловые потери, а в теплый — осредненный приток тепла в это помещение.

Подставляя формулу (V.17) в формулу (V.16), имеем:

$$A_Q = \psi Q_{ср} = \frac{\psi \Delta t \Sigma F_н}{R_0^{ср}}. \qquad (V.18)$$

Из теории теплоустойчивости известно, что амплитуда колебаний температур на внутренней поверхности наружного ограждения $A_{t\,в.п}$ равна отношению амплитуды колебаний теплового потока A_Q к коэффициенту теплоусвоения $Y_в$ внутренней поверхности этого ограждения, т. е.

$$A_{t\,в.п} = \frac{A_Q}{Y_в} \; град. \qquad (V.1а)$$

Такое выражение вытекает из самого понятия коэффициента теплоусвоения (V.1),
однако

$$A_Q = Q_{макс} - Q_{ср} = \alpha_в (t_{макс} - t_{в.п.\,макс}) - \alpha_в (t_{ср} - t_{в.п.ср}) =$$
$$= \alpha_в (t_{макс} - t_{ср}) - \alpha_в (t_{в.п.макс} - t_{в.п.ср}) = \alpha_в A_t - \alpha_в A_{t\,в.п} \qquad (V.19)$$

Таким образом, амплитуду колебаний теплового потока можно представить как разность двух тепловых потоков, один из которых идет на нагревание воздуха помещения, а другой вызывает повышение температуры внутренней поверхности наружных ограждений.

Поскольку колебания температуры воздуха в помещении, а также колебания скорости его движения — относительно незначительны, величины коэффициентов тепловосприятия $\alpha_в$ могут быть приняты неизменными как в момент наибольшего нагрева помещения, так и в момент наличия в нем средних температур.

Подставляя в выражение (V.19) значение $A_{t\,в.п}$ из формулы (V.1а), имеем:

$$A_Q = \alpha_в A_t - \alpha_в \frac{A_Q}{Y_в},$$

решая его относительно A_Q, получим:

$$A_Q = A_t \frac{\alpha_в Y_в}{\alpha_в + Y_в} = B A_t \; ккал/м^2 \cdot ч, \qquad (V.20)$$

$B = \frac{\alpha_в Y_в}{\alpha_в + Y_в}$ — так называемый коэффициент теплопоглощения внутренней поверхности ограждения, *ккал/м²·ч·град*. Этот коэффициент выражает общее количество тепла, воспринимаемого поверхностью ограждения при периодических колебаниях температуры, и устанавливает взаимосвязь изменений этого количества с колеблющейся температурой воздуха помещения.

Поскольку в конкретных теплофизических расчетах значения $\alpha_в$ принимаются постоянными, величины коэффициентов теплопоглощения B зависят только от тех конструктивных или утепляющих слоев ограждения, которые входят в слой резких температурных колебаний, имеющий сравнительно небольшую толщину. Например,

толщина слоя резких колебаний в кирпичной кладке составляет только 0,084 *м* и эта величина будет одинаковой как для сплошных кирпичных стен, так и для стен с внутренней частью толщиной в $^1/_2$ кирпича. Для конструкций с внутренней штукатуркой по кирпичу или фактурным слоем по легкому бетону величина B практически не зависит от толщины кирпичной кладки или бетона и остается неизменной как, например, для сплошных кирпичных стен, так и для стен, облицованных в $^1/_4$ кирпича. В связи с этим теплоустойчивость облегченных каменных стен с внутренней кирпичной облицовкой и применением пустот и теплоизоляционных вкладышей ничем не уступает сплошным каменным стенам. При небольшой толщине внутреннего отделочного слоя, отделенного воздушной прослойкой от стены, теплоустойчивость последней понижается.

Пример V.6. Определить коэффициент теплопоглощения при одной топке печи в сутки, $\tau=24$, для внутренней поверхности стены из пеносиликатных камней, имеющей внутренний отделочный слой из гипсовых плиток, отделенный воздушной прослойкой (см. пример V.3).

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности такой стены $s_{24}=2{,}69$.

Коэффициент теплопоглощения составит:

$$B=\frac{\alpha_в Y_в}{\alpha_в+Y_в}=\frac{7{,}5\cdot 2{,}69}{7{,}5+2{,}69}=\frac{20{,}18}{10{,}19}=2{,}0\ ккал/м^2\cdot ч\cdot град.$$

При отсутствии воздушной прослойки $s_{24}=3{,}28$ и коэффициент теплопоглощения

$$B_1=\frac{7{,}5\cdot 3{,}28}{7{,}5+3{,}28}=2{,}28\ ккал/м^2\cdot ч\cdot град.$$

Для окон и остекленных наружных дверей величина коэффициента теплопоглощения приближенно равна коэффициенту теплопередачи и может быть принята, например, равной $B=\frac{K}{1{,}08}=\frac{0{,}925}{R_0}$, где $K=\frac{1}{R_0}$ — коэффициент теплопередачи остекленного проема, *ккал/м² · ч · град*

Величины коэффициентов теплопоглощения находят применение при расчете теплоустойчивости помещений.

Для всего комплекса наружных и внутренних ограждений помещения выражение (V.20) представится в таком виде:

$$A_Q=\sum_n^1 F_в B A_t\ ккал/ч, \qquad (V.20а)$$

где $\Sigma F_в$ — сумма произведений площадей внутренней поверхности отдельных видов ограждений помещения на соответствующие этим ограждениям коэффициенты теплопоглощения.

Величина эта может быть названа теплопоглощающей способностью помещения.

Очевидно, что $\sum_n F_в B=F_1B_1+F_2B_2+\ldots+F_nB_n$.

Теплопоглощающая способность помещения равна амплитуде колебаний теплового потока, поглощаемого всеми ограждениями

помещения, при колебаниях температуры воздуха $A_t = 1°$ (поскольку $\sum F_в B = \frac{A_Q}{A_t}$).

Приравнивая выражения для A_Q (18) и (20а), получим:

$$\frac{\psi \Delta t \Sigma F_н}{R_o^{ср}} = A_t \Sigma F_в B.$$

Решая это выражение относительно $R_o^{ср}$, получим:

$$R_o^{ср} = \frac{\psi \Delta t \Sigma_н F_н}{A_t \Sigma F_в B} \; град \cdot м^2 \cdot ч / ккал \qquad (V.21)$$

и, решая относительно A_t, получим:

$$A_t = \frac{\psi \Delta t \Sigma F_н}{R_o^{ср} \Sigma F_в B} \; град. \qquad (V.22)$$

Формулы (V.21) и (V.22) устанавливают зависимость между величиной $R_o^{ср}$ — среднего приведенного значения сопротивления теплопередаче наружных ограждений помещения и величиной колебаний температуры воздуха в этом помещении в том случае, если поступление тепла в последнее имеет периодический характер.

При выводе предыдущих формул принято, что сдвиги фаз, т. е. несовпадения во времени между колебаниями теплового потока и колебаниями температуры внутреннего воздуха, а также между колебаниями теплового потока и колебаниями температур на внутренней поверхности ограждения отсутствуют. Поскольку при сдвиге фаз увеличивается теплопоглощение поверхностей ограждений, практическое значение несовпадений последнего вида может быть учтено введением поправочного коэффициента большего единицы, например, 1,08 к величине теплопоглощающей способности помещения, выражаемой формулой (V.20а).

Непосредственное влияние на колебания температуры воздуха оказывает только та часть поступающего в помещение тепла, которая передается воздуху путем конвекции. Поскольку в формулу (V.18), выражающую поток тепла через ограждения, входит и конвекционное и лучистое тепло, отсутствие непосредственного влияния лучеиспускания на колебания температуры воздуха учитывается введением коэффициента, меньшего единицы, например, 0,8 к величине $Q_{ср}$. Кроме того, вводится поправочный коэффициент, учитывающий негармоничность теплопоступлений.

Все эти уточнения влияют на общую величину коэффициента неравномерности ψ поступления тепла к поверхности ограждающих конструкций помещения. Предыдущие формулы выведены для расчета теплоустойчивости помещения в холодный период года. Однако теплоустойчивость помещений в любой период года зависит от перечисленных выше закономерностей и, в частности, от соотноше-

ния общих площадей наружных и внутренних ограждающих конструкций, т. е. от величины $\frac{\Sigma F_н}{\Delta F_в}$. Чем больше это соотношение, тем менее теплоустойчиво помещение.

В летний период колебания потока тепла, поступающего в помещение через его ограждения в результате периодического действия солнечных лучей и высокой температуры наружного воздуха, определяются амплитудой колебаний температуры на поверхности наружных ограждений, обращенной в помещение, а именно:

$$A_Q = \alpha_в A_{t_в}^{ср} = \alpha_в \Sigma \frac{A_{t_н} F_н}{\nu}, \qquad (V.23)$$

где $A_{t_в}$ — расчетная амплитуда колебаний суммарной наружной температуры (принимаемая для каждого вида ограждений с учетом солнечного облучения, в соответствии с ориентацией по странам света), *град*; $F_н$ — площадь рассматриваемого вида наружного ограждения, $м^2$; $\nu = \frac{A_{t_н}}{A_{t_{в.п}}}$ — затухание амплитуды суммарной наружной температуры, при передаче периодических тепловых воздействий сквозь толщу ограждающей конструкции; $\alpha_в$ — коэффициент теплообмена на поверхности ограждения, обращенной в помещение, *ккал/м²·ч·град*.

Очевидно, что в выражениях (V.21) и (V.22) величина коэффициента неравномерности поступлений тепла в помещение характеризует разновременность (сдвиг фаз) колебаний потока тепла по сравнению с колебаниями температур воздуха и поверхностей помещений. Такой сдвиг фаз в особенности характерен для летнего периода года, когда температура воздуха в помещении зависит от очень различных во времени периодических колебаний внешних тепловых воздействий.

В летнее время этот сдвиг фаз, помимо соотношения площадей наружных и внутренних ограждений, зависит, в частности, от разновременности проникания тепла через светопроемы и непрозрачные ограждения помещения. В связи с этим точные значения изменяющихся теплопоступлений и температуры помещений можно определить только последовательным расчетом для каждого часа суток, что и практикуется, например, при установлении тепловых нагрузок на системы кондиционирования воздуха. Обобщенные интегральные значения коэффициентов неравномерности поступления тепла ψ крайне приближенны. Для летнего периода значения коэффициента ψ принимают примерно в пределах от 0,6 до 0,7, а в зимний период эти значения зависят от особенностей агрегатов периодического отопления.

Дальнейшее обобщение результатов практических расчетов теплоустойчивости помещений может привести к уточнению и систематизации значений этих коэффициентов.

Если принять, что сдвиг фаз колебаний потока тепла по сравнению с колебаниями поверхностей помещения выражается величиной ψ, можно написать по аналогии с формулами (V.20а) и (V.23):

$$\psi\alpha_{в}\Sigma\frac{A_{t_{н}}F_{н}}{\nu_{ср}}=A_{t}\Sigma F_{в}B,$$

откуда

$$A_{t}=\frac{\psi\alpha_{в}}{\Sigma F_{в}B}\Sigma\frac{A_{t_{н}}F_{н}}{\nu_{ср}}, \qquad (V.24)$$

$$\nu_{ср}=\frac{\psi\alpha_{в}\Sigma A_{t_{н}}F_{н}}{A_{t}\Sigma F_{в}B}. \qquad (V.25)$$

Вычисление с помощью формул (V.24) и (V.25) амплитуды колебаний температуры воздуха и средней приведенной величины затухания колебаний температуры в ограждающих конструкциях наиболее правомерно для помещений с ограниченной площадью светопроемов.

При большой поверхности остекления помещения вообще теряют свойства теплоустойчивости и для поддержания необходимой степени теплового комфорта необходимо зимой совершенствование систем отопления, а летом применение систем радиационного охлаждения или кондиционирования воздуха; в любой период года целесообразно существенное повышение теплофизических качеств остекленных поверхностей по сравнению с обычным двойным остеклением.

В летний период поступление лучистого тепла через не защищенные от солнца окна имеет прерывистый в течение дня характер, но при использовании жалюзи, штор и других солнцезащитных устройств, изменения теплопоступлений приближаются к периодическим, сходным с поступлениями через легкие непрозрачные ограждения; эта последняя закономерность может быть принята при проведении ориентировочных расчетов, достаточных для определения необходимых теплофизических свойств отдельных ограждений помещения.

Тогда, при пользовании формулами (V.24) и (V.25) величина затухания для остекленных поверхностей вычисляется как $\nu=\alpha_{в}R_{о}$, что для двойного остекления составит $\nu=7{,}5\cdot0{,}435=3{,}26$.

Зависимости (V.21—V.22) и (V.24—V.25) могут быть применены для приближенного расчета колебаний температуры воздуха в помещениях.

Следует обратить внимание, что при этом расчете предполагается отсутствие воздухообмена, могущего влиять на колебания температуры помещений.

Особенности расчета теплофизических свойств ограждений при колебаниях температуры воздуха, вызванных периодически действующим отоплением в холодный период года, и нагревом помещений внешними тепловыми воздействиями в летний период, иллюстрируются нижеследующими примерами.

Пример V.7. Определить величины сопротивления теплопередаче стен углового помещения одноэтажного жилого здания с периодически действующим отоплением (рис. V.7), исходя из допустимой амплитуды колебаний внутреннего воздуха $\pm 3°$.

Наружная расчетная температура $t_н = -30°$, температура в помещении $t_в = +18°$. Коэффициент неравномерности поступления тепла $\psi = 0{,}5$. Расчетный перепад температур для наружных ограждений при местном периодически действующем отоплении можно принять:

$$\Delta t = \frac{2}{3}(30 + 18) = 32°.$$

При непроницаемой рулонной кровле, для чердачного перекрытия считаем $t_н = 0{,}75 \cdot 30 = 22°$ $\Delta t' = \frac{2}{3}(22 + 18) = 26°$. Для пола $\Delta t'' = 16°$.

Конструкция наружных стен — кирпичная кладка 0,25 *м* толщиной, утепленная изнутри фибролитовыми плитами, покрытыми сухой гипсовой штукатуркой. Чердачное перекрытие — из сборных деревянных щитов, защищенных гипсовой штукатуркой. Пол — деревянный по лагам.

Подсчеты площади наружных и внутренних поверхностей ограждений, необходимые для пользования формулой (V.21), сводим в следующую таблицу.

Наименование ограждающей конструкции	Площадь наружных ограждений, $F_н$			Перепад температур, Δt	Коэффициент теплопоглощения, B	Площадь внутренней поверхности ограждения, $F_в$	Теплопоглощение помещения, $F_в B$
	по наружному обмеру	надбавки	по расчету теплопотерь				
Наружные стены	29,4	1,13	33,2	32	2,65	22,8	60,5
Окна	6,0	1,13	6,8	32	2,35	6,0	14,1
Чердачное перекрытие	20,7	—	20,7	26	2,70	20,0	54,0
Деревянный пол (по лагам)	20,7	—	20,7	16	2,15	20,0	43,0
Перегородки (5 *см*, доски оштукатуренные)	—	—	—	—	2,55	29,7	75,9
Обстановка	—	—	—	—	1,55	20,0	31,0
Итого			$\sum F_н = 81{,}4$				$\sum F_в B = 278{,}5$

Площади наружных ограждений вычислены по наружному обмеру, и, кроме того, введен коэффициент 1,13, учитывающий обдувание ветром наружной поверхности ограждений.

Среднее приведенное значение перепада температур определяем по формуле:

$$\Delta t_{ср} = \frac{33{,}2 \cdot 32 + 6{,}8 \cdot 32 + 20{,}7 \cdot 26 + 20{,}7 \cdot 16}{81{,}4} = 26{,}5°.$$

Среднее приведенное значение сопротивления теплопередаче наружных ограждений помещения устанавливается в формуле (V.21).

$$R_o^{ср} = \frac{0{,}5 \Delta t \Sigma F_н}{A_t \Sigma F_в B} = \frac{0{,}5 \cdot 26{,}5 \cdot 81{,}4}{3{,}0 \cdot 278{,}5} = 1{,}29 \ м^2 \cdot ч \cdot град/ккал.$$

Необходимое сопротивление теплопередаче стен R_0' определим в соответствии с равенством (IV.3), приняв сопротивление теплопередаче чердачного перекрытия $R_0'''=1{,}6$, сопротивление теплопередаче окон с двойным остеклением $R_0''=0{,}43$ и сопротивление теплопередаче пола $R_0''''=2{,}4$.

$$R_0^{ср}=\frac{\Sigma F_н}{\frac{F_1}{R_0'}+\frac{F_2}{R_0''}+\frac{F_3}{R_0'''}+\frac{F_4}{R_0''''}}.$$

Заменяя числовыми значениями, получим:

$$1{,}29=\frac{81{,}4}{\frac{32{,}2}{R_0'}+\frac{6{,}8}{0{,}43}+\frac{20{,}7}{1{,}6}+\frac{20{,}7}{2{,}4}}.$$

Отсюда сопротивление стен теплопередаче $R_0'=1{,}28$ *м²·ч·град/ккал*.

Этому условию удовлетворяет стена из кирпича толщиной 0,25 *м*, утепленная плитами фибролита 0,10 *м* толщиной (при $\lambda=0{,}13$).

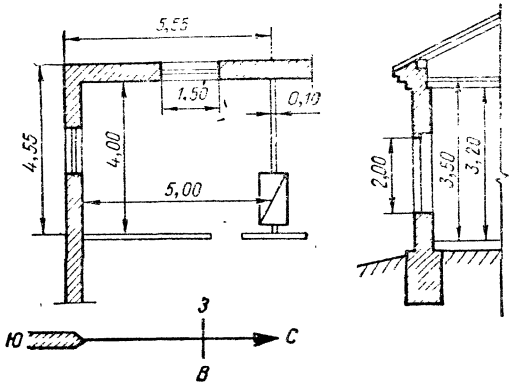


Рис. V.7. Угловое помещение жилого дома

Сопротивление теплопередаче такой стены (при внутренней сухой гипсовой штукатурке $\lambda=0{,}5$):

$$R_0'=0{,}133+\frac{0{,}02}{0{,}50}+\frac{0{,}10}{0{,}13}+\frac{0{,}25}{0{,}75}+0{,}05=$$

$$=1{,}37>1{,}28\ м^2\cdot ч\cdot град/ккал.$$

Пример V.8. Определить необходимые теплотехнические свойства ограждающих конструкций углового помещения, рассмотренного в предыдущем примере, из условий ограничения перегрева этого помещения в летнее время.

Продольная стена помещения обращена на запад, а торцовая — на юг.

Ограждающие конструкции те же, что в предыдущем примере. Климатические условия приняты для г. Гурьева (45° с. ш.; сухие условия). Для материалов наружных стен: 1) кирпичная кладка $\lambda=0{,}6$ *ккал/м·ч·град*; $s=7{,}70$;

2) фибролит ($\gamma=350$ *кг/м³*) $\lambda=0{,}10$; $s=2{,}30$ *ккал/м²·ч·град*;

3) штукатурка гипсовая сухая $\lambda=0{,}17$; $s=2{,}97$.

Для материалов чердачного перекрытия:

1) шлак гранулированный $\lambda=0{,}12$; $s=1{,}77$; $\gamma=500$ *кг/м³*;

2) древесина сосновая $\lambda=0{,}12$; $s=3{,}21$;

3) штукатурка гипсовая сухая $\lambda=0{,}17$; $s=2{,}97$.

Характеристики тепловой инерции стены и чердачного перекрытия:

$$D_1 = \Sigma Rs = \frac{0{,}25}{0{,}6}\,7{,}7 + \frac{0{,}10}{0{,}10}\,2{,}3 + \frac{0{,}015}{0{,}17}\,2{,}97 = 3{,}20 + 2{,}3 + 0{,}27 = 5{,}77;$$

$$D_2 = \Sigma Rs = \frac{0{,}10}{0{,}12}\,1{,}77 + \frac{0{,}05}{0{,}12}\,3{,}21 + \frac{0{,}015}{0{,}17}\,2{,}97 = 1{,}47 + 1{,}32 + 0{,}27 = 3{,}06.$$

Коэффициенты теплоусвоения поверхности ограждающих конструкций, обращенной в помещение:

1) для стены

$$Y_в = \frac{R_1 s_1^2 + s_2}{1 + R_1 s_2} = \frac{0{,}09 \cdot 2{,}97^2 + 2{,}3}{1 + 0{,}09 \cdot 2{,}3} = 2{,}55 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град};$$

2) для чердачного перекрытия

$$Y'_в = \frac{0{,}09 \cdot 2 \cdot 97^2 + 3{,}21}{1 + 0{,}09 \cdot 3{,}21} = 3{,}10 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Затухание наружных температурных колебаний:

1) в толще стены

$$\nu_1 = 0{,}9e^{\frac{5{,}77}{\sqrt{2}}} \frac{(2{,}97 + 7{,}5)\,(2{,}30 + 2{,}55)\,(7{,}70 + 2{,}30)\,(20{,}0 + 7{,}70)}{(2{,}97 + 2{,}55)\,(2{,}30 + 2{,}30)\,(7{,}70 + 7{,}70)\,20{,}0} =$$

$$= 0{,}9 \cdot 57{,}97\,\frac{10{,}47 \cdot 4{,}85 \cdot 10{,}0 \cdot 27{,}7}{5{,}52 \cdot 4{,}66 \cdot 15{,}4 \cdot 20{,}0} = 52 \cdot 1{,}89 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}65 \cdot 1{,}38 = 91{,}8;$$

2) в толще чердачного перекрытия

$$\nu_2 = 0{,}9e^{\frac{3{,}06}{\sqrt{2}}} \frac{(2{,}97 + 7{,}5)\,(3{,}21 + 3{,}10)\,(1{,}77 + 3{,}21)\,(20{,}0 + 1{,}77)}{(2{,}97 + 3{,}10)\,(3{,}21 + 3{,}21)\,(1{,}77 + 1{,}77)\,20{,}0} = 19{,}80;$$

3) для оконных проемов с двойным остеклением

$$\nu_3 = 3{,}26.$$

Расчетные амплитуды наружных температурных колебаний:

1) для стены, обращенной на запад;

$$A_t = \frac{0{,}65\,(570 - 130)}{20} + 9 = 23{,}2°;$$

2) для стен, обращенных на юг; $A'_t = \frac{0{,}65\,(360 - 95)}{20} + 9 \cdot 0{,}93 = 17{,}0°$;

3) для чердачного перекрытия $A''_t = \frac{0{,}9\,(790 - 295)}{20} + 9 \cdot 0{,}93 = 30{,}5°$;

4) для зашторенного окна с двойным остеклением, обращенного на запад $A'''_t = \frac{0{,}4\,(570 - 130)}{20} + 9 = 17{,}7°$; обращенного на юг $A''''_t = \frac{0{,}4\,(360 - 95)}{20} +$

$+ 9 \cdot 0{,}93 = 13{,}6°$.

Средняя величина расчетной амплитуды для окон: $A_t^{ср} = 15{,}6°$ (по экспериментальным данным $A_t = 16°$; см. рис. V.3).

Если принять в формуле (V.24) коэффициент неравномерности поступления тепла $\psi = 0{,}7$, а суммарное теплопоглощение и площади ограждений по таблице предыдущего примера, расчетная амплитуда колебаний температуры воздуха в помещении будет:

$$A_{t_в} = \frac{0{,}7 \cdot 7{,}5}{278{,}5}\left(\frac{23{,}2 \cdot 18{,}2 + 17{,}0 \cdot 15{,}0}{91{,}8} + \frac{20{,}7 \cdot 30{,}5}{19{,}8} + \right.$$

$$\left. + \frac{15{,}6 \cdot 6{,}8}{3{,}26}\right) = 0{,}019\,(7{,}4 + 32 + 32{,}5) = 1{,}37°.$$

Амплитуда колебаний воздуха помещения меньшая, чем 2°, допустима, но возможное ее дальнейшее снижение будет благоприятным для людей, постоянно находящихся в помещении. Поскольку наибольшее влияние на колебания температуры в помещении оказывают чердачное перекрытие и недостаточно защищенные окна, следует улучшить теплофизические свойства этих ограждающих конструкций. Если увеличить толщину засыпки чердачного перекрытия с 10 *см* до 15 *см* и защитить окна наружными жалюзи, то характеристика тепловой инерции перекрытия возрастет до $D = 3{,}79$, а затухание увеличится до 33-кратного.

При коэффициенте отражения солнечных лучей наружными жалюзи $p = 0{,}5$ расчетная амплитуда колебаний температуры на наружной поверхности окон:

$$\left.\begin{aligned} &\text{обращенных на запад: } A_t''' = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}5\,(570 - 130)}{20{,}0} + 9 = 13{,}4° \\ &\text{обращенных на юг: } A_t''' = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}5\,(360 - 95)}{20{,}0} + 9 \cdot 0{,}93 = 10{,}9 \end{aligned}\right\} \text{средняя } 12{,}1°,$$

а затухание для защищенных окон

$$\nu = \frac{3{,}26}{0{,}5} = 6{,}52.$$

Тогда расчетная амплитуда колебаний температуры воздуха в помещении составит:

$$A_{t_в} = \frac{0{,}7 \cdot 7{,}5}{278{,}5}\left(\frac{23{,}2 \cdot 18{,}2 + 17{,}0 \cdot 15{,}0}{91{,}8} + \frac{20{,}7 \cdot 30{,}5}{33} + \frac{12{,}1 \cdot 6{,}8}{6{,}52}\right) =$$

$$= 0{,}019\,(7{,}4 + 19{,}4 + 12{,}6) = 0{,}75°.$$

Сокращение колебаний температуры помещения почти в два раза достигнуто за счет применения солнцезащитных устройств и утепления чердачного перекрытия при незначительных единовременных затратах.

ГЛАВА VI

ВЛАЖНОСТНОЕ СОСТОЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ УВЛАЖНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЙ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

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 влагосодержание, как это более подробно рассмотрено далее; 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 годичного 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 (тех-

нологической) 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. Различают материалы быстро высыхающие и медленно высыхающие *. К первым относятся, например, керамика, хорошо обожженный кирпич, конструктивные и крупнопористые бетоны; ко вторым — шлакобетоны, золобетоны и другие неоднородные бетоны с гигроскопическими компонентами или пористыми заполнителями.

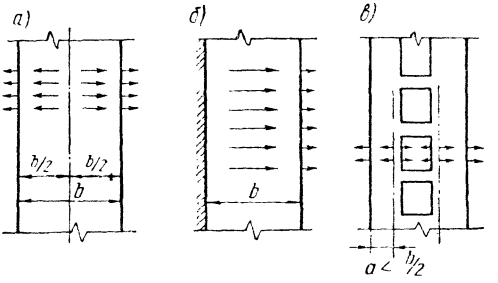


Рис. VI.1. Характерный размер ограждающих конструкций, влияющий на быстроту и интенсивность естественной сушки:

а — двусторонняя сушка (характерный размер — половина толщины конструкции — $b/2$); *б* — односторонняя, например, стена подвала (характерный размер — полная толщина конструкции — b); *в* — двусторонняя сушка пустотной конструкции (часть влаги испаряется внутрь пустот; характерный размер $a<b/2$)

Характерным размером высыхающего ограждения является наибольшее расстояние (по поперечному сечению конструкции), на которое необходимо переместиться влаге для того, чтобы достигнуть поверхности, с которой происходит испарение. При испарении с обеих противолежащих поверхностей однородной конструкции это

---

* Это понятие связано с энергетическим уровнем, необходимым для отрыва влаги от поверхности материала, равным, согласно уравнению Гиббса — Гельмгольца, изменению свободной энергии dF на этой поверхности; $dF = \frac{RT}{M} \ln \varphi$, где R — универсальная газовая постоянная; T — температура °К; M — молекулярный вес; φ — относительное давление пара в материале, равное относительной влажности воздуха. При постоянной температуре энергия связи влаги с материалом является функцией относительной влажности и связана с влагоемкостью и гигроскопическими свойствами материала.

будет половина ее толщины, а при одностороннем высыхании — вся толщина (рис. VI.1).

В пустотных конструкциях этот характерный размер сокращается за счет испарения части влаги внутрь пустот или воздушных прослоек. Эта влага, испарившаяся внутрь пустот, обычно удаляется при последующей фильтрации воздуха сквозь конструкцию.

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 (например, 6—8%) для крупноблочных шлакобетонных стен жилых зданий, эксплуатируемых в условиях умеренно-влажного климата). При использовании пустотных изделий для таких стен их нормальная влажность обычно снижается (например, до 4—5%), а теплозащитные свойства повышаются.

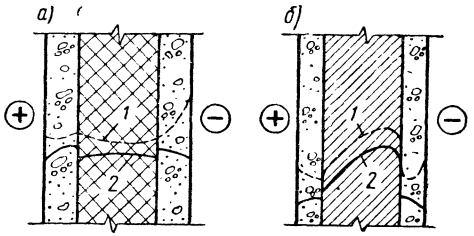


Рис. VI.2. Распределение влажности в слоистых стенах со средней частью, выполненной из материалов с различными свойствами:

а — из крупнопористых невлагоемких материалов; *б* — из гигроскопических, влагоемких, медленно высыхающих; *1* — при увлажнении конструкции; *2* — при высыхании конструкции

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

В конструкциях слоистых стен это обеспечивается применением материалов с различной влагоемкостью и крупностью пор*. Жидкая 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. VI.2, *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 кли-

---

* Такие материалы обладают различным потенциалом Θ переноса влаги. В термодинамическом смысле при постоянных объеме и температуре $\Theta = \frac{\partial F}{\partial m}$, где F — поверхностная энергия; m — масса влаги.

мате, 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 *.

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 внешних облицовочных слоев (рис. VI.2, *б*). Подобное распределение влажности в массивных стенах может быть благоприятным для малоэтажных зданий, возводимых в юго-восточных районах СССР и подвергающихся перегреву в течение длительного летнего периода года.

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 в любых климатических условиях и особенно во влажных. Применение таких стен, помимо повышенной влажности, приводит к их постепенному разрушению, проявляющемуся в короблении, выпучивании и отслоении отделок 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.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

В атмосферном воздухе, а следовательно, и в воздухе помещений всегда содержится определенное количество водяного пара.

Количество влаги в граммах, содержащееся в 1 $м^3$ воздуха, называется объемной концентрацией пара или абсолютной

* Только при указанной конструктивной схеме обеспечивается удовлетворительное влажностное состояние слоистых крупнопанельных конструкций, внешние слои которых бетонируются при непосредственном контакте со средней утепляющей частью. При такой технологии изготовления панелей выполнение утепляющего слоя из органических (фибролит, торфоизоляционные плиты) или влагоемких утеплителей (пенозолобетон и т. д.) не может быть рекомендовано. Влажность утеплителя в конструкциях трехслойных панелей должна быть ниже влажности внешних слоев, что может быть обеспечено только при использовании утеплителей с малой влагоемкостью (например, пеностекло и т. д.).

влажностью f в $г/м^3$. Водяной пар, входящий в состав паровоздушной смеси занимает тот же объем v, что и сама смесь; температура T пара и смеси одинакова.

Энергетический уровень молекул водяного пара, содержащихся во влажном воздухе, выражается парциальным давлением e *

$$e=\frac{M_e R}{\mu_м v} T \quad кГ/м^2 \text{ или } мм\ рт.\ ст. \tag{VI.1}$$

где M_e — масса водяного пара, *кг*; $\mu_м$ — молекулярный вес, *кг/моль*: R — универсальная газовая постоянная, $кГ \cdot м/град \cdot моль$, или $мм\ рт.\ ст \cdot м^3/град \cdot моль$.

Физическая размерность парциального давления зависит от того, в каких единицах выражены давление и объем, входящие в универсальную газовую постоянную.

Если давление измеряется в $кГ/м^2$, то парциальное давление имеет такую же размерность; при измерении давления в *мм рт. ст.* парциальное давление выражается в этих же единицах.

В строительной теплофизике для парциального давления водяного пара обычно принимается размерность, выраженная в *мм рт. ст.*

Величина парциального давления и разность этих давлений в смежных сечениях рассматриваемой материальной системы используются для расчетов диффузии водяного пара внутри ограждающих конструкций. Величина парциального давления дает представление о количестве и кинетической энергии водяного пара, содержащегося в воздухе; количество это выражается в единицах, измеряющих давление или энергию пара.

Сумма парциальных давлений пара и воздуха равна полному давлению паровоздушной смеси

$$P=P_e+P_в=\sum_i^1 p_i. \tag{VI.2}$$

Парциальное давление водяного пара, как и абсолютная влажность паровоздушной смеси, не может возрастать беспредельно в атмосферном воздухе с определенной температурой и барометрическим давлением.

Предельное значение парциального давления E в *мм рт. ст.* соответствует полному насыщению воздуха водяным паром $F_{макс}$ в $г/м^3$ и возникновению его конденсации, происходящей обычно на материальных поверхностях, граничащих с влажным воздухом или на поверхности пылинок и аэрозолей, содержащихся в нем во взвешенном состоянии.

Конденсация на поверхности ограждающих конструкций обычно вызывает нежелательное увлажнение этих конструкций; конденсация на поверхности аэрозолей, взвешенных во влажном воздухе, связана с легким образованием туманов в атмосфере, загрязненной

---

* Это давление иногда называют упругостью водяного пара.

промышленными выбросами, копотью и пылью. Абсолютные значения величин E в *мм рт. ст.* и F в *г/м*^{3} близки между собой при обычных температурах воздуха отапливаемых помещений, а при $t = 16°$ С они равны друг другу.

С повышением температуры воздуха величины E и F растут. При постепенном понижении температуры влажного воздуха величины e и f, имевшие место в ненасыщенном воздухе с начальной более высокой температурой, достигают предельных максимальных значений, поскольку эти значения уменьшаются с понижением температуры. Температура, при которой воздух достигает полного насыщения, называется температурой точки росы или просто точкой росы.

Значения величин E для влажного воздуха с различной температурой (при барометрическом давлении 755 *мм рт. ст.*) указаны в приложении I.

При отрицательных температурах следует иметь в виду, что давление насыщенного водяного пара над льдом меньше давления над переохлажденной водой. Это видно из рис. VI.3, на котором представлена зависимость парциального давления насыщенного водяного пара E от температуры.

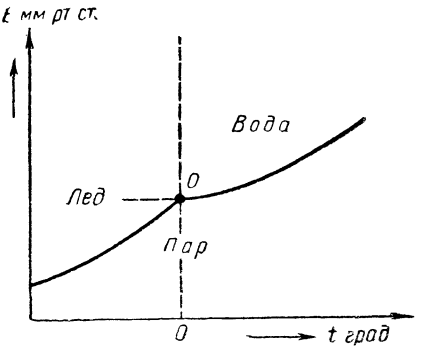


Рис. VI.3. Зависимость парциального давления насыщенного водяного пара от температуры:
O — тройная точка

В точке O, которая называется тройной, пересекаются границы трех фаз: льда, воды и пара. Если продолжить пунктиром кривую линию, отделяющую жидкую фазу от газообразной (воду от пара), она пройдет выше границы твердой и газообразной фаз (пара и льда), что свидетельствует о более высоких значениях парциальных давлений насыщенного водяного пара над переохлажденной водой.

Степень насыщения влажного воздуха водяным паром выражается относительным парциальным давлением или относительной влажностью.

Относительная влажность φ является отношением парциального давления водяного пара e в рассматриваемой воздушной среде к максимальному значению этого давления E, возможному при данной температуре. В физическом отношении величина φ безразмерна и ее значения могут изменяться от 0 до 1; в строительной практике величину относительной влажности обычно выражают в процентах:

$$\varphi = \frac{e}{E} 100\%. \qquad \text{(VI.3)}$$

Относительная влажность имеет большое значение как в гигиеническом, так и в техническом отношении. Величина φ связана с ин-

тенсивностью испарения влаги, в частности, с поверхности кожи человека. Нормальной для постоянного пребывания человека считается относительная влажность в пределах от 30 до 60%. Величина φ характеризует также процесс сорбции, т. е. поглощения влаги пористыми гигроскопическими материалами, находящимися в контакте с воздушной влажной средой.

Наконец, величина φ определяет процесс конденсации влаги на пылинках и других взвешенных частицах, содержащихся в воздушной среде, так и на поверхности ограждающих конструкций. Если воздух с определенным влагосодержанием подвергнуть нагреванию, то относительная влажность нагретого воздуха понизится, поскольку величина парциального давления водяного пара e останется постоянной, а максимальное его значение E увеличится с повышением температуры, см. формулу (VI.3).

Наоборот, при охлаждении воздуха с неизменным влагосодержанием, его относительная влажность будет увеличиваться из-за уменьшения величины E.

При некоторой температуре максимальное значение парциального давления E окажется равным величине e, имеющейся в воздухе, а относительная влажность φ — равной 100%, что соответствует точке росы. При дальнейшем понижении температуры парциальное давление остается постоянным (максимальным), а излишнее количество влаги конденсируется, т. е. переходит в жидкое состояние. Таким образом, процессы нагревания и охлаждения воздуха связаны с изменениями его температуры, относительной влажности, а следовательно, и первоначального объема.

За основные величины при резких изменениях температуры влажного воздуха (например, при расчетах вентиляционных процессов) часто принимают его влагосодержание и теплосодержание (энтальпию).

Влагосодержание влажного воздуха d представляет отношение массы водяного пара $M_п$ к единице массы сухого воздуха $M_в$. Масса газообразного вещества может быть выражена как произведение количества молей (или парциального давления газа) на его молекулярный вес, а потому:

$$d = \frac{M_п}{M_в} = \frac{p_e \mu_п}{p_в \mu_в} = \frac{p_e 18}{p_в 29} = \frac{p_e}{P - p_e} 0{,}622, \qquad \text{(VI.4}$$

где 18 и 29 — молекулярные веса водяного пара и сухого воздуха $P = p_e + p_в$ — общее давление влажного воздуха.

При постоянном общем давлении влажного воздуха (например, $P = 1$) его влагосодержание определяется только парциальным давлением водяного пара $\left(d = 0{,}622 \frac{p_e}{1 - p_e}\right)$. Плотность влажного воздуха уменьшается с увеличением парциального давления по линейному закону.

Существенное различие молекулярных весов водяного пара и сухого воздуха приводит к повышению абсолютной влажности и

парциального давления в наиболее теплых зонах (обычно в верхней зоне) помещений, в соответствии с закономерностями, описанными в гл. III.

Теплосодержание I (энтальпия) влажного ненасыщенного воздуха равно:

$$I = c_p t + 595d = 0{,}24t + (595 + 0{,}47t)d \quad ккал/кг \qquad (VI.5)$$

где c_p — удельная теплоемкость влажного воздуха, равная 0,24 + +0,47d (0,24 — теплоемкость сухого воздуха; 0,47 — теплоемкость водяного пара); t — температура, °С; 595 — удельная теплота испарения при 0° С, *ккал/кг*; d — влагосодержание влажного воздуха.

Изменение всех параметров влажного воздуха (например, при колебаниях его температуры) можно установить по $I-d$ диаграмме, основными величинами которой являются теплосодержание I и влагосодержание d воздуха при среднем значении барометрического давления.

На $I-d$ диаграмме теплосодержание I отложено по оси ординат, а проекции влагосодержания d — по оси абсцисс; на эту ось спроектированы истинные значения влагосодержания с наклонной оси, расположенной под углом в 135° к оси ординат. Тупой угол принят в целях более четкого построения на диаграмме кривых влажности воздуха (рис. VI.4).

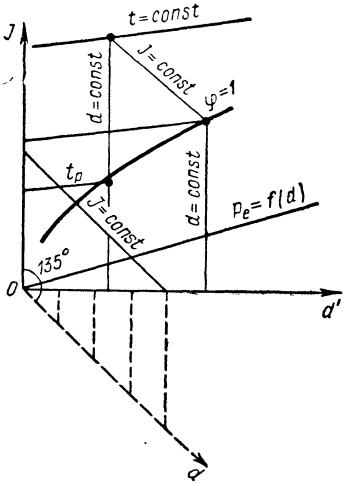


Рис. VI.4. Схема построения диаграммы теплосодержания и влагосодержания воздуха ($I-d$-диаграммы):

t=const — изолинии температур; I=const — линии равного теплосодержания (равной энтальпии); d= =const — линии равного влагосодержания; φ=1 — кривая полного насыщения воздуха водяным паром; $p_e=f(d)$ — линия роста парциального давления в зависимости от влагосодержания

Линии одинакового теплосодержания (I=const) располагаются на диаграмме наклонно, а одинакового влагосодержания (d=const) — вертикально.

Кривая полного насыщения воздуха влагой $\varphi=1$ делит диаграмму на верхнюю часть, в которой воздух неполностью насыщен, и нижнюю, где воздух полностью насыщен влагой и могут происходить процессы конденсации.

В нижней части диаграммы расположена построенная в обычной сетке координат по формуле (VI.4) линия $p_e=f(d)$ роста парциальных давлений водяного пара, выражаемых в *мм рт. ст.*

Диаграммы теплосодержания и влагосодержания широко используются в отопительно-вентиляционной практике при расчете процессов нагревания и охлаждения воздуха, а также в сушильной технике. С помощью $I-d$ диаграмм можно установить все необхо-

димые параметры влажного воздуха (теплосодержание, влагосодержание, температуру, точку росы, относительную влажность, парциальное давление), если известны только два из этих параметров.

§ 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.

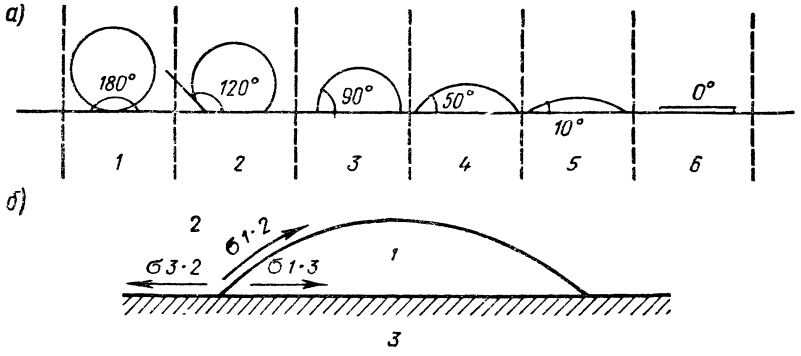


Рис. VI.5. Смачивание поверхности твердого материала каплей воды (по П. А. Ребиндеру):

а — степень смачивания, зависящая от величины краевого угла *б* — мера полноты смачивания, выражаемая как $B=\cos\alpha$

Мерой полноты смачивания B является косинус краевого угла (см. рис. VI.5), т. е.

$$B=\cos\alpha=\frac{\sigma_{3.2}-\sigma_{1.3}}{\sigma_{1.2}}, \qquad \text{(VI.6)}$$

где $\sigma_{3.2}$ — поверхностная энергия сухого материала; $\sigma_{1.3}$ — поверхностная энергия материала под каплей воды; $\sigma_{1.2}$ — поверхностное натяжение воды.

Гидрофильные материалы активно взаимодействуют с водой; в сухом состоянии их поверхностная энергия имеет наибольшее значение, а при смачивании уменьшается (т. е. $\sigma_{3.2}-\sigma_{1.3}>0$).

Ограниченно смачиваемые и несмачиваемые материалы менее активны во взаимодействии с водой.

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 зданий. Кроме того, для материалов гидрофильных, получаемых на основе структурирования водных растворов вяжущих или других материальных дисперсных частиц, сами свойства стабилизировавшейся 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.

Обоснованное подразделение форм связи влаги с материалами разработано академиком П. А. Ребиндером и его последователями.

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 необходима 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 тепла.

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% по весу).

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 $r<10^{-5}$ *см* 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.

При извлечении из водной среды крупнопористого изделия, или образца материала часть воды, заполняющей крупные поры и являющейся наиболее свободной, вытекает под влиянием силы тяжести; количество вытекающей воды возрастает с увеличением гидрофобности материала и числа сообщающихся крупных пор в нем.

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.

Работами академика П. А. Ребиндера показано, что средняя величина энергии E связи влаги, не содержащей растворенных химических веществ:

$$E_\varphi = RT \ln \frac{E}{e} = -RT \ln \varphi, \qquad \text{(VI.7)}$$

где R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная темпе-

ратура, °К; E — парциальное давление насыщенного пара свободной воды над плоской поверхностью; e — парциальное давление равновесного водяного пара над материалом, рассматриваемой степени увлажнения (ω); φ — относительная влажность воздуха в долях единицы.

Перемещение влаги внутри капиллярно-пористого материала становится возможным только в том случае, если энергетический уровень внешних воздействий (иначе говоря, потенциал переноса влаги) будет равен средней абсолютной величине энергии связи, или превысит ее, т. е.

$$\Theta \geqslant E_{\varphi} = -RT \ln \varphi. \qquad \text{(VI.8)}$$

Энергия связи влаги с поверхностью пор и капилляров материала равна по своей абсолютной величине, но противоположна по знаку потенциалу переноса влаги внутри капиллярно-пористых материалов с влагосодержанием в пределах гигроскопического, находящихся в изотермических условиях.

Для удаления описанных выше видов влаги из капиллярно-пористых материалов необходима различная энергия процесса обезвоживания.

§ 4. СОРБЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

В капиллярно-пористых материалах (например, кирпиче, бетоне, природном камне), находящихся в естественной воздушной среде, всегда содержится некоторое количество влаги. В этом легко убедиться, подвергнув сушке (в сушильном шкафу) образец материала до постоянного веса.

Постоянный вес абсолютно-сухого материала $P_{\text{с}}$ окажется меньшим, чем у воздушно-сухого $P_{\text{в}}$. Разность этих весов равна весу влаги, содержащейся в образце материала; отношение такой разности к весу сухого образца (или, что то же самое, массы влаги к массе сухого образца) представляет удельное влагосодержание ω материала

$$\omega = \frac{P_{\text{в}} - P_{\text{с}}}{P_{\text{с}}} = \frac{M_{\text{в}}}{M_{\text{с}}} \; кг/кг, \qquad \text{(VI.9)}$$

где $M_{\text{в}}$ и $M_{\text{с}}$ — соответственно масса влаги и масса сухого материала.

В строительной теплофизике влагосодержание часто выражается в процентах; в этом случае оно называется весовой влажностью (относительным влагосодержанием) и определяется из выражения:

$$\omega = \frac{P_{\text{в}} - P_{\text{с}}}{P_{\text{с}}} 100 [\%]. \qquad \text{(VI.9а)}$$

При длительном пребывании образца материала или строительного изделия в воздухе с постоянными температурой и относительной влажностью, количество влаги, содержащееся в материале, становится неизменным (равновесным). Это равновесное вла-

госодержание соответствует гигротермическому состоянию внешней воздушно-влажной среды и в зависимости от свойств материала (химического состава, пористости и т. д.) может быть бо́льшим или меньшим.

Если температура или влажность окружающего воздуха изменились, постепенно приходит в соответствие с этими изменениями и количество влаги, содержащееся в материале. При этом можно полагать, что приближенная продолжительность времени, необходимого для установления равновесного гигротермического состояния материала, прямо пропорциональна интенсивности диффузионных перемещений влаги и обратно пропорциональна квадрату максимального расстояния этих перемещений внутри материала (т. е. квадрату характерного размера образца) *.

Процесс увлажнения сухого материала, помещенного в воздушную среду с постоянной относительной влажностью, называется сорбцией, а процесс уменьшения влагосодержания — избыточно-влажного материала в воздушной среде — десорбцией.

Закономерность изменений равновесного влагосодержания материала, находящегося в воздушной среде с постоянной температурой, но последовательно возрастающей относительной влажностью, выражается изотермой сорбции.

Последовательные значения равновесной влажности материала, возрастающие при увеличении относительной влажности среды и располагающиеся на кривой изотермы сорбции, а также форма этой кривой зависят от природы и структуры материала.

Для капиллярно-пористых материалов, хорошо смачиваемых влагой (такие материалы в строительстве распространены), характерны S-образные изотермы, выпуклые в области малой относительной влажности воздуха и вогнутые при высокой влажности (изотермы I и II на рис. VI.6).

Выпуклая часть изотерм $Г$ указывает на присутствие внутри материала только адсорбированной влаги, состоящей из одного слоя простых или сложных молекул водяного пара, прочно связанных с твердой поверхностью пор и капилляров адсорбционными силами (мономолекулярная адсорбция).

Средняя часть изотерм $П$, близкая к прямой линии, соответствует образованию на внутренней поверхости капиллярно-пористого материала пленок адсорбированной влаги, состоящих из многих слоев молекул (полимолекулярная адсорбция).

При дальнейшем повышении влажности воздуха пленки влаги утолщаются и заполняют наиболее узкие участки тонких капилляров, образуя в смачиваемых материалах мениски с вогнутой поверхностью.

---

* Коэффициент диффузии D, длительность процессов влагообмена τ и квадрат характерного размера b входят в состав безразмерного гигрометрического критерия Фурье $F_0' = \frac{D\tau}{b^2}$. При сопоставимых величинах этого критерия сопоставимы и условия влагообмена.

В соответствии с законом Лапласа, образование таких менисков приводит к понижению над ними насыщающей величины парциального давления водяного пара p_e на величину, пропорциональную капиллярному давлению. Это вызывает конденсацию влаги в незаполненных частях тонких капилляров, происходящую при относительной влажности окружающей воздушной среды, не достигающей полного насыщения. Такое явление называется капиллярной конденсацией. Процесс капиллярной конденсации выражается правым участком *К* изотерм сорбции, вогнутость которого свидетельствует о более быстром росте количества влаги, поглощаемой материалом из окружающего воздуха, по сравнению с увеличением влажности самого воздуха.

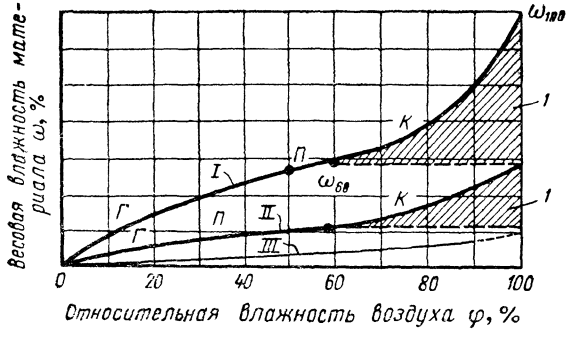


Рис. VI.6. Изотермы сорбции влаги для характерных групп строительных материалов:

I — материалы со смачиваемой поверхностью пор и капилляров и присутствием осмотически связанной влаги; *II* — с промежуточными свойствами; I — количество влаги, характеризующее влагоемкость материала при его увлажнении в пределах от начальной (равновесной) влажности до максимальной сорбционной;
III — с несмачиваемой (гидрофобной) поверхностью

Максимальное сорбционное влагосодержание ω_{100} материалов с *S*-образными изотермами может быть различным, в соответствии с их природой и особенностями пористой структуры. Наибольшее сорбционное влагосодержание характерно для древесины, фибролита, изделий из торфа и других органических материалов растительного происхождения, для которых характерно присутствие осмотически связанной влаги, $\omega_{100} \rightarrow 30 \div 35\%$. У ячеистых бетонов $\omega_{100} \rightarrow 10 \div 15\%$; для неорганических материалов, в которых отсутствуют гигроскопические примеси, это наиболее высокие величины сорбционного влагосодержания. Конкретные их значения зависят от структуры и состава ячеистого бетона.

Для легких бетонов (шлакобетон, керамзитобетон и т. д.) максимальное сорбционное влагосодержание изменяется в зависимости от свойств заполнителей и вяжущего, но обычно не превышает 5—6%. Из искусственных пористых камневидных материалов наименее выраженными сорбционными свойствами обладают хорошо обожженные кирпич и керамика, $\omega_{100} \rightarrow 0{,}7\%$.

Процесс капиллярной конденсации характерен для смачиваемых (гидрофильных) материалов, внутри которых имеется существенное количество мелких пор и очень тонких капилляров с радиусом, равным или меньшим 10^{-5} *см*. В более крупных капиллярах понижение давления насыщенного пара над мениском ничтожно, а потому при преобладании внутри материала таких капилляров явления капиллярной конденсации менее выражены и возникновение их смещено на изотерме сорбции в направлении верхнего предела сорбционного увлажнения. Чем тоньше капилляры материала и чем большей смачиваемостью обладает их поверхность, тем меньше может быть относительная влажность воздуха, при которой возникает капиллярная конденсация.

Так, например, можно приближенно считать, что для плотного мелкопористого гипса, не подвергнутого обработке несмачивающими добавками, капиллярная конденсация начинается при 70—75% относительной влажности; для плотного шлакобетона, не содержащего значительной примеси золы или несгоревшего угля, — при 80%, а для хорошо обожженного кирпича — при 80—85%.

Французские исследователи считают, что в обычных бетонах имеется около 30% пор диаметром 50 *ммк* и при влажности, превышающей 70%, эти поры заполняются водой. Капиллярная конденсация в кирпиче хорошего качества считается малозаметной, поскольку в таком материале тонких пор содержится не более 10%. Периодические и много раз повторяющиеся явления капиллярной конденсации связаны с постепенным разрушением поверхности тонких пор и капилляров; исследования структуры строительных материалов, прослуживших долгие десятки лет, в наружных стенах зданий показывают, что их пористость возрастает, а размеры пор укрупняются за счет разрушения наиболее тонких и мелких [80].

Для материалов, плохо смачиваемых влагой (гидрофобных), *S*-образная форма изотерм сорбции не характерна, так как силы притяжения между поверхностью материала и молекулами водяного пара E_c приближаются по своему энергетическому уровню к силам притяжения между самими молекулами E_φ.

По этой причине материалы с гидрофобной поверхностью характеризуются прямолинейными или даже вогнутыми участками изотерм Γ в области малой относительной влажности воздуха (изотерма III на рис. VI.6). В завершающей части процесса увлажнения, при повышенной влажности воздуха, характер таких изотерм может быть различным в зависимости от степени смачивания материала влагой, а также от размеров, формы и распределения пор и капилляров внутри материала.

В крупнопористых материалах с однородной гидрофобной поверхностью пор процесс капиллярной конденсации практически отсутствует, в связи с чем правый участок *K* изотермы III может не иметь вогнутого характера.

Таковы, например, изотермы сорбции пористого битума и некоторых видов пористых гидрофобных утеплителей. Для минераловатных изделий и других распространенных трудно смачиваемых

материалов подобная форма изотерм сорбции нехарактерна, но она свидетельствует о том, что при применении для наружных ограждающих конструкций гидрофобных материалов с крупными замкнутыми порами может быть достигнуто существенное ограничение или полное устранение капиллярной конденсации, влияющей на изменения влажностного состояния и сокращение сроков службы конструкций из пористых материалов.

Для материалов с промежуточными свойствами смачиваемости характерны изотермы сорбции II на рис. VI.6 (например, для ячеистых материалов с ограниченно смачиваемой поверхностью пор).

При рассмотрении увлажнения конструкций важное значение имеет отношение разности предельного и начального значений сорбционной влажности материала $\omega_{100} - \omega_{нач}$ к разности соответствующих значений относительной влажности воздуха $\varphi_{100} - \varphi_{нач}$, называемое относительной влагоемкостью в пределах сорбционного увлажнения (относительной пароемкостью).

Так, например, относительная влагоемкость материала при его увлажнении от 60% до 100% по изотерме сорбции (рис. VI.6) будет:

$$\xi_0 = \frac{\omega_{100} - \omega_{60}}{100 - 60} 1000 \ г/кг. \qquad (а)$$

При таком увлажнении смачиваемого материала до верхнего предела сорбционной влажности значительное количество влаги является жидкой, поскольку внутри большинства материалов при влажности более 80% происходит капиллярная конденсация.

Если в проектируемой конструкции желательно исключить этот процесс, влияющий на сокращение сроков службы конструкции, следует при расчетах влажностного состояния, описанных ниже, учитывать допустимое накопление влаги только в пределах до 80%, характеризуемое «относительной пароемкостью», т. е.:

$$\xi_0' = \frac{\omega_{80} - \omega_{60}}{80 - 60} 1000 \ г/кг. \qquad (б)$$

Свойство пароемкости важно для оценки влажностного состояния ограждений, не подвергающихся непосредственному увлажнению жидкой влагой.

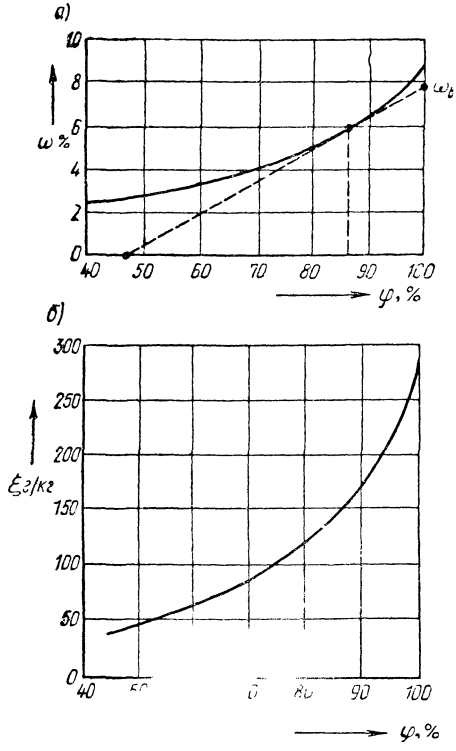
Величина пароемкости зависит от сорбционных свойств материала.

Кроме того, относительная пароемкость сильно изменяется для различных стадий увлажнения, протекающих в пределах гигроскопической влажности; эти изменения коренным образом связаны с физическими закономерностями увлажнения капиллярно-пористых тел и зависят от рассматриваемых значений влагосодержания материала и соответствующих им величин относительных парциальных давлений. Относительная пароемкость, являющаяся первой производной от влагосодержания по относительному парциальному давлению $\frac{d\omega}{d\varphi}$, может быть представлена как касательная к изо-

терме сорбции в точке, соответствующей данному значению ω (рис. VI.7а). Такая касательная отсекает на вертикали, проходящей через точку φ=100%, влагосодержание $\omega_в$ и пересекает ось абсцисс в точке φ_0.

Величина ξ_0, соответствующая рассматриваемому влагосодержанию, может быть вычислена по формуле:

$$_0 = \frac{\omega_в}{100 - \varphi_0} 1000 \ г/кг. \qquad (в)$$



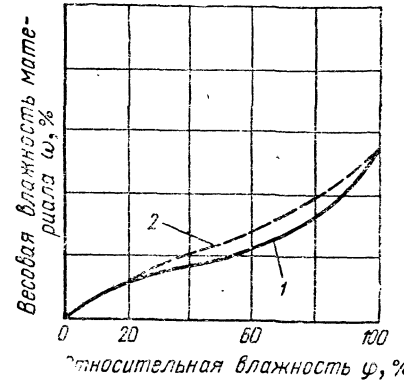


Рис. VI.8. Равновесная влажность пористых материалов при сорбции и десорбции:

1 — при увлажнении материала; *2* — при высыхании

Рис. VI.7. Графический метод определения пароемкости на различных стадиях увлажнения материала (пенобетона):

а — изотерма сорбции пенобетона с объемным весом 400 *кг/м³*; *б* — график изменени пароемкости в зависимости от величин относительного парциального давления

По полученным для различных значений ω величинам ξ_0 строит ся график нелинейной зависимости ξ_0 от φ (рис. VI.7б), которы пользуются при более точных расчетах.

В нелинейности изменений влагоемкости и влагосодержания материала от относительных парциальных давлений заключается одно из существенных отличий процессов переноса влаги от процессов переноса тепла; в последних теплоемкость является неизменной константой материала, а теплосодержание — линейной функцией потенциала (температуры).

Исследования показывают, что сорбционная влажность материала при увлажнении меньше, а при высыхании больше. На рис. VI.8 кривая *1* представляет влажностное состояние мате-

риала при увлажнении (сорбция), а кривая 2 — при высыхании (десорбция). При высыхании некоторая часть влаги удерживается внутри материала и удаляется лишь при более высокой температуре и низкой влажности окружающего воздуха.

Из предыдущего изложения видно, что форма и количественная характеристика изотермы сорбции, а также отображаемые ею значения равновесной влажности материала зависят от физико-химических свойств последнего, его смачиваемости и структуры.

В зависимости от этих факторов изменяется энергетический уровень межмолекулярных сил, связывающих влагу с поверхностью материала. Различный энергетический уровень E сорбционных сил в первом и последующих слоях молекул влаги, притягиваемых к поверхности материала, может быть определен в зависимости от различной плотности этих слоев.

В смачиваемых материалах первый слой обладает предельно высокой энергией связи и наиболее плотен, энергия и плотность последующих слоев уменьшается, постепенно приближаясь к энергии и плотности свободной влаги в соответствующей фазе (парообразной или жидкой).

Можно полагать [70], что

$$E_c = aE_\varphi, \tag{VI.10}$$

где E_c — средняя энергия связи молекул в поле сорбционных сил; E_φ — средняя энергия связи молекул в равновесном водяном паре; a — коэффициент сорбционной активности, показывающий, во сколько раз увеличится энергия связи при переходе молекулы воды из равновесного пара в адсорбированное состояние.

Считая, что в равновесной системе молекул с различной плотностью укладки последние в зависимости от плотности имеют внутреннюю энергию связи, равную, но обратную по знаку внешней потенциальной энергии, можно на основе уравнения Больцмана записать:

$$\omega = \omega_{100} \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right), \tag{VI.11}$$

где ω, ω_{100} — текущее и максимальное сорбционные влагосодержания капиллярно-пористого материала; R — универсальная газовая постоянная; T — температура, °К.

Выражение (VI.11) является уравнением изотермы сорбции, связывающим влагосодержание капиллярно-пористого материала с энергией связи молекул адсорбированной влаги.

Подставляя (VI.10) в (VI.11), получим уравнение сорбции, устанавливающее зависимость между влагосодержанием и энергией связи молекул в равновесном водяном паре

$$\omega = \omega_{100} \exp\left(-\frac{a}{RT} E_\varphi\right) \tag{VI.12}$$

или

$$\omega = \omega_{100} \exp(-bE_\varphi). \tag{VI.12a}$$

Величина $\frac{a}{RT} = b$ по своей размерности (*моль/кг-м*) может быть названа характеристикой сорбционной активности или емкостью поля сорбционных сил; эта величина характеризует и поверхностную энергию материала и межмолекулярное взаимодействие сорбируемых частиц влаги. Для конкретных капиллярно-пористых материалов величина b определяет их сорбционную активность и вели-

чину удельного влагосодержания. Если физико-химические и структурные свойства материала не нарушаются происходящими колебаниями влагосодержания и связанными с ними процессами структурообразования, закономерности изменений энергетического уровня адсорбированной влаги остаются постоянными и при многократных циклах сорбционного увлажнения, чередующихся с высыханием материала (десорбцией).

Величина b зависит от уровня энергии взаимодействия молекул влаги в равновесном водяном паре E_φ, а следовательно, и от относительного давления пара воды φ.

Зависимость $\lg b$ от φ не изменяется от температуры и является линейной. На рис. VI.9 приведены, в виде примера, сорбционные характеристики глиняного обожженного кирпича для пяти различных температур, отвечающие единой линейной зависимости $\lg b$ от φ.

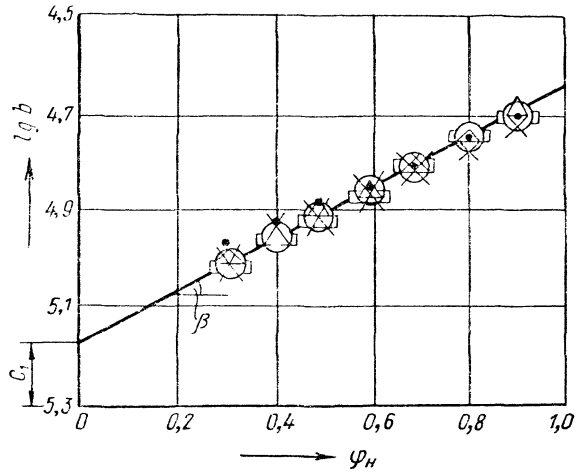


Рис. VI.9. Зависимость сорбционной активности (емкости поля сорбционных сил b) глиняного обожженного кирпича ($\gamma=1600$ кг/м^3) от относительной влажности $\varphi_н$

Условные обозначения:

□ — значения b при 233° К (—40° С);
○ — значения b при 253° К (—20° С);
△ — значения b при 273° К (0° С);
× — значения b при 293° К (+20° С);
● — значения b при 213° К (+40° С)

Имея в виду такую линейную зависимость, можно написать уравнение, связывающее величину b с относительным давлением пара воды в материале φ в виде:

$$b = c\kappa^{\varphi}, \tag{VI.13}$$

где $\lg c=c_1$, т. е. отрезку, отсекаемому прямой линейной зависимости на оси значений $\lg b$; $\lg \kappa=\kappa_1$, т. е. тангенсу угла наклона β этой прямой к оси значений φ.

Величины, входящие в (VI.13), могут быть названы:

c — структурной характеристикой капиллярно-пористого материала; κ — коэффициентом приращения сорбционной активности.

Поскольку из выражения (VI.8) для потенциала переноса влаги следует, что

$$\varphi = \exp\left(-\frac{E_\varphi}{RT}\right), \tag{VI.14}$$

равенство (VI.13) может быть записано в виде:

$$b = c\kappa^{\exp\left(-\frac{E_\varphi}{RT}\right)}.$$

Подставляя (VI.14) в (VI.13), получим следующее уравнение изотермы сорбции:

$$\omega = \omega_{100} \exp\left[-E_\varphi c\kappa^{\exp\left(-\frac{E_\varphi}{RT}\right)}\right]. \qquad \text{(VI.15)}$$

Величины c и κ являются постоянными для рассматриваемого материала.

При изменениях температуры влажного материала (при $\varphi = \text{const}$) его равновесное влагосодержание линейно зависит от температуры. При повышении температуры равновесное влагосодержание материала понижается, что объясняется уменьшением взаимодействия молекул влаги с поверхностью материала (в результате уменьшения сил Ван-дер-Ваальса).

Для максимального сорбционного влагосодержания эта зависимость может быть выражена уравнением

$$\omega_{100(t)} = \omega_0 - \alpha_T (T - 273), \qquad \text{(VI.16)}$$

где ω_0 — максимальное сорбционное влагосодержание при $T = 273$ °К; α_T — температурный коэффициент, имеющий постоянную величину для рассматриваемого материала (при неизменности его структурных свойств).

Подставив (VI.16) в (VI.15), получим уравнение гигротермического влажностного состояния капиллярно-пористых материалов

$$\omega = [\omega_0 - \alpha_T (T - 273)] \exp\left[-E_\varphi c\kappa^{\exp\left(-\frac{E_\varphi}{RT}\right)}\right]. \qquad \text{(VI.17)}$$

В этом уравнении энергия связи молекул в равновесном водяном паре $-E_\varphi$ может быть заменена потенциалом переноса влаги Θ, поскольку в изотермических условиях $\Theta = E_\varphi$.

Тогда

$$\omega = [\omega_0 - \alpha_T (T - 273)] \exp\left[\Theta c\kappa^{\exp\left(\frac{\Theta}{RT}\right)}\right]. \qquad \text{(VI.17а)}$$

В таком виде уравнение гигротермического влажностного состояния может быть использовано в практических целях, в частности, для обобщения экспериментальных данных о сорбции материалов.

Достаточно, например, иметь экспериментальные данные о сорбции конкретного материала при 0 °С, для того чтобы получить его вероятные сорбционные характеристики при любых значениях температуры.

Такие сорбционные характеристики в виде весовой влажности материалов, выраженной в процентах, приведены в таблице приложения для температур —20, 0, +20° С.

§ 5. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

В общем виде возникновение и особенности перемещений влаги в капиллярах зависят от связи частиц влаги друг с другом и с твер-

дой поверхностью, особенностей структуры материала и характера внешних воздействий окружающей среды.

При высоком влагосодержании капиллярно-пористого материала, превышающем то влажностное состояние, при котором в тонких капиллярах образуется свободная вода (т. е. происходит капиллярная конденсация), перемещения влаги, не обладающей прочной связью с материалом, происходят преимущественно в жидкой фазе. Такие перемещения свободной или связанной только капиллярными силами воды отличаются наибольшим количественным эффектом; они характерны или для первого периода естественной сушки вновь выполненных конструкций, высокое влагосодержание которых объясняется присутствием технологической влаги, или для процессов увлажнения, вызванных контактом конструкции с каким-либо видом внешней свободной воды (грунтовой, атмосферной, конденсирующейся на поверхности конструкции и т. д.).

Основной причиной перемещений влаги в жидкой фазе является капиллярное впитывание воды сухим материалом или ее капиллярное перемещение от более увлажненных участков материала к зоне с меньшим влагосодержанием, с поверхности которой происходит испарение влаги в воздушную среду. При этом количественный эффект G перемещений влаги зависит при увлажнении конструкции от потенциальной энергии сухого материала, могущей обеспечить впитывание влаги *, а при высыхании — от интенсивности испарения с поверхности конструкции.

Для установившихся условий перемещений влаги можно принять, что

$$G=\frac{\partial \omega}{\partial x}\beta \ г/м^2, \qquad \text{(VI.18)}$$

где $\frac{\partial w}{\partial x}$ — градиент влагосодержания в материале, %/м; β — коэффициент влагопроводности, $г/м \cdot ч \cdot \%$.

Для конструкций, находящихся в изотермических условиях, изменение влагосодержания во времени может быть выражено уравнением влагопроводности (1—9), записанным в виде [3]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau}=\frac{\beta}{10\gamma}\cdot\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, \qquad \text{(VI.19)}$$

где ω — влагосодержание материала, %; τ — время, $ч$; 10 — количество влаги, необходимое для повышения влагосодержания 1 $кг$ материала на 1%, $г/кг \cdot \%$; γ — объемный вес материала, $кг/м^3$; x — координата одномерных перемещений влаги, $м$.

Величина коэффициента влагопроводности зависит от связи влаги с материалом, его структуры, влагосодержания и температуры.

При экспериментальном определении величин коэффициентов влагопроводности используют зависимость

* Некоторые авторы называют эту потенциальную энергию капиллярным потенциалом [67].

$$\beta = \frac{G}{\frac{d\omega}{dx}} . \qquad \text{(VI.18а)}$$

Экспериментальных исследований по определению коэффициентов влагопроводности было произведено ограниченное количество; кроме того, методика их определения не была достаточно совершенной (например, коэффициенты влагопроводности исследовались на вертикальных, увлажняемых снизу образцах материала, перемещения влаги в которых искажались влиянием силы тяжести).

В таблице приложения даны значения коэффициентов влагопроводности для некоторых строительных материалов, установленные при температуре 15°, в зависимости от влагосодержания.

Иногда считают, что увеличение значений коэффициентов влагопроводности с повышением температуры происходит обратно пропорционально изменению вязкости воды, т. е.

$$\beta_t = \beta_0 \frac{\sigma \eta_0}{\sigma_0 \eta} ,$$

где β_0 — коэффициент влагопроводности при 0°; σ — поверхностное натяжение, *кг/м*; η — вязкость, *кг·сек/м²*.

Следуя этой зависимости, можно было бы считать, что при 30° коэффициент влагопроводности возрастает примерно в 1,4 раза по сравнению с его величиной при 15°. Однако такая зависимость не учитывает более интенсивного роста испарения влаги при повышении температуры, которое может влиять на интенсивность перемещений влаги в зоне материала, смежной с испаряющей поверхностью, и поэтому может быть справедливой только при процессах впитывания влаги или для участков конструкции, значительно удаленных от испаряющей поверхности.

Для ограждающих конструкций, находящихся в весьма длительном контакте с воздушной средой и не увлажняемых жидкой влагой (атмосферной, грунтовой, конденсационной и т. д.), характерно малое влагосодержание. При этом влагосодержание поверхностных слоев, непосредственно соприкасающихся с воздушной средой, всегда находится в пределах сорбционного, при котором преобладающая часть влаги прочно связана с поверхностью пор и капилляров, почему ей свойственно состояние, близкое к термодинамическому равновесию с воздействиями окружающей среды.

В глубинных слоях конструкции (удаленных от поверхности испарения) влагосодержание материала часто несколько выше сорбционного, но перемещения жидкой влаги в них ограничивается сопротивлением высохших наружных слоев этим перемещениям. В этих условиях процессом переноса влаги, могущим влиять на увлажнение конструкции, разделяющей две воздушных среды с различной температурой и парциальным давлением водяного пара, является процесс диффузии парообразной влаги сквозь конструк-

цию, направленный из более теплой и обладающей большим влагосодержанием среды — в более холодную *.

Диффузионный процесс увлажнения наружной конструкции, разделяющей воздушные среды с различными температурами, зависит от проницания молекул водяного пара внутрь материала, протекающего в плотных и сухих материалах достаточно медленно.

Если материал, входящий в состав ограждающей конструкции, защищен от диффузии водяного пара со стороны более теплой воздушной среды мало проницаемыми отделочными слоями или облицовками, процесс увлажнения еще более замедляется.

Процесс диффузии может происходить только при наличии достаточной величины разности парциальных давлений водяного пара в воздушной среде (помещения) и порах материала конструктивных слоев, граничащих с этой средой **. Если внешние конструктивные слои ограждающей конструкции достаточно сухи, плотны и непроницаемы, требуется существенная величина разности парциальных давлений, для того чтобы диффузия водяного пара могла бы возникнуть, а ее результаты стали бы практически заметными.

Значительное влияние на замедление процессов увлажнения оказывает ощутимое сопротивление диффузии на поверхности сухой конструкции и существенное уменьшение коэффициентов переноса водяного пара (коэффициентов паропроницаемости) внутри сухих материалов; в связи с этим возрастает сопротивление диффузии, оказываемое более сухой внутренней частью конструкции.

Диффузионный поток водяного пара, проходящий через поверхность внутрь конструкции, и коэффициент влагообмена на поверхности связаны выражением:

$$G = \beta_{в.п}(e_в - e_{в.п}) \ г/м^2 \cdot ч, \qquad \text{(VI.20)}$$

где G — диффузионный поток водяного пара, проходящий через поверхность внутрь конструкции; $\beta_{в.п} = \frac{1}{R_{в.п}}$ — коэффициент влагообмена на поверхности, $г/м^2 \cdot ч \cdot мм\ рт.\ ст.$ (величина, обратная сопротивлению диффузии); $e_в - e_{в.п}$ — соответственно парциальные давления водяного пара в воздухе помещения и на поверхности ограждающей конструкции, *мм рт. ст.*

Величина сопротивления влагообмену $R_{в.п} = \frac{1}{\beta_{в.п}}$ зависит не

---

* В строительной теплофизике обычно принимается, что пленочная влага, перемещающаяся под влиянием разности парциальных давлений в пористом, близком к пределу сорбционного увлажнения материале, учитывается величиной коэффициента паропроницаемости рассматриваемого материала.

** При постоянном общем давлении паровоздушной смеси, эту разность парциальных давлений водяного пара можно считать потенциалом диффузии в ограждающих конструкциях зданий, аналогично тому, как в процессах передачи тепла потенциалом переноса является разность температур. Такой потенциал диффузии является приближенным, но применение его практически допустимо при ограниченных перепадах температур и малых влагосодержаниях материала, характерных для процессов переноса водяного пара в ограждениях зданий.

только от условий движения воздуха у поверхности, но и от влажностного состояния материала и может быть, в соответствии с термодинамическими условиями на поверхности, определена из выражения:

$$R_{в.п} = RT \ln \frac{E}{e} \cdot \frac{1}{\alpha_\beta} \; мм \; рт. \; ст. \cdot м^2 \cdot ч/г^*, \qquad (VI.21)$$

где R — универсальная газовая постоянная (0,06236 *мм рт. ст·см³/град·г·мол*); T — температура, °К; $\ln \frac{E}{e}$ — натуральный логарифм отношения парциального давления насыщенного пара к равновесному давлению при рассматриваемой влажности материала; $\alpha_\beta = \frac{\alpha_к}{0{,}92c\gamma} \approx 3{,}72\alpha_к = 18{,}60$ *м/ч* — коэффициент теплообмена на поверхности, пропорциональный отношению коэффициента тепловосприятия за счет конвекции и кондукции $\alpha_к \approx 5{,}0$ (*ккал/м²·ч××град*), к теплоемкости смеси воздуха с паром (*с, ккал/кг·град*) и объемному весу этой смеси (γ, *кг/м³*).

Вычисленные из выражения (VI.21) для $t_{в.п} = 18°$ величины сопротивления влагообмену на поверхности конструкции с различной равновесной влажностью материала, приведены в таблице VI.1.

Таблица VI.1

Величины сопротивлений влагообмену на поверхностях конструкций в помещениях с различной влажностью

Характеристика влажности помещений	Относительная влажность воздуха на поверхности конструкции, %	Сопротивление влагообмену, *мм рт. ст м²·ч·г*
Сухие, с избыточными выделениями тепла	25	1,38
Сухие, отапливаемые	40	0,91
С нормальной влажностью	55	0,60
Влажные	70	0,34
Мокрые	85	0,16
С постоянной конденсацией влаги на поверхности конструкций	100	0

Как видно из приведенных в таблице результатов, величины сопротивлений влагообмену могут изменяться, примерно, в десять раз для влажностного состояния поверхности конструкций от 25 до

---

* В той зарубежной литературе, которая не учитывает работ П. А. Ребиндера, часто принимают, что $R_{в.п} \sim RT \frac{1}{\alpha\beta}$, опуская величину $\ln E/e$, в связи с чем величина сопротивления влагообмену не зависит от влажностного состояния материала, что является ошибочным (см., например, Cammerer, Gesundheitsingenieur № 7/8, 1952).

85%; при этом, в первом случае сопротивление влагообмену достигает сопротивления проницанию плотной сплошной штукатурки.

Если принять, что при средних условиях холодного периода года понижение температуры на поверхности ограждений в сухих помещениях (при $R_0^{тр}=мин$) будет составлять величину до 5°, а в более влажных (при $R_0^{тр}=макс.$) величину порядка 2—3°, то для приближенного вычисления сопротивлений влагообмену (влаговосприятию), допустив линейную интерпретацию нелинейной зависимости, можно использовать следующую формулу:

$$R_{в.п}=\left(1-\frac{\varphi}{100}\right), \qquad \text{(VI.22)}$$

где φ — относительная влажность воздуха помещения, %.

Паропроницаемость материалов оценивается коэффициентом паропроницаемости μ в *г/мм рт. ст.·м·ч*, выражающим количество пара в граммах, диффундирующего за 1 *ч* через 1 *м*² плоского слоя материала толщиной в 1 *м* при разности парциальных давлений водяного пара на поверхностях слоя, равной 1 *мм рт. ст.*

При установившемся потоке водяного пара, диффундирующего через конструкцию, сопротивление паропроницанию какого-либо конструктивного слоя толщиной δ в *м*, определяется по формуле:

$$R_п=\delta/\mu \ мм\ рт.\ ст.\cdot м^2\cdot ч/г. \qquad \text{(VI.23)}$$

Общее сопротивление паропроницанию многослойной ограждающей конструкции приближенно может быть определено как:

$$R_п=\frac{\delta_1}{\mu_1}+\frac{\delta_2}{\mu_2}+\ldots+\frac{\delta_n}{\mu_n}, \qquad \text{(VI.23а)}$$

где n — число слоев.

Коэффициенты паропроницаемости для материалов рыхлых и с открытыми крупными порами имеют большие значения (например, минераловатный войлок — μ=0,065), а для плотных материалов — малые (например, конструктивный бетон — μ=0,004). Значения коэффициентов паропроницаемости строительных материалов указаны в приложении.

Эти значения μ установлены лабораторными исследованиями в изотермических условиях * по схеме, указанной на рис. VI.10.

Испытываемый образец материала площадью F и толщиной δ вкладывается в верхнее латунное кольцо прибора и герметизируется по контуру непроницаемой мастикой. В закрытом пространстве под образцом, вследствие испарения воды, относительная влажность воздуха φ равна 100% и парциальное давление $e \to E$ — насыщающему при имеющейся температуре. Над верхней поверхностью

---

* Исследование коэффициентов паропроницаемости минеральной пробки и пенопластов в неизотермических условиях при градиентах температуры, характерных для теплоизолирующих конструкций холодильников показало, что значения этих коэффициентов в изотермических и неизотермических условиях отличаются друг от друга не более, чем на 4% [71].

образца $\varphi \approx 60\%$ и e_{60}. Среднее равновесное влагосодержание образца ω соответствует $\frac{100+60}{2}=80\%$ по изотерме сорбции. Исследуемая система периодически взвешивается на точных аналитических весах. Когда потеря веса влаги становится постоянной, на основании этой величины (G_{const}, *г/ч*) производится вычисление коэффициента паропроницаемости $\mu=\frac{G\delta}{F(E-e_{60})}$ *г/м·ч·мм рт. ст.*

Исследования паропроницаемости материала с применением в качестве гигростатирующего вещества — обычной воды проводятся при довольно высоком равновесном влагосодержании образца, соответствующем примерно 80%' по изотерме сорбции. Перемещения влаги в гидрофильном капиллярно-пористом материале при таком его влагосодержании могут происходить не только в парообразной фазе, но и в виде пленок влаги, слабо связанных с поверхностью пор и капилляров. В связи с этим, строго говоря, термин паропроницаемость не является достаточно точным с физической точки зрения. Коэффициент паропроницаемости μ такого же материала, но более сухого, будет меньшим, поскольку перемещение пленочной влаги уменьшится или исчезнет.

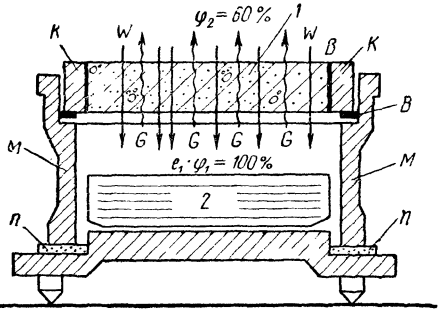


Рис. VI.10. Схема исследования паропроницаемости строительных материалов: *1* — исследуемый образец материала; *2* — чашечка с гигростатирующим веществом (обычно с водой); *B* — непроницаемая мастика; *K* — латунное кольцо; *M* — латунный цилиндрический корпус прибора; *n* — резиновое кольцо, *G* — поток диффундирующего водяного пара; *W* — поток воздуха (практически отмечаемый только при исследовании очень рыхлых материалов)

Его значения

$$\mu_x=\mu_{80}\frac{\omega_x}{\omega_{80}} \qquad \text{(VI.24)}$$

могут быть определены из обычных термодинамических закономерностей.

Работа W, совершаемая диффундирующим водяным паром в изотермических условиях, равна:

$$W=RT\ln\frac{E}{e_x}G,$$

где G — количество парообразной влаги, перемещающейся путем диффузии, *г*; E и e_x — давления водяного пара при полном насыщении и рассматриваемое.

Пусть имеются два одинаковых образца материала, но с различной влажностью. В одном из образцов средняя величина парциального давления водяного пара равна e_x, а в другом e_{80}. Предположив, что разности внешних парциальных давлений одинаковы

в обоих случаях и приравняв их друг к другу, получим выражение для работы, совершаемой диффузией водяного пара в этих образцах:

$$RT \ln \frac{E}{e_x} G_x = RT \ln \frac{E}{e_{80}} G_{80}.$$

При разности внешних парциальных давлений $\Delta e = 1$, $RTG_x = \mu_x$, а $RTG_{80} = \mu_{80}$ из условий эксперимента и определения понятия коэффициента паропроницаемости; тогда получим:

$$\mu_x \ln \frac{E}{e_x} = \mu_{80} \ln \frac{E}{e_{80}}$$

или

$$\mu_x \ln \varphi_x = -\mu_{80} \ln \varphi_{80}.$$

Но величина $\ln \varphi$ является основным характеристическим параметром уравнения изотермы сорбции гидрофильных материалов, следовательно, соотношение между μ_x и μ_{80} зависит от сорбционных свойств материала. Заменяя значение интеграла $\ln \frac{E^*}{e_x}$ его контурными значениями на изотерме сорбции, имеем:

$$\mu_x = \frac{\omega_{100}}{\omega_x} = \mu_{80} \frac{\omega_{100}}{\omega_{80}},$$

откуда окончательно:

$$\mu_x = \mu_{80} \frac{\omega_x}{\omega_{80}}.$$

Прямая связь величин коэффициентов паропроницаемости с сорбционными свойствами материалов позволяет считать, что изменения μ в зависимости от равновесной влажности будут различными для отдельных групп материалов, характеризуемых изотермами сорбции различного вида. Для смачиваемых материалов с высокой сорбционной способностью эти изменения будут наиболее существенными, тогда как для материалов, несмачиваемых влагой, т. е. гидрофобных (например, минеральный войлок, минераловатные плиты и т. д.), они практически не будут ощутимы.

Для этих последних материалов большее значение может иметь изменение коэффициентов паропроницаемости в зависимости от температуры. Такие изменения констатированы при проведении экспериментов по определению паропроницаемости гидрофобных материалов [71], но закономерности этих изменений недостаточно изучены.

---

* Полная работа адсорбции выражается интегралом уравнения Клапейрона — Клаузиуса $A = RT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv_0}{v_0} = RT \ln \frac{v_1}{v_2} = RT \ln \frac{e_2}{e_1}$, где v_1, v_2 — объемы пара, а e_1, e_2 — парциальные давления.

Представляет интерес сравнение величин коэффициентов паропроницаемости, вычисленных по формуле (VI.24), с имеющимися экспериментальными данными.

К сожалению, сколько-нибудь систематических отечественных данных по экспериментальному определению коэффициентов паропроницаемости гидрофильных материалов при различном их равновесном влагосодержании почти не имеется, и наибольший интерес с этой точки зрения представляют измерения Иогансона и Эденхольма (Швеция), результаты которых известны, в частности, из немецкой периодической литературы [64].

Указанными экспериментальными работами установлено, что значения коэффициентов паропроницаемости (в подлиннике «коэффициентов влагопроницания, *г/м·ч·мм рт. ст.*») при 45% относительной влажности уменьшаются против значений при 80%, для органических материалов в 1,5—2,0 раза, а для неорганических в 2—3 раза* (рис. VI.11). Для минеральной шерсти (ваты) не отмечено никаких изменений паропроницаемости от влажности. Это вполне согласуется с характером изотермы сорбции для этого материала, свидетельствующей о том, что его весовая влажность в пределах от 45 до 80% почти не изменяется; направление изотермы почти параллельно оси абсцисс (т. е. относительной влажности). В этих условиях $\mu_x = \mu_{80} \frac{\omega_x}{\omega_{80}} \approx \mu_{80}$.

Ниже приводится табл. VI.2 сравнительных величин коэффициентов паропроницаемости, полученных Иогансоном и Эденхольмом и вычисленных по формуле (VI.24).

Таблица VI.2

Сопоставление экспериментальных и вычисленных значений коэффициентов паропроницаемости

Наименование материала	Значения μ при весовой влажности материала						Значения по СНиП
	30%		50%		70%		
	экспериментальные	вычисленные	экспериментальные	вычисленные	экспериментальные	вычисленные	
Известковый раствор	0,003	0,0043	0,065	0,0058	0,011	0,009	0,016
Цементный раствор	0,002	0,0028	0,0035	0,0047	0,0065	0,0068	0,012
Плотный бетон . .	—	—	0,0018	—	0,003	—	0,004
Минеральная вата (шерсть)	0,075	—	0,075	—	0,075	—	0,065

* Термин «коэффициент влагопроницания» (Feuchtigkeitsdurchlasszahl) свидетельствует лишь о том, что в немецкой и, по-видимому, скандинавской литературе не употребляется наименование паропроницаемость. Однако идентичность измеренных величин коэффициентам паропроницаемости видна из их физической размерности. При влажности материала менее 80% по изотерме сорбции перемещения влаги в жидкой фазе не могут иметь места.

Необходимые для такого сравнения данные о сорбционной способности соответствующих материалов установлены применительно к таблице приложения.

В последней графе таблицы указаны значения коэффициентов паропроницаемости, приведенные в строительных нормах и правилах (Нормы строительной теплотехники). Эти сравнительно высокие значения для смачиваемых материалов примерно соответствуют влажностному состоянию при 80—90% по изотерме сорбции.

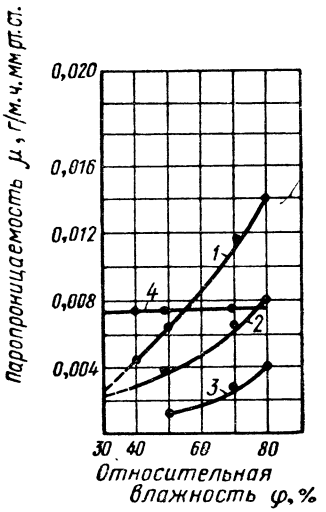


Рис. VI.11. Изменения коэффициентов паропроницаемости строительных материалов в зависимости от их влагосодержания (по экспериментальным данным Иогансона и Эденхольма):

1 — известковый раствор; *2* — цементный раствор; *3* — плотный бетон; *4* — минеральная вата (шерсть)

Данные таблицы подтверждают, что для различного влажностного состояния материалов порядок значений μ (экспериментально установленных и вычисленных) один и тот же.

Это позволяет применять для расчетов влажностного состояния ограждающих конструкций уточненные значения коэффициентов паропроницаемости гидрофильных материалов.

Для конструкций, ограждающих сухие помещения и вообще выполненных из сухих гидрофильных материалов, нормируемые значения коэффициентов следует уменьшать в соответствии с формулой (VI.24).

Введение в расчет влажностного состояния конструкций уточненных значений коэффициентов паропроницаемости приближает расчетные предпосылки к действительным условиям увлажнения конструкций; в сухих отапливаемых помещениях требования к устройству влагоизоляции конструкций соответственно уменьшаются.

Как уже было отмечено выше, в конструкциях, выполненных из плотных материалов, процессы диффузии водяного пара протекают медленно. Если постоянный поток тепла в таких ограждающих конструкциях устанавливается в течение нескольких суток или даже часов после того, как температуры внутреннего и наружного воздуха стабилизировались, то постоянный поток водяного пара в облегченных конструкциях может установиться только в течение нескольких недель, а в более массивных конструкциях, выполненных из плотных материалов, — нескольких месяцев после стабилизации величин парциального давления водяного пара во внутреннем и наружном воздухе. Так как в реальных условиях за этот период времени значения давлений водяного пара существенно изменяются, диффузия в сравнительно массивных ограждениях отапливаемых зданий так и не приобретает устано-

вившегося характера. Поэтому расчеты диффузии и конденсации водяного пара внутри массивных однородных ограждений, проводимые методами, справедливыми для установившегося потока водяного пара, обычно носят условный характер, выясняющий максимально возможное влажностное состояние материалов конструкции.

В многослойных конструкциях подобными сравнительными расчетами легко установить наиболее целесообразное (с точки зрения предупреждения конденсации влаги) расположение конструктивных слоев с различной степенью проницаемости.

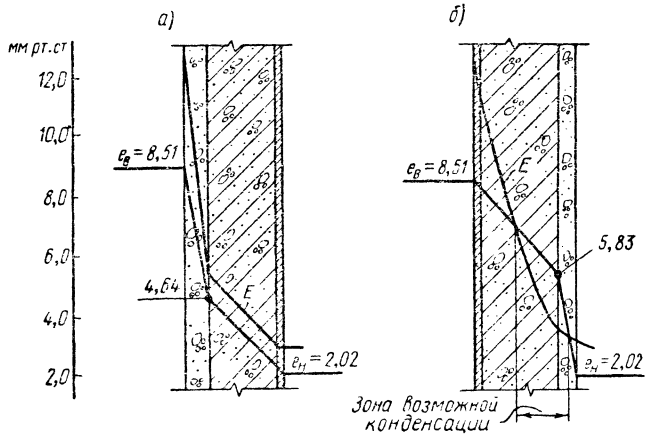


Рис. VI.12. Схемы влажностного состояния слоистых стен с различным расположением слоев при установившемся потоке диффузии водяного пара:

а — в стенах с плотным конструктивным слоем, граничащим с отапливаемым помещением, конденсация пара отсутствует; *б* — в стенах из пористого, защищенного фактурой материала и наружного плотного конструктивного слоя, возможна конденсация пара

Однако в практике проектирования и строительства имеются случаи, когда расчеты по установившемуся потоку диффундирующей влаги приобретают достаточную достоверность.

Таковы, например, расчеты наружных ограждений холодильников в южном климате: непрерывность теплого периода года приближает протекающий снаружи внутрь процесс диффузионного увлажнения этих конструкций к стационарному и расчеты, справедливые для этих условий, обеспечивают результаты, близкие к действительности.

Наибольшее распространение получил графо-аналитический метод расчета при установившемся потоке водяного пара, предложенный в СССР О. Е. Власовым и К. Ф. Фокиным. Этот метод заключается в следующем:

1. На разрезе ограждающей конструкции (например, железобетонной панели, утепленной пенобетоном, рис. VI.12) строится линия распределения температур внутри конструкции; при этом тем-

пература наружного воздуха (в том случае, если определяется зимнее накопление конденсирующейся внутри конструкции влаги) принимается равной средней температуре наиболее холодного месяца. Для построения линии распределения температур пользуются соответствующей формулой для стационарной теплопередачи (I.24).

2. На том же чертеже строится линия насыщающих парциальных давлений водяного пара E, соответствующая построенному распределению температур в толще конструкции. Величины этих давлений водяного пара для температур в конкретных сечениях конструкции принимаются по таблице приложения.

3. Строится линия падения действительных величин парциальных давлений водяного пара e в толще ограждающей конструкции.

Если линия e лежит ниже линии насыщающих парциальных давлений E, то конденсация диффундирующего водяного пара в толще конструкции происходить не может; пересечение же этих линий будет указывать на возможность такой конденсации.

Наклон линии падения действительных давлений водяного пара зависит от величины сопротивления паропроницанию отдельных конструктивных слоев. Значения парциальных давлений на границах между отдельными слоями вычисляются по формуле:

$$e_{п}=e_{в}-\frac{\Delta e}{\Sigma R_{п}}\Sigma'_{n-1}R_{п}, \qquad (VI.25)$$

где $e_{в}$ — парциальное давление водяного пара в воздухе помещения; Δe — разность давлений водяного пара во внутреннем и наружном воздухе; $\Sigma R_{п}$ — общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции; $\Sigma'_{n-1}R_{п}$ — сопротивление паропроницанию внутренних конструктивных слоев, расположенных между воздухом помещения и плоскостью, в которой вычисляется значение парциального давления.

Значительное падение парциальных давлений e конструктивных слоев ограждающей конструкции, граничащих с помещением, будет иметь место в тех случаях, когда эти слои выполнены из плотных материалов или изделий (причем сопряжения между отдельными изделиями достаточно непроницаемы).

Так, например (рис. VI.12, *а*), в стене из пенобетона с внутренним железобетонным конструктивным слоем и наружной фактурой парциальное давление водяного пара на внутренней поверхности пенобетона составит:

$$e_{п}=e_{в}-\frac{\Delta e}{\Sigma R_{п}}\sum_{n-1}^{1}R_{п}=8{,}51-\frac{8{,}51-2{,}02}{21{,}15}12{,}5=4{,}64\ \textit{мм рт. ст.},$$

где $e_{в}=8{,}51$ *мм рт. ст.* (при температуре помещения $t_{в}=18°$ и относительной влажности 55%);
$e_{н}=2{,}02$ *мм рт. ст.* (при $t_{н}=-7°$ и $\varphi=80\%$);

$$\Sigma R_{п}=0{,}45+\frac{0{,}05}{0{,}004}+\frac{0{,}19}{0{,}027}+\frac{0{,}015}{0{,}013}=21{,}15\ \textit{мм рт. ст.}\cdot м^{2}\cdot ч/кг.$$

(0,45 — сопротивление влагообмену на внутренней поверхности конструкции; 0,05; 0,19 и 0,015 — толщины железобетонного слоя, пенобетона и фактуры; 0,004; 0,027 и 0,013 — коэффициенты паропроницаемости этих материалов; $\Sigma'_{n-1}R_{\text{п}}$ — сопротивления влагообмену на поверхности и паропроницанию железобетонного слоя, равное 12,5 *мм рт. ст.·м²·ч/кг*).

При столь значительном падении парциального давления водяного пара в конструктивном слое ограждающей конструкции, граничащим с отапливаемым помещением, величины e во всех сечениях конструкции оказываются меньше значений E, а потому конденсации водяного пара в толще стены происходить не может. Наоборот, падение парциального давления пара во внутренних слоях конструкции будет небольшим, если эти слои выполнены из пористых паропроницаемых материалов.

В этом случае значения парциальных давлений водяного пара внутри ограждающей конструкции достигают величины максимально возможного насыщения воздуха в порах материала. В связи с этим возможна конденсация влаги внутри конструкции в зоне, где величина e, вычисленная по формуле (VI.25), равна или даже превышает значение E.

Например, в стене из пенобетона с внутренней фактурой и наружным железобетонным слоем парциальное давление водяного пара e под этим последним слоем должно было бы быть:

$$e_{\text{п}} = 8{,}51 - \frac{8{,}51 - 2{,}02}{21{,}15} 8{,}65 = 5{,}83 > E,$$

где 8,65 — сумма сопротивлений влагообмену и паропроницанию фактуры и пенобетона.

При плотном наружном слое можно ожидать конденсации влаги в зоне примыкания к нему.

Графо-аналитический метод расчета может служить основой изучения общих закономерностей распределения влагосодержания в однородных ограждающих конструкциях для тех случаев, когда такое влагосодержание ниже предела сорбционного насыщения материала.

По значениям величин e и E внутри конструкции, например, шлакобетонной стены (рис. VI.13), можно построить линию изменений относительных парциальных давлений (относительной влажности воздуха в порах материала $\left(\varphi = \frac{e}{E} 100\right)$.

Построение такой линии (рис. VI.13, *а*) показывает, что внутри конструкции относительная влажность может достигать значений, близких к полному насыщению, тогда как к теплой и холодной поверхностям конструкции значения φ — понижаются. В соответствии с изменениями относительной влажности внутри конструкции будет изменяться и влагосодержание материала.

По изотерме сорбции (рис. VI.13, *б*) и значениям φ легко установить соответствующее равновесное влагосодержание материала. Например, из данных рисунка VI.13 видно, что наибольшее влаго-

содержание шлакобетона внутри стены повышается до 3,5% по весу, а у внешних поверхностей конструкции уменьшается до 2,1—2,5%.

Описанный метод расчета определяет только конечные термодинамически-возможные состояния, характерные для завершающих стадий процесса увлажнения, но не рассматривает течение этого процесса во времени. Поэтому в конструкциях, выполненных из плотных материалов, конденсации, ожидаемой в соответствии с расчетом, может и не наступить, поскольку для стабилизации процесса увлажнения (при которой оказываются справедливыми описанные выше графические построения) продолжительность холодного периода года окажется недостаточной. В связи с этим термодинами-

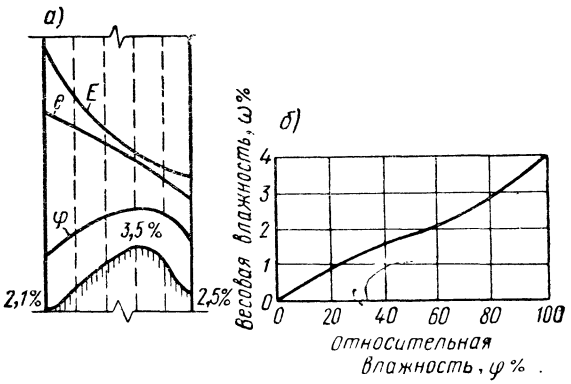


Рис. VI.13. Влагосодержание наружной стены из шлакобетона при отсутствии ее увлажнения жидкой влагой:

а — распределение относительных парциальных давлений и влагосодержания; *б* — изотерма сорбции шлакобетона (γ=1400 *кг/м*³)

ческая трактовка процесса увлажнения должна быть дополнена молекулярно-кинетическими представлениями о быстроте этого процесса. Для расчета влажностного состояния слоистых ограждающих конструкций и предупреждения образования конденсата в их толще может быть применен метод инженерного расчета, по предельно-допустимому состоянию увлажнения.

§ 6. РАСЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОМУ СОСТОЯНИЮ УВЛАЖНЕНИЯ

Внутри любой ограждающей конструкции, выполненной из пористых воздушно-сухих материалов, легко установить зону или точнее плоскость, в которой возникновение конденсации диффундирующего водяного пара наиболее вероятно и должно произойти ранее, чем в других сечениях. В слоистых конструкциях отапливаемых зданий таким опасным сечением будет плоскость примыкания сравнительно проницаемых материалов (рыхлых, пористых и т. д.),

к более плотным слоям, расположенным в наружной (т. е. более холодной) части конструкции (рис. VI.14).

В конструкциях стен, утепленных изнутри, это будет плоскость примыкания утеплителя к основной более плотной части; при утеплении стен снаружи — опасное сечение находится под наружным фактурным слоем; в покрытиях с многослойной рулонной кровлей опасной зоной является подкровельный слой. В конструкциях однородных стен помещений с влажностью не выше нормальной, зона наибольшего увлажнения расположена примерно на расстоянии

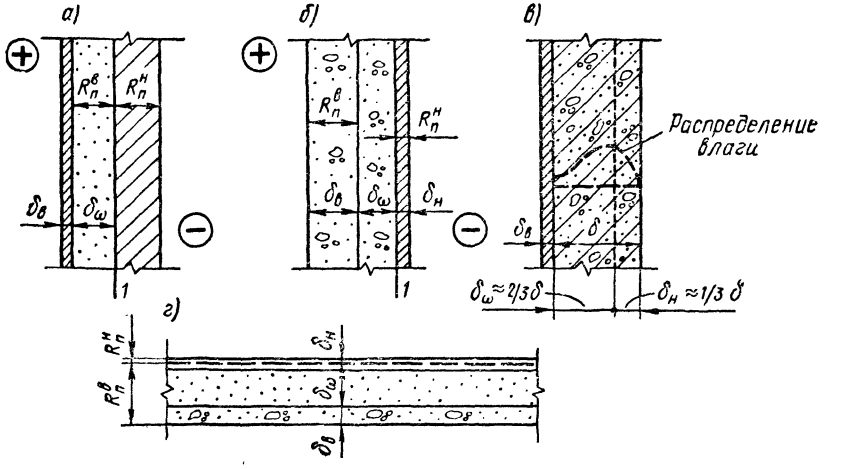


Рис. VI.14. Расположение плоскости вероятной конденсации в ограждающих конструкциях, увлажняемых диффузией водяного пара:
а — в стене, утепленной изнутри; *б* — в стене, утепленной снаружи; *в* — в стене из однородного материала с внутренним фактурным слоем; *г* — в покрытии с рулонной кровлей; *1* — *плоскость вероятной конденсации*; *δ* — *толщина слоев*; δ_ω — увлажняемого; $\delta_в$ — внутреннего фактурного; $\delta_н$ — наружного

$^2/_3$ толщины от внутренней поверхности, поскольку равновесное влагосодержание материала в этой зоне наибольшее.

При разработке методов инженерного расчета кинетических процессов, к которым, в частности, относится диффузионное увлажнение конструкций, часто возникает необходимость рассмотрения предельно допустимых состояний этого процесса, существенным образом влияющих на эксплуатационные качества конструкции. Во многих кинетических процессах (например, постепенного разрушения, охлаждения, проницания, увлажнения и т. д.) такие предельно-допустимые состояния конструкции определяют основные этапы и даже методы соответствующих технических расчетов.

В зависимости от стойкости увлажняемых материалов (т. е., прежде всего, от степени постоянства их структурно-механических свойств при многократных изменениях влагосодержания и колебаниях температуры) и их сорбционной активности, допустимое состояние увлажнения может быть различным:

а) если конструкция выполнена в наиболее опасной для увлажнения части из недостаточно биостойких материалов (например, из древесины, торфоплит, фибролита и т. д.), предельно допустимым можно считать то влагосодержание, при котором вероятно возникновение разрушающих биологических процессов (для перечисленных выше материалов это будет весовая влажность 24%, примерно соответствующая по изотерме сорбции равновесному влагосодержанию при $\varphi=90\%$);

б) для конструкций, выполненных из легких или ячеистых бетонов и других биостойких и морозостойких материалов, влажностное состояние при возникновении конденсации влаги в опасном сечении (т. е. $\varphi=100\%$) можно считать предельно допустимым, поскольку за весь предшествующий период увлажнения материалы этой конструкции находятся в стадии гигроскопической влажности и им не угрожает активное разрушение от длительных воздействий жидкой влаги, мороза или коррозии;

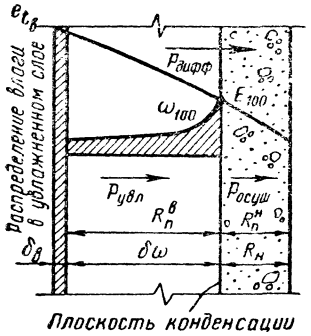


Рис. VI.15. Условия увлажнения ограждающей конструкции при предельно допустимом влажностном состоянии:
$P_{диффф}$ — общее количество диффундирующей влаги; $P_{увл}$ — увлажняющее количество; $P_{осущ}$ — количество влаги, удаляющееся из конструкции

в) для конструкций, утепленных гидрофобными материалами с малой сорбционной активностью, но высокой стойкостью в увлажненном состоянии к внешним воздействиям, можно допустить некоторое накопление конденсата в опасной зоне конструкции.

Если момент достижения допустимого влагосодержания или возникновения конденсации в опасном сечении конструкции совпадает с окончанием средней многолетней продолжительности холодного периода года, в течение которого может происходить наиболее интенсивная диффузия в толще конструкции, то последнюю можно считать удовлетворительно запроектированной, поскольку после этого момента начинается в обычных климатических условиях период естественного высыхания ограждения.

При достижении допустимого влагосодержания или при возникновении конденсации парциальное давление в опасном сечении конструкции равно расчетному, $e_{расч.}$. Давление $e_{расч.}$ принимается насыщающим E_t в случаях *б*, *в* и несколько меньшим $e_{90,t}$ в случае *а*; потенциалом переноса влаги, вызывающим увлажнение, является разность $e_{в.п} - e_{расч.}$, а высыхание — $e_{расч.} - e_н$ (рис. VI.15).

При определенном соотношении осушающего и увлажняющего потенциалов $\frac{e_{расч} - e_н}{e_{в\,п} - e_{расч}} = \beta$, количество водяного пара, диффундирующего сквозь конструкцию и не задерживающегося в зоне

конденсации, обратно пропорционально отношению диффузионных сопротивлений наружной и внутренней части конструкции,

т. е. $\frac{R_{\text{п}}^{\text{н}}}{R_{\text{п}}^{\text{в}}}=\psi^{*}$.

При определенных величинах β отношение диффундирующего количества водяного пара $P_{\text{дифф}}$ к той его части, которая увлажняет конструкцию $P_{\text{увл}}$, может быть выражено коэффициентом условий увлажнения n, величины которого изменяются в зависимости от отношения диффузионных сопротивлений

$$\bar{n}=\frac{P_{\text{диф}\dagger.}}{P_{\text{увл.}}}=\frac{P_{\text{диф}\dagger.}}{P_{\text{диф}\dagger.}-P_{\text{осуш.}}}=\frac{\frac{1}{R_{\text{п}}^{\text{в}}}}{\frac{1}{R_{\text{п}}^{\text{в}}}-\frac{\beta}{R_{\text{п}}^{\text{н}}}}=\frac{1}{1-\frac{\beta}{\psi}} \qquad \text{(VI 26)}$$

Величина коэффициента условий увлажнения может изменяться от $n=1{,}0$ для ограждений с непроницаемой наружной частью (в этом случае все диффундирующее количество водяного пара идет на увлажнение ограждения) до $\bar{n}\geqslant 10{,}0$ для конструкций с проницаемым наружным слоем (в этом случае на увлажнение ограждения идет незначительная часть диффундирующего пара).

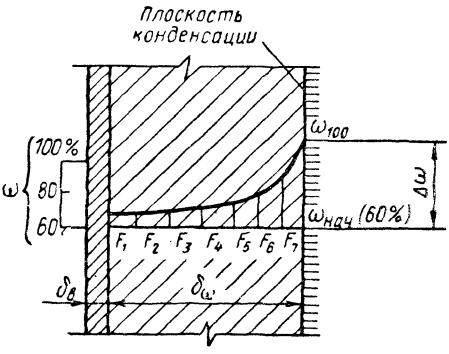


Рис. VI.16. Распределение сорбируемой влаги в увлажняемом путем диффузии слое конструкции:

F_1 ... F_7 — отдельные участки эпюры распределения влаги; δ_ω — толщина увлажняемого слоя; $\delta_в$ — толщина фактурного слоя, обращенного в отапливаемое помещение; ω — сорбционное влагосодержание материала

При сильно проницаемой наружной части (или при наличии вентилируемой воздушной прослойки под наружным защитным слоем) величины $\bar{n}$ сильно возрастают, что свидетельствует о невозможности накопления влаги внутри конструкции за счет диффузии. В этих случаях расчета на увлажнение при диффузии водяного пара не требуется. Для таких конструкций не нужна пароизоляция, поскольку сопротивление паропроницанию их внутренней части обычно достаточно.

Влажностное состояние материала конструкции зависит от особенностей распределения влаги по толщине увлажняемого слоя.

Такое распределение влаги связано с сорбционными свойствами увлажняемого материала, а в слоистых конструкциях также с сопротивлением проницанию и влагоемкостью соседнего более плот-

* Границей между наружной и внутренней частями конструкции является плоскость вероятной конденсации.

ного конструктивного слоя, расположенного далее по течению по тока диффузии.

Поскольку в утепленных снаружи и однородных конструкциях сухих отапливаемых помещений опасного накопления диффундирующей влаги происходить не может, объектами расчета на диффузионное увлажнение являются преимущественно слоистые конструкции с плотной наружной частью или защитным слоем.

Характерное предельно допустимое распределение влаги постепенно увлажняемом теплоизоляционном слое конструкции к моменту возникновения конденсации в опасном сечении может быть установлено из опыта расчетов ограждающих конструкций более точными методами.

На рис. VI.16. приведено характерное распределение сорбируемой влаги в увлажняемом слое с начальной влажностью, соответствующей 60% по изотерме сорбции *; такое распределение влаги установлено при высоком сопротивлении паропроницанию последующего слоя и отсутствии поглощения им накапливающейся влаги.

На основе характерного распределения влаги при увлажнении может быть определена весовая часть увлажняемого слоя, которая могла бы подвергнуться полному насыщению до верхнего сорбционного предела при таком распределении. Эта часть $b=\frac{\Sigma F_{в}}{\Delta\omega\delta_{\omega}}\approx 0{,}43$ (см. рис. VI.16).

Степень увлажнения материала внутри ограждающей конструкции, достигаемая в течение холодного периода года, зависит от количества водяного пара P_{ω}, проникающего путем диффузии в опасную зоную конструкции и задерживающегося в этой зоне.

В общем виде поток водяного пара внутри ограждения:

$$P=\frac{\Delta e}{R_{п}}\tau\ г/м^2,$$

где Δe — разность парциальных давлений, *мм рт. ст.*; $R_{п}=\frac{\delta}{\mu}$ — сопротивление паропроницанию, *мм рт. ст.*$\cdot м^2\cdot ч/г$; τ — время, *ч*.

В соответствии с этим:

$$P_{\omega}=\frac{e_{в.п}-e_{расч}}{R_{п}^{в}n}\tau\ г/м^2, \qquad (VI.27)$$

где $e_{в.п}-e_{расч}$ — разность парциальных давлений водяного пара на поверхности конструкции, обращенной в помещение, и в плоскости конденсации при достижении допустимого расчетного предела; $R_{п}^{в}=\Sigma\frac{\delta}{\mu}$ — сумма сопротивлений паропроницанию конструктивных слоев от поверхности конструкции, обращенной в помещение

* В соответствии с данными К. Ф. Фокина для пенобетонных покрытий, рассчитываемых методом последовательного увлажнения

до плоскости конденсации (δ — толщина слоя, *м*; μ — коэффициент паропроницаемости, *г/м·ч·мм рт. ст.*; τ — период увлажнения (длительность диффузии), *ч*; n — коэффициент условий увлажнения конструкции, устанавливаемой по формуле (VI.26).

С другой стороны предельно допустимое количество водяного пара, проникающего внутрь конструкции и вызывающее увлажнение до возникновения конденсации в опасном сечении, может быть выражено как

$$P'_{\omega}=0{,}01b\delta_{\omega}\gamma(\omega_{100}-\omega_x)\ кг/м^2;$$

или

$$P'_{\omega}=10b\delta_{\omega}\gamma(\omega_{100}-\omega_x)\ г/м^2, \qquad (VI.28)$$

где $\delta_{\omega}\gamma$ — вес увлажняемого слоя, *кг/м²* (δ_{ω} — толщина слоя, *м*, γ — объемный вес материала, *кг/м³*); ω_{100}, ω_x — соответственно максимальное сорбционное влагосодержание материала и его сорбционное влагосодержание к концу летнего периода, т. е. начальная весовая равновесная влажность перед процессом увлажнения, %; $b\approx 0{,}43$ — коэффициент, выраженный в долях единицы и устанавливающий весовую часть слоя, подвергающуюся полному увлажнению.

При применении недостаточно биостойких материалов (т. е. для случая *а*), выражение (VI.28) может быть записано следующим образом:

$$P'_{\omega}=10b\delta_{\omega}\gamma(\omega_{90}-\omega_x)\ г/м^2, \qquad (VI.28а)$$

где ω_{90} — сорбционное влагосодержание материала, соответствующее вероятному возникновению разрушающих биологических процессов.

Гидрофобные утепляющие материалы обладают ничтожной пароемкостью, а, кроме того, часто и минимальным объемным весом; в силу этого количество диффундирующей влаги, необходимое для возникновения конденсации в опасном сечении конструкции, весьма мало.

Если применяемые гидрофобные материалы отличаются в увлажненном состоянии высокой стойкостью к колебаниям температуры, уместно допустить внутри конструкции конденсацию некоторого количества влаги, могущего полностью испариться в течение одного-двух месяцев, после наступления теплого периода года. Таким количеством можно считать, например, 200—250 *г/м²* к концу зимы.

Поскольку пароемкость минераловатных плит, войлока и других аналогичных легких материалов составляет 30—40 *г/кг·мм рт. ст.*, допустимость указанного выше количества конденсата, превышающего в несколько раз значение пароемкости, можно обеспечить введением коэффициента 6,0 в выражение (VI.28), т. е.

$$P'_{\omega}=60b\delta_{\omega}\gamma(\omega_{100}-\omega_x)\ г/м^2. \qquad (VI.28б)$$

Начальная весовая влажность материала к концу летнего периода зависит от климатических условий и может быть принята равной относительной влажности воздуха в дневные часы наиболее теплого летнего месяца (обычно июля).

Для сухих климатических районов такая начальная равновесная влажность ω_x составляет около 50%, для умеренных — 60%, влажных — около 70% по изотерме сорбции.

Относительная пароемкость материала увлажняемого слоя будет различной при этих значениях ω_x, а именно:

1) для сухих условий $\xi_0' = \frac{\omega_{100} - \omega_{50}}{100 - 50} 1000 = 20(\omega_{100} - \omega_{50})$;

2) для нормальных условий $\xi_0'' = \frac{\omega_{100} - \omega_{60}}{100 - 60} 1000 = 25(\omega_{100} - \omega_{60})$;

3) для влажных условий $\xi_0''' = \frac{\omega_{100} - \omega_{70}}{100 - 70} 1000 = 33(\omega_{100} - \omega_{70})$.

В общем виде $\xi_0 = m(\omega_{100} - \omega_x)$, где значения m для соответствующих условий указаны выше.

При применении недостаточно биостойких материалов относительная пароемкость материала должна быть ограничена верхним пределом влагосодержания ω_{90}; тогда ее значения в различных климатических условиях будут:

1) для сухих условий $\xi_0' = \frac{\omega_{90} - \omega_{50}}{90 - 50} 1000 = 25(\omega_{90} - \omega_{50})$;

2) для нормальных условий $\xi_0'' = \frac{\omega_{90} - \omega_{60}}{90 - 60} 1000 = 33(\omega_{90} - \omega_{60})$;

3) для влажных условий $\xi_0''' = \frac{\omega_{90} - \omega_{70}}{90 - 70} 1000 = 50(\omega_{90} - \omega_{70})$.

Выражая формулу (VI.28) через относительную пароемкость материала, имеем:

$$P_\omega' = 10 \cdot 0{,}43 \delta_\omega \gamma \frac{\xi_0}{m} = \kappa \delta_\omega \gamma \xi_0 \ \text{г/м}^2, \qquad \text{(VI.29)}$$

где $\kappa = \frac{10 \cdot 0{,}43}{m}$, т. е. при использовании в конструкции ячеистых бетонов или других материалов с нормальной сорбционной активностью, соответственно равный 0,215; 0,172, 0,130 для сухих, умеренных и влажных районов.

При применении недостаточно биостойких материалов, значения коэффициента κ будут соответственно равны 0,170; 0,130; 0,086, а при использовании стойких гидрофобных утеплителей с низкой сорбционной активностью — 1,29; 1,03 и 0,930.

Предельным условием, определяющим допустимость влажностного состояния конструкции к концу периода увлажнения, является равенство $P_\omega = P_\omega'$.

Приравнивая выражения (VI.27) и (VI.29), легко установить период времени τ, по истечении которого может возникнуть предельно допустимое влажностное состояние в опасном сечении конструкции:

$$\tau = \frac{\kappa_0 \delta_\omega \gamma \xi_0 R_\text{п}^\text{в} n}{e_\text{в.п} - e_\text{расч}} \text{ сут.} \qquad \text{(VI.30)}$$

и необходимое сопротивление паропроницанию внутренней части конструкции для того, чтобы в опасном сечении не возникло длительной конденсации (капиллярной или массовой) или недопустимого накопления конденсирующейся влаги:

$$R_\text{п}^\text{в} = \frac{(e_\text{в.п} - e_\text{расч.})\,\tau}{\kappa_0 \delta_\omega \gamma \xi_0 n} \text{ мм рт. ст.} \cdot м^2 \cdot ч/г. \qquad \text{(VI.31)}$$

В этих формулах коэффициент $\kappa_0 = \kappa/24$ уменьшен в 24 раза, поскольку длительность времени диффузии удобнее выражать не в часах, а в сутках.

Значения коэффициента $\kappa_0 = \kappa/24$ в формулах (VI.30) и (VI-31) можно принимать по табл. VI.3:

Таблица VI.3

Значения коэффициентов κ_0 при расчете ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения

Условия эксплуатации	Значения κ_0 при применении материалов		
	недостаточно биостойких, но активно сорбирующих	пористых, неорганических с нормальной сорбционной активностью	стойких, гидрофобных с малой сорбционной активностью
Сухие условия ($\omega_\text{мин} \approx 50\%$) . . .	0,007	0,009	0,05
Нормальные условия ($\omega_\text{мин} \approx 60\%$)	0,005	0,007	0,04
Влажные условия ($\omega_\text{мин} \approx 70\%$)	0,004	0,005	0,04

За длительность диффузии τ уместно в качестве допустимого приближения принимать время холодного периода года в сутках, ограниченное датами, соответствующими среднесуточным температурам, равным нулю и устанавливающимся в осенний и весенний периоды. Длительность такого времени указана в нормах строительной климатологии СНиП (графа 23 табл. 1 гл. СНиП II-А.6—72).

Для центральных районов европейской части СССР длительность диффузии близка к четырем месяцам; в более холодных, но сухих районах (южные территории центральной Си-

бири и т. д.) увеличение длительности диффузии компенсируется меньшей влажностью воздуха в помещениях и относительной сухостью материалов ограждений; в ряде случаев условия конструирования ограждений в таких районах (с точки зрения требуемой влагоизоляции) облегчаются, поскольку толщина конструкций возрастает, а коэффициенты паропроницаемости для многих сухих материалов уменьшаются. В западных районах европейской части СССР, где длительность периода диффузии сокращается, но влажность материалов повышена, требования к сопротивлению влагоизоляции также не изменяются.

Лишь во влажных северных районах (Кольский полуостров и т. д.) и в холодных районах Сибири, особенно подвергающихся океаническом влияниям, эти требования возрастают.

Наоборот, для южных сухих районов сопротивление необходимой влагоизоляции сильно уменьшается.

Температура в зоне возможной конденсации t_ω и соответствующее этой температуре насыщающее давление водяного пара E_ω должны быть установлены обычным теплотехническим расчетом *.

Расчет продолжительности времени, необходимого для предельно допустимого увлажнения ограждающей конструкции, позволяет судить о целесообразности применения ее в помещениях с различным парциальным давлением водяного пара во внутреннем воздухе.

Пример VI.1. Установить продолжительность времени, необходимого для предельно допустимого увлажнения бесчердачного покрытия из армопенобетонных плит толщиной 0,12 *м* при объемном весе 750 *кг/м*^{3}, в производственном помещении, в Харькове, где под покрытием $t_в = 24°$. Сопротивление теплопередаче покрытия $R_0 = 0{,}80$ *град · м*^{2} *· ч/ккал*. Парциальное давление водяного пара у поверхности покрытия, обращенной в помещение $e_{в.п} = 9{,}0$ *мм. рт. ст.* Расчетная температура наружного воздуха $t_н = -7{,}4°$ (средняя температура января). $e_н = 1{,}96$ *мм рт. ст.* Температура в подкровельном слое покрытия $t_\omega = -4{,}6°$, а насыщающее парциальное давление $E_\omega = 3{,}11$ *мм рт. ст.* Величина

$$\beta = \frac{E_\omega - e_н}{e_{в\,п} - E_\omega} = \frac{3{,}11 - 1{,}96}{9{,}0 - 3{,}11} = 0{,}19.$$

Коэффициент паропроницаемости пенобетона $\mu = 0{,}019$ *г/м · ч · мм рт. ст.* Покрытие имеет трехслойную рулонную кровлю (рубероид по двум слоям пергамина) с сопротивлением паропроницанию $R_п = 18{,}6$ *мм рт. ст. · м*^{2} *· ч/г*.

Относительная пароемкость пенобетона (от 60 до 100% по изотерме сорбции, рис. VI.17) $\xi_0 = \dfrac{11{,}75 - 3{,}7}{100 - 60}\,1000 - 201$ *г/кг*.

Сопротивление паропроницанию внутренней части конструкции до плоскости вероятной конденсации в подкровельном слое:

$$R_п^в = R_{в.п} + \delta_\omega/\mu = 0{,}6 + 0{,}12/0{,}019 = 6{,}9 \text{ мм рт. ст.} \cdot м^2 \cdot ч/г,$$

где сопротивление влагообмену на поверхности покрытия $R_{в.п} = 0{,}6$ (при $\varphi_в = 40\%$; см. фомулу VI.22).

---

* Температуру наружного воздуха при таком расчете обычно принимают равной средней температуре самого холодного месяца в данной местности.

Отношение сопротивлений наружной и внутренней частей $\psi = 18{,}6/6{,}9 = 2{,}7$ и коэффициент условий увлажнения по формуле (VI.26)

$$n = \frac{1}{1 - \beta/\psi} = \frac{1}{1 - 0{,}19/2{,}7} = 1{,}08.$$

Продолжительность времени, необходимого для предельно допустимого увлажнения, (VI.30)

$$\tau_{\text{расч}} = 0{,}007 \frac{0{,}12 \cdot 750 \cdot 201 \cdot 6{,}9}{9 - 3{,}11} 1{,}08 = 147 \text{ сут.} \approx 5{,}0 \text{ мес.},$$

что превышает длительность периода диффузии, продолжающегося в Харькове около четырех месяцев.

Следовательно, применение армопенобетонного покрытия в рассмотренных условиях возможно без каких-либо специальных пароизоляционных слоев.

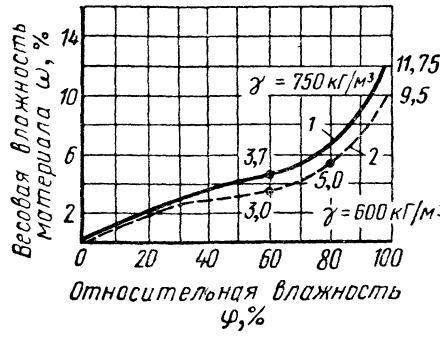


Рис. VI.17. Изотермы сорбции пенобетона:
1 — с объемным весом 750 *кг/м³*; *2* — то же, — 600 *кг/м³*

Для слоистых покрытий в виде железобетонных плит с тщательно заделанными стыками, окрасочного (битумного) пароизоляционного слоя, утепления из пенобетонных плит и рулонной кровли продолжительность увлажнения, при рассмотренных выше условиях, также будет превышать длительность диффузии, в связи с чем более сложные расчеты влажностного состояния таких конструкций не требуются.

Продолжительность времени, необходимого для предельно допустимого увлажнения однородных массивных стен (за счет диффузии водяного пара), превышает длительность холодного периода года, в течение которого может происходить диффузия. В связи с этим графо-аналитический расчет влажностного состояния таких ограждений утрачивает практический смысл.

Лишь для предельно облегченных конструкций, выполняемых с применением эффективных теплоизоляционных материалов, защищенных со стороны помещения тонкими отделочными слоями из сравнительно паропроницаемых материалов, продолжительность

времени, необходимого для предельно допустимого увлажнения, мала.

Такова, например, конструкция бесчердачного покрытия из асбестоцементных листов ($\delta=8$ мм, $\mu=0{,}0035$) с окрасочной пароизоляцией, минераловатным утеплителем и трехслойной рулонной кровлей, наклеенной по верхнему листу асбестоцемента.

В связи с предельной легкостью такого покрытия, расчет накопления влаги, конденсирующейся в виде инея на нижней поверхности асбестоцементного листа под рулонной кровлей, должен производиться за полную длительность холодного периода года.

Для подобных конструкций даже в помещениях с нормальной влажностью внутреннего воздуха следует применять внутренние защитные слои с очень большим сопротивлением паропроницанию (листы из плотных пластмасс, алюминия, асбестоцемента, покрытого толстой (многослойной) защитной пленкой на основе полимерных материалов и т. д.), так как применение в аналогичных конструкциях с рулонной кровлей более проницаемых отделок может привести к периодической ежегодной конденсации влаги в подкровельном слое и постепенному разрушению конструкции.

Расчет необходимого сопротивления паропроницанию внутренней части проектируемой конструкции покрытия над влажным помещением и ее необходимой влагоизоляции приведен в следующих примерах.

Пример VI.2. Требуется установить вид влагоизоляции для бесчердачного покрытия прядильного цеха текстильной фабрики в г. Витебске ($t_в=+24°$; $\varphi_в=60\%$; $e_{в.п}=13$ *мм рт. ст.*). Расчетная температура наружного воздуха $t_н=-7{,}4°$ (средняя температура января); $\tau_{расч}=139$ сут; $e_н=2{,}45$ *мм рт. ст.*

Конструкция покрытия решена в виде сборной железобетонной плиты (толщиной 0,03 *м*, $\mu=0{,}004$), утепленной пенобетоном (толщиной 0,2 *м*, при объемном весе 500 *кг/м*^{3}, коэффициенте паропроницаемости $\mu=0{,}026$, относительной пароемкости $\xi_0=145$ *г/кг*) и покрытой по цементной стяжке трехслойной рулонной кровлей ($R_п=18{,}3$ *мм рт. ст.* $\cdot$ *м*$^2\cdot$ *ч/г*). Сопротивление теплопередаче покрытия $R_0=1{,}57$ *град* $\cdot$ *м*$^2\cdot$ *ч/ккал*; температура под цементной стяжкой $t_\omega=-5{,}6°$, чему соответствует $E_\omega=2{,}86$ *мм рт. ст.*

Величина $\beta=\dfrac{E_\omega-e_н}{e_{в.п}-E_\omega}=\dfrac{2{,}86-2{,}45}{13{,}0-2{,}86}=0{,}04.$

Намечая влагоизоляцию в виде одного слоя рубероида, наклеенного на битумной мастике ($R_п'=8{,}3+2=10{,}3$ *мм* $\cdot$ *м*$^2\cdot$ *ч/г*), определим сопротивление паропроницанию внутренней части конструкции:

$$R_п^в=0{,}4+\frac{0{,}03}{0{,}004}+10{,}3+\frac{0{,}2}{0{,}026}=26{,}0\ \textit{мм рт. ст.}\cdot\textit{м}^2\cdot\textit{ч/г},$$

где $R_{в.п}=0{,}4$ — сопротивление влагообмену на поверхности покрытия при $\varphi=60\%$ (VI.22).

Отношение сопротивлений наружной и внутренней части $\psi=\dfrac{18{,}3}{26{,}0}=0{,}70$,

тогда коэффициент условий увлажнения по формуле (VI.26), $n=\dfrac{1}{1-\dfrac{0{,}04}{0{,}70}}=1{,}06.$

Требуемое сопротивление паропроницанию внутренней части по формуле (VI.31) будет:

$$R_{\text{п}}^{\text{тр}} = \frac{(e_{\text{в.п}} - E_{\omega})\,\tau}{\kappa_0 \delta_{\omega} \gamma \xi_0 \bar{n}} = \frac{139\,(13{,}0 - 2{,}86)}{0{,}005 \cdot 0{,}2 \cdot 500 \cdot 145 \cdot 1{,}06} = 18{,}3 < 26{,}0 \ мм \cdot м^2 \cdot ч/г.$$

Следовательно, намеченная влагоизоляция удовлетворяет требованиям ограничения увлажнения конструкции.

Для конструкций слоистых панельных стен влагоизоляция может потребоваться только в тех случаях, когда эти ограждения утеплены очень проницаемыми теплоизоляционными материалами. При использовании для утепления панелей ячеистых бетонов специальной влагоизоляции обычно не требуется.

Пример VI.3. Требуется установить, нужна ли специальная влагоизоляция для панельной стены жилого дома в Москве ($t_{\text{н}} = -10{,}3°$; $e_{\text{н}} = 1{,}9$ *мм рт. ст.*; $t_{\text{в}} = +18°$; $e_{\text{в}} = 7{,}74$ *мм рт. ст.*; $\varphi = 60\%$; $\tau = 152$ сут.), защищенной снаружи железобетонной облицовкой ($\delta = 0{,}025$ *м*, $\mu = 0{,}004$), а изнутри утепленной пенобетоном ($\delta_1 = 0{,}20$ *м*, $\gamma = 600$ *кг/м*^{3}, $\mu = 0{,}023$, $\xi_0 = 163$ *г/кг* (см. рис. VI.17), с фактурным слоем ($\delta_2 = 0{,}015$, $\mu = 0{,}015$).

Сопротивление теплопередаче $R_0 = 1{,}35$ *град* $\cdot$ *м*$^2 \cdot$ *ч/ккал*; температура под облицовкой $t_{\omega} = -8{,}8°$, чему соответствует $E_{\omega} = 2{,}17$ *мм рт. ст.* Тогда величина

$$\beta = \frac{E_{\omega} - e_{\text{н}}}{e_{\text{в.п}} - E_{\omega}} = \frac{2{,}17 - 1{,}90}{7{,}74 - 2{,}17} = 0{,}05.$$

Сопротивление паропроницанию внутренней части конструкции

$$R_{\text{п}}^{\text{в}} = 0{,}5 + \frac{0{,}015}{0{,}015} + \frac{0{,}20}{0{,}023} = 10{,}2 \ мм \ рт. \ ст. \cdot м^2 \cdot ч/г,$$

(0,5 — сопротивление влагообмену на поверхности фактурного слоя),

а наружной — $R_{\text{п}}^{\text{н}} = \dfrac{0{,}025}{0{,}004} = 6{,}25.$

Тогда при $\psi = \dfrac{6{,}25}{10{,}2} = 0{,}61$ по формуле (VI.26) $\bar{n} = \dfrac{1}{1 - \dfrac{0{,}05}{0{,}61}} = 1{,}09.$

Требуемое сопротивление паропроницанию внутренней части панели жилого помещения:

$$R_{\text{п}}^{\text{тр}} = \frac{152\,(7{,}74 - 2{,}17)}{0{,}007 \cdot 0{,}20 \cdot 600 \cdot 163 \cdot 1{,}09} = 0{,}57 \ll 10{,}2 \ мм \ рт. \ ст. \cdot м^2 \cdot ч/г.$$

Следовательно, никакой дополнительной влагоизоляции для рассмотренной панельной конструкции не требуется.

При использовании для утепления панельной конструкции (трехслойной) минераловатных плит ($\gamma = 300$ *кг/м*^{3}; $\lambda = 0{,}08$; $\mu = 0{,}055$) желательна влагоизоляция, например, в виде рубероида на битумной мастике ($R_{\text{п}} = 10{,}3$ *мм рт. ст.* $\cdot$ *м*$^2 \cdot$ *ч/г*).

В самом деле, для обеспечения $R_0 = 1{,}35$ вполне достаточна толщина теплоизоляции из минераловатных плит 0,10 *м*;
тогда

$$R_{\text{п}}^{\text{в}} = 0{,}5 + 6{,}25 + 10{,}3 + \frac{0{,}10}{0{,}055} = 18{,}87 \ мм \ рт. \ ст. \cdot м^2 \cdot ч/г;$$

$$\psi = \frac{6{,}25}{18{,}87} = 0{,}32; \quad \bar{n} = \frac{1}{1 - \dfrac{0{,}05}{0{,}32}} = 1{,}20;$$

относительная пароемкость минераловатных плит $\xi_0 = \frac{1{,}9 - 0{,}3}{100 - 50} 1000 = 32$ *г/кг·мм*.

Требуемое сопротивление паропроницанию внутренней части панели

$$R_{\text{п}}^{\text{тр}} = \frac{152\,(7{,}74 - 2{,}17)}{0{,}04 \cdot 0{,}1 \cdot 300 \cdot 32 \cdot 1{,}20} = 18{,}15 < 18{,}87,$$

обеспечивается устройством принятой влагоизоляции.

§ 7. ПОНЯТИЯ ОБ УТОЧНЕННЫХ МЕТОДАХ РАСЧЕТА ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ УСЛОВИЯХ

Кратко описанный выше графо-аналитический метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций разработан для установившихся условий диффузии водяного пара и игнорирует длительное (а для массивных конструкций отапливаемых зданий нереально длительное) время, необходимое для достижения таких условий.

Для сравнительно массивных конструкций длительность такого времени превышает продолжительность холодного периода года, а потому для этих конструкций графо-аналитический метод расчета вообще неприменим. Кроме того, этим методом не учитывается ни начальное влагосодержание материала конструкции, ни постепенные его изменения во времени.

Опыт эксплуатации ограждающих конструкций зданий и многочисленные исследования в лабораторных и натурных условиях показали, что действительные особенности влажностного состояния конструкций зависят от начального влагосодержания и его колебаний в холодный и теплый периоды года, связанных с климатом местности и температурно-влажностным режимом ограждаемого помещения. Эти факторы в некоторой мере учитываются изложенным выше приближенным инженерным методом расчета по предельно допустимому состоянию увлажнения, но более точным образом могут быть изучены только на основе численного решения соответствующих дифференциальных уравнений, в частности, уравнения (I.28).

Для практических расчетов это уравнение представляется в конечных разностях [3]:

$$\frac{\Delta e}{\Delta \tau} = \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_t \frac{\Delta^2 e}{\Delta x^2}, \qquad \text{(VI.32)}$$

где обозначения соответствуют прежним:
e — парциальное давление водяного пара, *мм рт. ст.*; E_t — насыщающее парциальное давление при температуре, t; τ — время, *ч*; μ — коэффициент паропроницаемости материала, *г/м·ч·мм рт. ст.*; ξ_0 — относительная влагоемкость (пароемкость) на стадии сорбционного увлажнения, *г/кг·мм рт. ст.*; γ — объемный вес материала, *кг/м*^{3}; x — размер по толщине конструкции, *м*.

Для проведения расчета необходимо иметь изотерму сорбции того строительного материала, из которого выполнена рассматриваемая ограждающая конструкция.

В качестве исходного положения для расчета принимается начальное влагосодержание материала, соответствующее изучаемым реальным условиям; чаще всего такое начальное влагосодержание соответствует равновесному при $\varphi = 50 \div 80\%$ по изотерме сорбции. Рассчитываемая конструкция разделяется на равные по толщине слои Δx (например, на 5—6 слоев); плоскости, ограничивающие или разделяющие эти слои, нумеруются по направлению от теплой к холодной поверхности ограждения и являются расчетными плоскостями. Зная температуру и насыщающее парциальное давление в каждой из расчетных плоскостей, легко определить по начальному влагосодержанию и изотерме сорбции величину начального парциального давления в этих плоскостях, пользуясь формулой (VI.3).

Кинетика дальнейших изменений влагосодержания материала конструкции зависит от климатических условий рассматриваемой местности. Годовой цикл времени, состоящий из 12 месяцев, делится на характерные четыре периода (зима, весна, лето, осень); при этом к каждому периоду относят смежные месяцы с достаточно близкими значениями среднемесячных температур. За среднюю температуру наружного воздуха в каждом периоде принимается осредненная температура этих месяцев. Средние за каждый период значения температур на наружной поверхности ограждения вычисляются с учетом теплового действия осредненных значений солнечной радиации (формула II.16). После этого на поперечном разрезе конструкции строится распределение температур для каждого периода года, определяя их значение и соответствующие им величины насыщающих парциальных давлений в расчетных плоскостях.

Имея в виду, что стационарные условия теплопередачи устанавливаются во много раз быстрее, чем такие же условия для диффузии, принимают, что распределение температуры в ограждающей конструкции постоянно в течение каждого из характерных периодов года и соответствует средним температурным условиям этого периода. Переход от температурных условий одного периода года (например, зимы) к другому (например, весне) условно считается мгновенным.

Для численного решения уравнения (VI.32) в расчетных плоскостях, разделяющих слои Δx, определяются последовательные изменения начальных значений парциальных давлений водяного пара, происходящие с течением времени. Время представляют разделенным на равные промежутки $\Delta\tau$, *ч*. Расчетные плоскости, разделяющие слои друг от друга, обозначают номерами 0; 1; 2; 3 (рис. VI.18). (Для поверхности конструкции, обращенной в помещение, обычно принимают номер нуль.)

Парциальные давления, в плоскостях, разделяющих слои, обозначаются двумя индексами, первый из которых фиксирует номер плоскости, а второй — момент времени.

Тогда уравнение (VI.32) можно записать в виде:

$$\frac{e_{2,\tau+1}-e_{2,\tau}}{\Delta\tau}=\frac{\mu}{\xi_0\gamma}E_2\frac{e_{3,\tau}-2e_{2,\tau}+e_{1,\tau}}{\Delta x^2},$$

где $e_{2\tau+1}$ — парциальное давление водяного пара в плоскости 2, в момент времени $\tau+\Delta\tau$.

Определяя эту последнюю величину из предыдущего уравнения, получаем формулу для вычисления изменившегося парциального давления водяного пара в любой расчетной плоскости на основании предшествующих значений давления в этой же плоскости и двух соседних в более ранний момент времени:

$$e_{2,\tau+1}=e_{2,\tau}+\frac{\mu}{\xi_0\gamma}E_2\frac{\Delta\tau}{\Delta x^2}(e_{3,\tau}-2e_{2,\tau}+e_{1,\tau}). \qquad \text{(VI.33)}$$

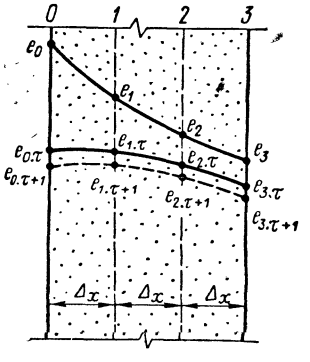


Рис. VI.18. Схема к расчету изменений парциальных давлений на границах слоев

Такое последовательное вычисление изменений во времени парциального давления во всех расчетных плоскостях ограждающей конструкции является основой для определения влагосодержания материала в любое время и особенно в характерные его сроки, совпадающие с окончанием зимнего, весеннего, летнего и осеннего периодов года.

Определение влагосодержания производится по изотерме сорбции материала, для чего предварительно вычисляется относительное парциальное давление φ в рассматриваемой плоскости.

Эта предварительная операция производится по формуле (VI.3), где насыщающее давление E, как указано было ранее, принимается по значению температуры в соответствующей расчетной плоскости конструкции.

Величина расчетного промежутка времени $\Delta\tau$ должна быть менее

$$\Delta\tau_{\text{макс}}\leqslant\frac{\Delta x^2}{2\frac{\mu}{\xi_0\gamma}E_n}. \qquad \text{(VI.34)}$$

Такое ограничение соответствует установлению стационарных условий диффузии водяного пара между расчетными плоскостями, расположенными через один номер (например, 1 и 3). Величина $\Delta\tau_{\text{макс}}$ определяется по плоскости, в которой величина насыщаю-

щего парциального давления близка к наибольшему значению (например, для зимних условий — плоскость 1).

При $\Delta\tau_{расч} > \tau_{макс}$, вычисляемые изменения парциальных давлений в расчетных плоскостях становятся беспорядочными, скачкообразными, а результаты расчета — неверными.

Если ограждающая конструкция является слоистой и состоит из различных материалов, величины $\Delta\tau_{макс}$ определяются для каждого материала и расчетный промежуток времени принимается применительно к минимальному из полученных значений $\Delta\tau_{макс}$.

Парциальные давления водяного пара на поверхности конструкции, обращенной в помещение (в расчетной плоскости 0), вычисляются по формуле:

$$e_{0,\tau+1} = \frac{R_{п.в} e_1 + R_{п\Delta} e_в}{R_{п.в} + R_{п\Delta}} \; мм\ рт.\ ст., \qquad (VI.35)$$

где $R_{п.в}$ — сопротивление влагообмену на этой поверхности, *мм рт. ст.·ч·м²/г* (см. VI.22); $R_{п\Delta} = \frac{\Delta x}{\mu}$ — сопротивление паропроницанию слоя 0—1, толщиной Δx, *мм рт. ст.·ч·м²/г*.

Величины парциальных давлений e_1 и $e_в$ берутся соответствующими предыдущему моменту времени τ.

Изменение парциальных давлений в плоскости n, граничащей с наружным воздухом, за промежуток времени $\Delta\tau$, вычисляется по формуле:

$$\Delta e_n = \frac{2\Delta\tau}{\Delta x \gamma \xi_0} E_n \left(\frac{e_{n-1} - e_n}{R_{n\Delta}} - \frac{e_n - e_н}{R_{пн}} \right) мм\ рт.\ ст. \qquad (VI.36)$$

где E_n — насыщающее парциальное давление в этой плоскости; $R_{п.н}$ — сопротивление влагообмену на наружной поверхности; $R_{n\Delta} = \frac{\Delta x}{\mu}$ — сопротивление паропроницанию слоя толщиной Δx, прилегающего к этой поверхности; $e_н$ — парциальное давление в наружном воздухе.

Если при последовательном вычислении парциальных давлений в плоскости вероятной конденсации будет получена величина $e \geqslant E$, соответствующая температуре в этой плоскости, это будет свидетельствовать о возникновении конденсации водяного пара. Тогда в дальнейших расчетных операциях в этой плоскости принимается $e = E$, а влагосодержание материала вычисляется как максимальное сорбционное (при $\varphi = 100\%$) с добавкой количества конденсирующейся влаги.

Конденсирующаяся влага будет перемещаться от плоскости конденсации в толщу прилегающего материала; метод расчета таких перемещений с использованием величин коэффициентов влагопроводности (формула VI.18) возможен, но значительно усложняет расчет.

Возникновение конденсации влаги внутри рассматриваемого ограждения до окончания холодного периода года показывает, что у его поверхности, граничащей с отапливаемым помещением, требуется устройство влагоизоляционного слоя.

§ 8. ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЧАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ И КЛИМАТА

Изложенные выше методы расчета влажностного состояния ограждающих конструкций при диффузии водяного пара относятся к конструкциям, эксплуатируемым уже в течение нескольких лет, в результате чего влагосодержание материала приблизилось к сорбционному.

Для многих ограждающих конструкций такая сравнительная стабилизация влажностного состояния наступает только после того, как завершается основная часть процесса естественной сушки, связанная с испарением избыточного количества начальной технологической влаги.

Наибольшая эффективность естественной сушки отмечается в теплое время года, когда температура наружного и внутреннего воздуха незначительно отличается друг от друга, в связи с чем можно считать, что процесс высыхания конструкции и перемещения влаги в ней происходит при постоянной температуре (в изотермических условиях). Для этих условий справедливо уравнение влагопроводности (I.9 и VI.19).

Из уравнения (I.9) методами теории подобия может быть установлен безразмерный критерий Фурье F_0', характеризующий сравнимые условия перемещений влаги.

Отбросив знаки дифференцирования, получим в левой части уравнения ω/τ, а в правой $-\frac{D\omega}{x^2}$. Разделив обе части на ω/τ, приведем левую часть к единичному значению, а правую к безразмерному комплексу $\frac{D\tau}{x^2}$. Положив этот комплекс $F_0'=1$ и определив время τ, необходимое для завершения процесса перемещений влаги (т. е. естественной сушки), получим:

$$\tau=\frac{1}{D}x^2\rightleftarrows ab^2 \text{ сут.} \qquad \text{(VI.37)}$$

Здесь $1/D=a$ — *сутки/см*^{2}, величина обратная среднему значению коэффициента нестационарной влагопроводности за весь рассматриваемый период естественной сушки; $x\rightarrow b$ — характерный размер конструкции, *см*, равный наибольшему расстоянию, на которое необходимо переместиться влаге внутри конструкции для того, чтобы достигнуть поверхности испарения (см. рис. VI.1).

Таким образом, из уравнения влагопроводности вытекает пропорциональность между длительностью сушки и квадратом характерного размера конструкции; коэффициентом пропорциональности является величина, обратная коэффициенту нестационарной влагопроводности *.

---

* Длительность процесса естественной сушки, вычисленная из элементарного выражения (VI.37), может быть только очень приближенной, поскольку затруднительно полностью учесть характер распределения влаги по толщине конструк-

Распределение влаги по толщине однородной высыхающей конструкции в течение преобладающего времени сушки неравномерно: в поверхностных слоях, непосредственно соприкасающихся с воздушной средой, влагосодержание мало, в средней части — более высоко (рис. VI.19). При значительной толщине однородных стен влажностное состояние материала в средних слоях конструкции изменяется медленно и в сравнительно незначительных пределах. Основная часть однородной массивной стены сохраняет в определенный период года относительное постоянство влагосодержания на уровне, отвечающем средним микроклиматическим условиям (внешним и внутренним), особенностям эксплуатации здания и физико-техническим свойствам материала, из которого выполнена конструкция.

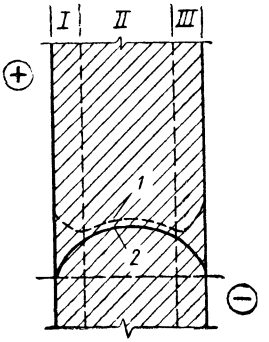


Рис. VI.19. Характерное распределение влагосодержания материала в массивной однородной стене:

1 — при увлажнении; *2* — при высыхании; I — внутренний слой резких колебаний влагосодержания; II — средняя часть стены с малоизменяющимся влагосодержанием; III — наружный слой резких колебаний влагосодержания

Колебания температуры и влажности, происходящие в наружной и внутренней воздушной среде, в наибольшей мере затухают во внешних слоях массивной ограждающей конструкции. С этим связано изменение физического состояния этих слоев конструкции: нагревание и охлаждение, высыхание и увлажнение.

Толщина поверхностных слоев ограждающей конструкции, в которых происходят резкие колебания влагосодержания в отдельные периоды года, зависит от свойств материалов и длительности периодов изменения внешних воздействий и может быть существенно различной. В известной мере толщина этих слоев конструкции близка к толщине слоя резких температурных колебаний, рассматриваемого в теории теплоустойчивости.

При закономерных изменениях температуры в течение суток, что характерно, например, для теплого и переходного периодов года, толщина этого слоя резких колебаний составляет около 8—9 *см* для кирпичной кладки и около 10—11 *см* для конструкций из

ции, колебания наружной температуры и влажности и другие существенные особенности естественного процесса обезвоживания. Кроме того, в это выражение не входит начальное влагосодержание материала; в зависимости от его различных значений будет иметь место некоторое различие стадий и длительности сушки, что может быть учтено в формуле (VI.37) только изменением величины a.

плотного бетона. В связи с периодическим прогревом и интенсивным обезвоживанием внешних слоев указанной толщины, их влагосодержание обычно характеризуется воздушно-сухим состоянием, тогда как влагосодержание средней части конструкции может быть более высоким.

Значения коэффициента нестационарной влагопроводности в выражении (VI.37) должны соответствовать среднему влагосодержанию материала глубинных слоев конструкции за период сушки.

Результаты имеющихся экспериментов позволяют установить порядок таких средних величин коэффициентов влагопроводности.

Имеются экспериментально установленные средние величины влагопроводности, соответствующие эффективным условиям естественной сушки ($t=+30°$; $\varphi=50\%$) *; при менее благоприятных температурно-влажностных параметрах неизбежно уменьшение констант влагопроводности и соответствующее увеличение длительности процесса высыхания. Так, например, по отечественным и зарубежным практическим данным* увеличение длительности сушки при $t=+15°$ и $\varphi=70\%$ происходит примерно в 2—3 раза, по сравнению с условиями упомянутых выше экспериментов.

Эти величины использованы при составлении табл. VI.4, в которой указаны значения сопротивлений высыханию, обратные коэффициенту нестационарной влагопроводности.

Таблица VI.4

Значения сопротивлений высыханию ($a=\frac{1}{D}$) для некоторых материалов

Материал и средняя его влажность, при которой замедляется естественная сушка, $\omega_{кр}$	Величины, обратные коэффициенту влагопроводности (*сут/см²*) в условиях сушки при	
	$t=+30°$; $\varphi=50\%$	$t=+15°$; $\varphi=70\%$
	1	2
Кирпич обожженный ($\omega_{кр}=3\%$ и менее) . . .	0,4	0,8
Силикатный кирпич ($\omega_{кр}=4\%$)	0,5	1,2
Шлакобетон ($\omega_{кр}=15\%$ и менее)	1,25	2,5
Известково-песчаный раствор ($\omega_{кр}=3\%$ и менее)	0,25	0,75

Величины сопротивления высыханию, указанные в первой графе таблицы, могут быть приняты для ориентировочных соображений о длительности естественной сушки в сухих и теплых климатических районах при облучении конструкций солнцем; указанные во второй — во влажных районах, при ограниченной солнечной радиации.

* По данным Н. И. Кравчени.

** Р. Кадьерг. Изоляция и предохранение зданий. М., Госстройиздат, 1957.

Так, например, подставляя эти величины в формулу (VI.37) и определяя сравнительную ориентировочную длительность сушки стен толщиной 50 *см*, выполненных из различных материалов, получим:

1. Длительность сушки стены из обожженного кирпича . . . . . от $0{,}4 \cdot 25^2 = 250$ сут. до 500 сут., т. е. менее 2 лет
2. То же, для стены из силикатного кирпича от $0{,}5 \cdot 25^2 = 312$ сут. до 750 сут., т. е. около 2 лет
3. То же, для стены из шлакобетона . . . . . от $1{,}25 \cdot 25^2 = 780$ сут. до 1560 сут., т. е. более 4 лет

Чем длительнее процесс естественной сушки, тем больше вероятность хронического засырения стен; такая вероятность наиболее велика для стен, выполненных из шлакобетона и золобетона. В тех случаях, когда длительность основной части процесса естественной сушки, установленная расчетом по формуле (VI.37), превышает 2 года, целесообразно в процессе проектирования уменьшить вероятность засырения стен путем применения пустотных изделий, дополнительного утепления и уменьшения толщины конструкции, введения осушающих воздушных прослоек.

Наиболее длительные сроки естественной сушки характерны для трехслойных ограждающих конструкций, в которых внешние слои выполнены из плотных материалов, например, железобетонных панелей или других малопроницаемых элементов, а внутренний слой, осуществленный из ячеистых бетонов или других материалов с высоким начальным влагосодержанием, изолирован от воздушной среды этими плотными внешними слоями. Толщина их невелика и обычно меньше толщины слоя резких температурных колебаний; быстро устанавливающееся равновесное влагосодержание этих внешних слоев, как правило, находится в пределах сорбционного, а в летний период года, когда следует ожидать наиболее интенсивной естественной сушки конструкции, — приближается к равновесному при 50% относительной влажности, или еще меньшей.

Перемещение избыточной влаги, содержащейся в ячеистом бетоне или другом материале с высоким влагосодержанием, ограничивается плотностью этих высохших внешних слоев, сопротивление которых влага может преодолевать только в парообразной фазе. В этих условиях удлинение периода естественной сушки трехслойной конструкции, по сравнению с однородной из ячеистого бетона, может быть установлено с учетом увеличения сопротивления паропроницанию внешних плотных слоев и возникновения сопротивления влагообмену на их поверхности, граничащей с ячеистым бетоном.

Суммарное сопротивление a_Σ трехслойной конструкции высыханию может быть принято:

$$a_\Sigma = a \frac{\Sigma R_\text{п}}{R_\text{п}},$$

а срок ее естественной сушки

$$\tau = a_{\Sigma} b^2, \qquad \text{(VI.37а)}$$

где $\frac{\Sigma R_{\text{п}}}{R_{\text{п}}} = \frac{b_1/\mu_1 + R_{\text{в.п}} + b_2/\mu_2}{b/\mu_1}$, $\Sigma R_{\text{п}}$ — сумма сопротивлений паропроницанию половины толщины трехслойной панели; $R_{\text{п}}$ — сопротивление паропроницанию половины толщины однородной панели из ячеистого бетона; b_1; b_2; b — толщины конструктивных слоев, указанные на рис. VI.20; μ_1; μ_2 — коэффициенты паропроницаемости ячеистого бетона и железобетона; $R_{\text{в.п}}$ — сопротивление влагообмену на поверхности обезвоженного плотного слоя, граничащего с ячеистым бетоном.

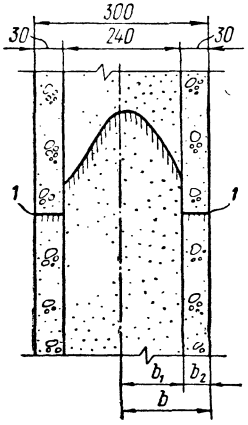


Рис. VI.20. Трехслойная панель из ячеистого бетона с внешними железобетонными слоями:

1 — распределение влагосодержания в ячеистом бетоне и внешних слоях

Так, например, срок естественной сушки панели из ячеистого бетона толщиной 30 *см* будет в соответствии с формулой (VI.37) $\tau_1 = ab^2 = 1{,}0 \cdot 15^2 = 225$ сут. *, т. е. 7,5 месяцев или около одного года, а для трехслойной панели такой же толщины:

при $\frac{\Sigma R_{\text{п}}}{R_{\text{п}}} = \frac{0{,}12/0{,}023 + 0{,}5 + 0{,}03/0{,}0024}{0{,}15/0{,}023} = 4{,}5$

$\tau_2 = 4{,}5 \cdot 15^2 = 1010$ сут., т. е. около 3 лет.

Здесь $\mu_1 = 0{,}023$ — коэффициент паропроницаемости пенобетона; $\mu_2 = \frac{\omega_{50}}{\omega_{80}} 0{,}004 = \frac{1{,}05}{1{,}75} 0{,}004 \approx 0{,}0024$ — коэффициент паропроницаемости высохшего железобетона; $R_{\text{в.п}} = 1 - \frac{50}{100} = 0{,}5$ — сопротивление влагообмену на поверхности высохшего железобетонного слоя.

Конечно, чем продолжительнее естественная сушка ограждающих конструкций, тем больше вероятность дополнительного их увлажнения конденсационной влагой и другими ее видами.

В связи с этим достижение конструкцией равновесного влагосодержания может отдаляться, поскольку вероятно чередование естественно протекающих процессов обезвоживания материала с его эпизодическими увлажнениями.

Высокое влагосодержание не характерно для тонких и пустотелых ограждающих конструкций, подвергшихся после монтажа высыханию в течение одного устойчивого летнего периода и не имеющих источников добавочного увлажнения (рис. VI.21, *а*). Если же окончание строительства и начало эксплуатации здания совпали с наступлением холодного периода года, то ограждения зданий в

---

* Здесь $a = 1{,}0$ *сут/см*^{2} для ячеисто-бетонных конструкций, эксплуатируемых в сухом теплом климате.

первое время могут не высыхать, а подвергаться дополнительному увлажнению, приобретая к началу теплого периода влагосодержание, превышающее начальное технологическое (рис. VI.21, *б*). Такое положение в особенности характерно для конструкций с односторонней сушкой (покрытий с многослойной рулонной кровлей,

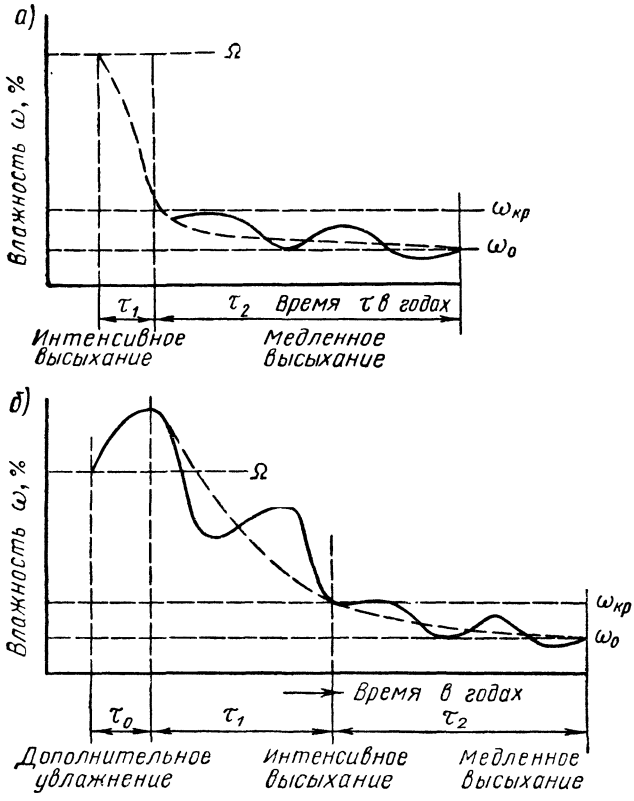


Рис. VI.21. Изменения влагосодержания ограждений с течением времени:

а — ограждения, начало эксплуатации которых совпадает с наступлением теплого периода года; *б* — ограждения, вводимые в эксплуатацию в начале холодного периода года; Ω — начальное влагосодержание; $\omega_{кр}$ — критическое влагосодержание; ω_0 — воздушно-сухое состояние (пунктирными линиями показана общая закономерность естественной сушки; сплошными — периодичность изменений влагосодержания)

стен подвалов и т. д.). В связи с этим период последующего высыхания ограждающих конструкций до среднего влагосодержания, при котором возникает замедление естественной сушки (критического) может и не закончиться в течение одного летнего периода. В этом случае материал конструкции в течение нескольких холодных периодов года будет иметь повышенное влагосодержание, что часто связано с возможностью постепенного разрушения.

Пользуясь методами расчета происходящих во времени изменений влажностного состояния ограждающих конструкций (например, методом последовательного увлажнения, кратко изложенным ранее), можно проследить особенности естественной сушки бесчердачных покрытий с рулонной кровлей. Процесс постепенного уменьшения влагосодержания перемежается периодическими и постепенно затухающими диффузионными увлажнениями покрытия в холодные периоды года.

На рис. VI.22 показаны последовательные изменения влагосо-

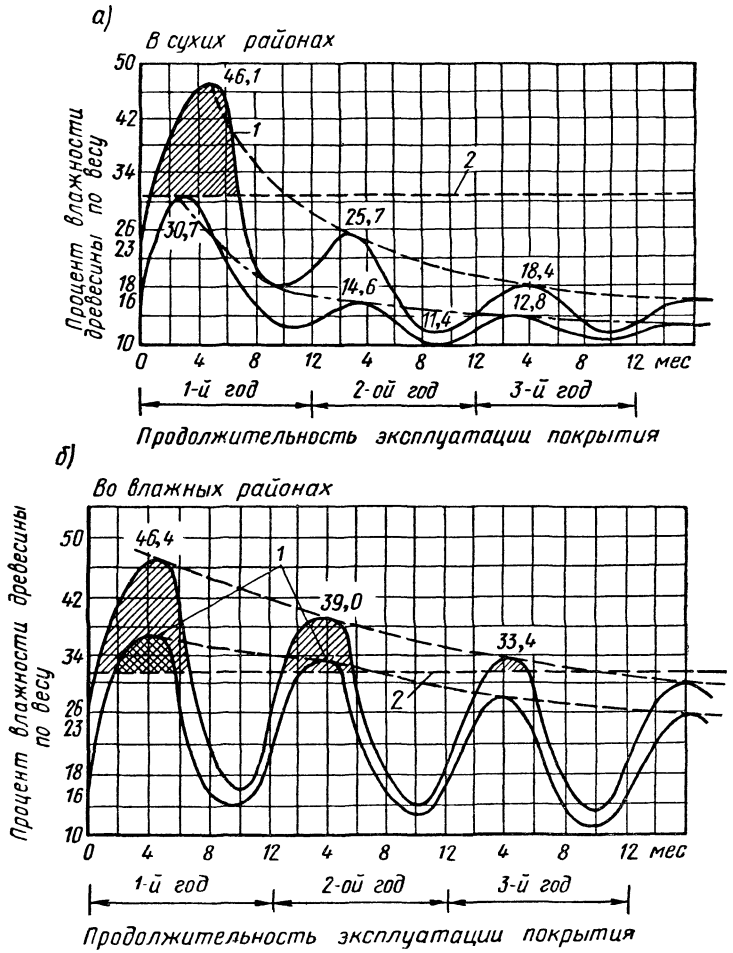


Рис. VI.22. Изменения влагосодержания подкровельного слоя деревянных покрытий с рулонной кровлей в климатических условиях сухих и влажных районов (по расчетным данным и исследованиям влагосодержания в натурных условиях (Саратов и Ленинград):

1 — конденсация влаги; *2* — предел сорбционного увлажнения; *а* — в сухих районах; *б* — во влажных районах

держания подкровельного слоя деревянных (сплошных) бесчердачных покрытий с рулонной кровлей над цехами холодной обработки металла в условиях сухих (рис. VI.22, *а*) и влажных (рис. VI.22, *б*) климатических районов.

Расчет изменений влажностного состояния покрытий приведен для наиболее невыгодного случая, т. е. учтено дополнительное увлажнение конструкций в связи с началом эксплуатации, совпадающим с наступлением холодного периода года.

Верхняя волнообразная кривая с наибольшими колебаниями значений выражает изменения влагосодержания в подкровельном слое защитного настила, выполненного из непросушенной древесины с влажностью 23% по весу.

Горизонтальная пунктирная линия соответствует верхнему пределу сорбционного увлажнения древесины (31,5% весовой влажности). Заштрихованные площади внутри волнообразных кривых, лежащие выше этой линии, указывают на конденсацию свободной жидкой влаги в древесине.

Нижняя кривая выражает изменения влагосодержания в подкровельном слое покрытия при начальной влажности древесины 16%.

Пунктирная кривая, проходящая через точки наибольших значений влагосодержания древесины, представляет общую закономерность уменьшения этих значений с течением времени.

Из рис. VI.22 видно, что среднегодовое значение влагосодержания покрытий не является стабильным. По мере естественной сушки конструкции оно стремится к устойчивому значению, соответствующему внутренним и наружным климатическим условиям. Периодом колебаний влажности является год. Колебания влагосодержания, вызываемые внешними температурно-влажностными воздействиями, совпадают с изменениями последних по длительности периода, хотя и следуют за ними с некоторым запозданием.

Эта закономерность изменений влажностного состояния покрытий подтверждается имеющимися натурными исследованиями.

Практика эксплуатации бесчердачных покрытий показывает, что их разрушения, проявляющиеся в поражении биологическими процессами, вспучиваниях и отслоениях кровельного рулонного ковра и т. д., имеют место главным образом в течение первых лет службы и преимущественно в тех конструкциях, которые были выполнены в осенне-зимний период.

Во влажных климатических районах процесс высыхания покрытий растягивается на несколько лет, в течение которых возможны указанные выше разрушения, тогда как в сухих районах опасной является только первая зима после возведения покрытия.

Покрытия с рулонной кровлей наиболее опасны по сравнению с другими видами ограждающих конструкций с точки зрения возможности переувлажнения диффундирующей из помещения парообразной влагой, если эти ограждения в целом или их утепляющий слой выполнены из недостаточно плотных материалов; они должны

быть предохранены от увлажнения необходимой пароизоляцией, расчет которой был указан выше.

Приведенные на предыдущих рисунках закономерности изменений влагосодержания бесчердачных деревянных покрытий могут быть с определенными коррективами распространены и на аналогичные однородные конструкции, выполненные из какого-либо другого материала.

При этом интенсивность сезонных ежегодных увлажнений будет зависеть от проницаемости материала и его влагоемкости, а сроки достижения равновесного влагосодержания — от внешних климатических условий и микроклимата ограждаемого помещения.

В отношении покрытий над отапливаемыми помещениями с нормальным влажностным режимом решающее значение для скорости естественной сушки имеет интенсивность солнечной радиации в рассматриваемой местности.

Радиационная естественная сушка наиболее эффективна и быстротечна; в северных районах с преобладанием облачной погоды, длительность процесса обезвоживания конструкции покрытия может распространяться на ряд лет, тогда как в местностях с солнечным летним климатом она резко сокращается.

ГЛАВА VII

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ЗДАНИЙ

§ 1. ПОНЯТИЕ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

С капитальностью зданий непосредственно связано представление о долговечности, т е. сроках службы, отдельных конструкций, от которых зависит и общий срок службы здания в целом. Под долговечностью следует понимать длительное время, в течение которого основные элементы конструкций оказывают сопротивление разрушающим внешним воздействиям, например, эксплуатационным нагрузкам, колебаниям температур, действию влаги или агрессивной среды и при наличии необходимого технического обслуживания (например, периодических осмотров и текущих ремонтов) сохраняют прочность, непроницаемость, теплозащитные качества и другие важные физико-технические свойства на уровне не ниже первоначальных, учтенных при проектировании.

Для характеристики неизменности эксплуатационных качеств зданий с течением времени большое значение имеет также длительность безремонтной службы конструкций в целом или их отдельных элементов; для многих отделочных и изоляционных слоев такая длительность часто совпадает с общим сроком службы, т. е. с понятием долговечности, поскольку при ремонте конструкций эти слои обычно заменяются новыми.

Срок службы здания в целом зависит от долговечности его основных конструкций, т. е. фундаментов, несущих стен или каркаса. Если эти основные конструкции разрушились, то перестает существовать и все здание; в отдельных случаях можно обсуждать вопрос о его полном восстановлении или перестройке.

Другие конструктивные элементы, особенно объединяемые понятием ограждающих конструкций (т. е. заполнение каркаса, кровля, полы, оконные переплеты и т. д.), могут обладать меньшей долговечностью; в этом случае они по мере износа (т. е. прогрессирующего постепенного разрушения) заменяются при капитальных ремонтах здания, что может происходить несколько раз в течение его общего периода службы. При правильно организованной технической эксплуатации здания долговечность его ограждающих конструкций повышает-

с я (своевременно проводимые осмотры, текущие ремонты и т. д.) *.

Наиболее короткие сроки службы характерны для защитно-отделочных слоев, предохраняющих конструкции здания от постепенного разрушения (влагоизоляционные и фактурные слои, наружная отделка, окраска и т. д.), а также для кровель зданий и других конструктивных элементов, непосредственно подвергающихся климатическим воздействиям. Одной из существенных задач, представляющих значительный экономический интерес для современного массового строительства, является всемерное сохранение и продление сроков службы этих защищающих здания и относительно быстро разрушающихся элементов.

Увеличение долговечности ограждающих конструкций и улучшение их эксплуатационных качеств могут быть достигнуты в процессе проектирования целесообразным применением строительных материалов с учетом их физико-технических свойств, а также рациональным решением конструкций в целом, и, в частности, защитно-отделочных слоев, ограничивающих проникание агрессивных воздействий внутрь конструкции.

Опыт строительства и эксплуатации зданий, а также натурные и лабораторные исследования их конструкций показывают, что как процессы первоначального упрочнения материалов (т. е. твердение бетонов, строительных растворов и т. д.), связанные с повышением (улучшением) физико-механических свойств, так и процессы последующего постепенного разрушения материалов и конструкций, проявляющиеся в понижении (ухудшении) этих свойств, зависят от колебаний температуры и воздействий влаги. Различная направленность изменяющих структуру процессов, от которой зависит постепенное упрочнение или постепенное разрушение материала, иногда наблюдается при аналогичных климатических воздействиях, но более мягких в первом случае и более жестких — во втором.

Опытные данные о постепенных изменениях структурно-механических свойств материалов в ограждающих конструкциях получили обоснованную теоретическую базу в работах крупных советских ученых: А. Ф. Иоффе и П. А. Ребиндера, развивших на основе своих исследований представления о роли физико-химических процессов в изменении структурно-механических свойств материалов. Прочность и стойкость изделий (особенно безобжиговых), изготовленных в заводских условиях, может возрастать в процессе эксплуатации здания, если под влиянием климатических условий обеспечивается циклическая смена температурно-влажностных состояний материа-

---

* При широкой возможности проведения ремонтов, совершенствования инженерного и санитарно-технического оборудования и вообще улучшений и целесообразных внутренних переустройств в зданиях, имеющих ценность для внешнего облика населенных мест, длительный срок службы этих зданий определяется не условными экономическими предположениями или наперед заданными сроками моральной амортизации, а главным образом процессом физического износа их основных конструкций, подвергающихся наиболее интенсивным внешним воздействиям, т. е. отдельных элементов несущего каркаса, внешней части несущих стен, крыши и т. д.

ла, способствующих улучшению его структурно-механических свойств.

В этом случае постепенные разрушающие процессы возникают и развиваются после завершения упрочняющих или одновременно с ними, что проявляется, например, в местных повышениях прочности материала и возникновении трещин в наиболее напряженных зонах конструкции.

Постепенное развитие изменений структуры является характерным для физического состояния материала при периодических воздействиях, энергетический уровень которых не вызывает предельно напряженного состояния, приводящего к немедленному разрушению.

По П. А. Ребиндеру [72] постепенное разрушение материала в дефектных местах и зародышах трещин облегчается при адсорбции на вновь возникающих поверхностях первых слоев молекул из окружающей среды (обычно молекул влаги). Энергетический уровень адсорбционных сил, под действием которых образуется такой слой, настолько высок, что приводит к существенному понижению работы, необходимой для образования новых поверхностей внутри постепенно разрушающейся конструкции.

При ограниченной прочности материала и относительно больших полостях (трещинах) внутри него, заполняемых свободной влагой или при низкой температуре ее кристаллами, в зоне зародышей разрушения возникают расклинивающие давления, способствующие дальнейшему раскрытию трещин.

Такие же или еще большие давления возникают при кристаллизации новых химических веществ на стенках каверн, пор и капилляров материала.

Соответственно возрастает и разрушение материала при периодических увлажнениях и охлаждениях, сменяющихся повышениями температуры и испарением влаги (рис. VII.1). Развитие разрушения приводит к перемещению контура (O, O, O) расширяющихся в толще материала трещин, линз и полостей по направлению к поверхностным слоям конструкции и к появлению внешних признаков ее разрушения. Обычно наибольшему разрушению подвергаются те участки, в которых область развития микротрещин легче всего достигает поверхности конструкции или изделия (рис. VII.1, *б*), например, углы, кромки, выступающие части и т. д.

Вдали от этих участков процесс разрушения увлажненного материала часто выражается в постепенном отслаивании (шелушении) поверхностных слоев.

Материалы с открытой пористостью наиболее подвержены физико-химическому разрушению и особенно быстро утрачивают необходимые механические свойства во влажных условиях.

Повышение долговечности во всех случаях связано с ограничением и замедлением физико-химико-механических процессов, вызывающих постепенное разрушение материалов, входящих в состав ограждающих конструкций. Если отсутствует агрессивная среда, при которой процессы разрушения являются следствием быстро

развивающихся химических реакций, такие процессы зависят главным образом от тех внешних воздействий, которые вызывают резкие периодические изменения теплового и влажностного состояния наружных ограждающих конструкций, что связано с развитием термических и усадочных напряжений, превышающих по своему уровню напряжения, учитываемые расчетом статической прочности конструкции. Мерой интенсивности термических и усадочных напряжений являются градиенты температуры и влагосодержания,

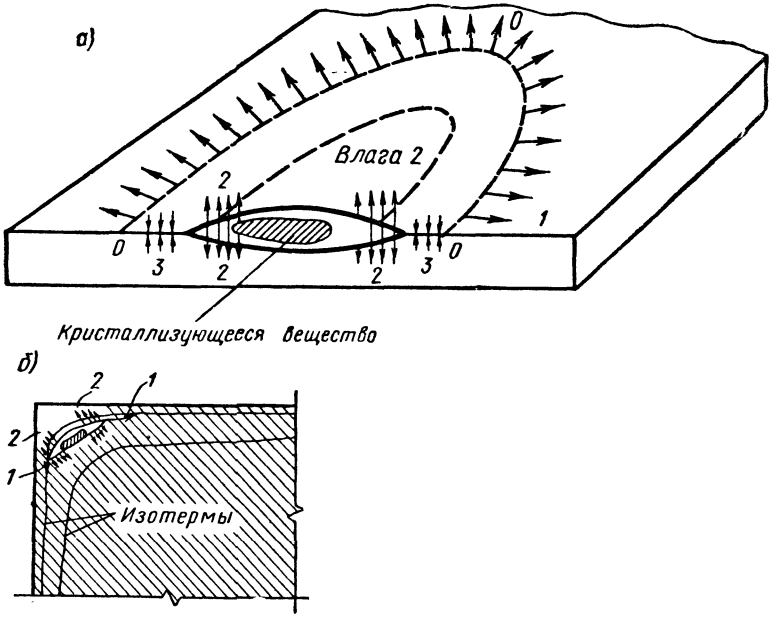


Рис. VII.1. Схемы развития трещин, линз, полостей внутри материала:

а — в поверхностных слоях ограждающей конструкции; *б* — в углах изделия; *1* — давление, вызванное увеличением объема кристаллизующегося вещества; *2* — расклинивающее давление адсорбирующихся молекул влаги; *3* — силы молекулярного сцепления

характеризующие неравномерность температурного и влажностного состояния конструкции.

Относительно быстрый выход из строя ограждающих конструкций из-за развития сетки трещин и утраты необходимых прочностных свойств обычно отмечается в тех случаях, когда напряжения, вызываемые неоднородностью полей температуры и влагосодержания или другими разрушающими факторами, превосходят предел длительного сопротивления («выносливости») данной конструкции; эти случаи, в частности, типичны для большеразмерных конструкций из материалов с ограниченной стойкостью при периодически возникающих интенсивных разрушающих воздействиях (например, в зданиях с явно выраженным нагревом конструкции выделениями производственного тепла).

В этих случаях вероятность быстрой потери структурно-механических качеств конструкцией может быть оценена по величине безразмерных комплексов, характеризующих условия ее работы при имеющихся разрушающих воздействиях. Так, например, характеристикой вероятности и быстроты образования недопустимой сетки глубоких трещин при периодически возникающих напряжениях в материале конструкции (при ее нагреве и остывании или увлажнении и высыхании) может служить комплекс $\left(\frac{\sigma\Delta\alpha_\tau L}{E}n\right)$, где Δ — градиент температуры или влажности по толщине конструкции (*град/см* при %/*см*); α_τ — коэффициент линейного расширения (*1/град*) или набухания и усадки (1/%); L — характерный размер конструкции, *см*; σ — напряжение материала на сдвиг или растяжение при единичном градиенте (температуры или влажности) по его толщине ($кГ/см^2$); E — модуль упругости ($кГ/см^2$). Срок службы конструкции может быть пропорционален комплексу $\frac{\sigma\Delta\alpha_\tau L}{E}n$, где n — число периодических циклов воздействий в единицу времени (1/год). Коэффициент пропорциональности и его изменения зависят от свойств материала и конструкции. Для конкретных конструктивных или отделочных слоев могут быть установлены из опыта эксплуатации или путем специальных исследований критические величины таких комплексов, соответствующие необходимому сроку службы конструкции.

Мерой интенсивности постепенного разрушения или, иначе говоря, износа конструкции может служить не только постепенная утрата прочности, т. е. $И_{зн}=\frac{\sigma_{тр}-\sigma_ф}{\sigma_{тр}}100(\%)$ ($\sigma_{тр}$ и $\sigma_ф$ — требуемая и фактическая прочность, но и некоторые другие показатели).

Для ограждающих конструкций и их элементов, обеспечивающих изоляцию здания от действия атмосферной влаги, ветра и других неблагоприятных внешних влияний, срок полноценной службы истекает с появлением неплотностей, трещин и расслоений, которые не могут быть устранены простыми средствами при текущем ремонте. Таковы, например, участки примыкания кровли к разжелобкам, водостокам и стенам, наружные отделочные слои и стыки панелей, гидроизоляционные слои в стенах и т. д. Для этих элементов ограждающих конструкций мерой износа является утрата непроницаемости $И_{зн}=\frac{R^п_{тр}-R^п_ф}{R^п_{тр}}100(\%)$, где $R^п_{тр}$ и $R^п_ф$ — требуемое и фактическое сопротивления проницанию влаги или иного вещества. Общий срок службы этих элементов, т. е. их долговечность, соответствует длительности безремонтной службы конструкции в целом, т. е. кровель, соответствующих участков наружных стен и т. п.

Во всех случаях практической мерой износа, вызванного постепенными разрушающими процессами, может служить утрата стоимости конструкции $И_{зн}=[(P_{нач}-P_ф)/P_{нач}]100\ (\%)$, где $P_{нач}$ и $P_ф$ — начальная и фактическая стоимости конструкции.

Однако при изучении долговечности подавляющего большинства конструкций в качестве основного показателя износа принимают постепенную утрату тех видов прочности, которые наиболее характеризуют изменения во времени структурно-механических свойств материала или изделия.

Изменение структурно-механических свойств материала во времени целесообразно изучать по меняющимся значениям прочности при растяжении или при сдвигающих усилиях. По этому пути развивается значительное количество исследований стойкости во времени строительных материалов.

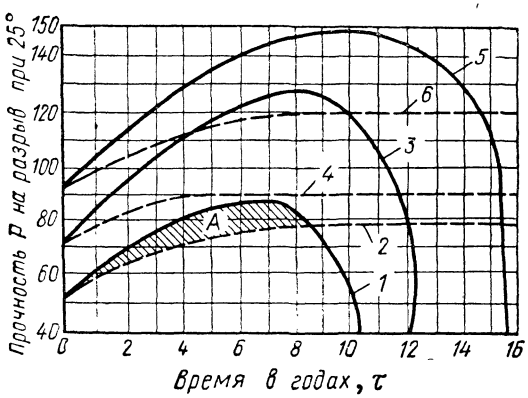


Рис. VII.2. Изменение прочности на разрыв рулонных кровельных материалов с течением времени:

1 — рубероид легкого веса в наружных условиях; *2* — то же, но в отапливаемом помещении; *3* — рубероид среднего веса в наружных условиях; *4* — то же, но в отапливаемом помещении; *5* — рубероид тяжелого веса в наружных условиях; *6* — то же, но в отапливаемом помещении

На рис. VII.2 приведены закономерности изменения прочности на разрыв рулонных кровельных материалов с течением времени [87].

Сплошными линиями показаны изменения прочности образцов кровельных материалов, подвергавшихся относительно мягким атмосферным воздействиям в течение многих лет, а пунктирными — изменения прочности образцов тех же материалов, хранившихся в отапливаемом помещении. Из рисунка видно, что срок службы рулонных материалов, изготовленных из пропитанного картона с покровным битумным слоем, защищенным минеральной посыпкой, измеряется 10—15 годами в зависимости от толщины и веса материала.

Для многих материалов, подвергающихся мягким атмосферным воздействиям, характерны постепенное нарастание прочности, часто опережающее прирост прочности материала, хранимого при неизменной температуре в отапливаемом помещении, а затем ее относительно быстрое падение ниже первоначальной.

Заштрихованная нами на рис. VII.2 площадь A, ограниченная сверху кривой изменения прочности рубериода легкого веса, а снизу пунктирной линией, выражающей изменения прочности того же материала, но хранившегося в помещении, пропорциональна осуществившейся работе атмосферных воздействий, затраченной на постепенное изменение прочности и последующее разрушение материала. Величина этой площади имеет размерность $кГ \cdot год/см^2$.

Вся работа внешних воздействий, затраченная на изменение прочности материала и постепенное его разрушение, может быть представлена в виде

$$A=\kappa_1\kappa_2\kappa_3\int_0^{\tau}(P_\tau-P_0)\,d\tau \quad кГ\cdot год/см^2, \tag{VII.1}$$

где κ_1; κ_2; κ_3 — коэффициенты пропорциональности, зависящие от характера разрушения, природы материала и его толщины, а также от интенсивности воздействий; P_τ и P_0 — прочности материала (на сдвиг или растяжение) в рассматриваемый момент времени и начальная прочность; τ — время.

Можно полагать, что длительность срока службы τ ограждающей конструкции или отдельного слоя зависит от осредненной интенсивности воздействий внешней среды $И$; тогда результативную величину этой зависимости можно представить в виде

$$\tau=A/И \text{ лет или } И=A/\tau \quad кГ/см^2. \tag{VII.2}$$

Очевидно $И$ представляет осредненное количество разрушающей материал энергии, воспринятое из внешней среды поверхностью наружного конструктивного слоя в течение всего периода службы конструкции и отнесенное к 1 $см^2$ поперечного сечения этого слоя.

Особенности энергетических влияний внешней среды чаще всего связаны с периодическими колебаниями температуры и соответствующими изменениями влажности и интенсивности агрессивных воздействий. Зависящие от изменений относительной влажности и величин пересыщений, процессы конденсации, адсорбции, диффузии, растворимости и кристаллизации также приобретают закономерный циклический характер.

При периодических воздействиях на ограждающую конструкцию осредненная интенсивность И может быть заменена числом циклов воздействия Σn за каждый год службы конструкции.

Если принять, что после завершения процессов упрочнения каждый цикл обладает одинаковым (средним) разрушающим действием ΔP, $кГ/см^2$, то длительность срока службы τ может быть выражена как:

$$\tau=A/(\Sigma n\Delta P) \text{ лет или } \Sigma n\Delta P=A/\tau \quad кГ/см^2{}^*. \tag{VII.2а}$$

Процесс упрочнения (уплотнения) характеризуется скоростью повышения прочности (непроницаемости) $dP/(d\tau)$ и периодом времени $\tau_{нач}$, в течение которого происходит улучшение физико-

* Число циклов условных воздействий, моделирующих общую длительность службы конструкции, может быть выражено из (VII.2а) как $\Sigma n_\tau=\dfrac{A}{\Delta P}$ или, если считать, что процессы разрушения происходят только в упругой стадии [82], $\Sigma n_\tau=\dfrac{E}{\Delta\beta}$, где E — модуль Юнга, а $\Delta\beta$ — его уменьшение после каждого цикла воздействий.

механических свойств. По истечении этого периода времени начинается постепенное разрушение материала и величина $dP/(d\tau)$ приобретает отрицательный знак.

Период постепенного разрушения может иметь различную длительность $(\tau - \tau_{нач})$ в зависимости от количества внутренней энергии конструкции, противостоящего разрушению и характеризующегося эффектом предшествующего упрочнения, стойкостью материала, а также толщиной и проницаемостью конструктивного слоя.

Стойкость представляет величину, обратную скорости разрушения, и может быть, в соответствии с представлениями о сопротивлении неразрушенной структуры * твердого тела, выражена следующим образом:

$$Ст = \frac{И}{dP/(d\tau)} = \frac{\Sigma n \Delta P}{dP/(d\tau)} \text{ (год)}.$$

Интенсивность $И$ воздействий наружной среды весьма различна и сопоставление этих различий в единой энергетической шкале представляет определенные трудности. В связи с этим, при экспериментальном изучении изменений прочности материалов во времени (при замораживании, увлажнении, нагреве и т. д.) могут быть введены условные стандартные характеристики интенсивности, соответствующие наиболее типичным видам постепенного разрушения.

Для каждого из этих видов своя особая характеристика интенсивности может быть принята за единицу (один цикл), а выражение для стойкости написано в виде: $Ст = \frac{1}{dP/(d\tau)}$ (год $\cdot см^2/кГ$).

В этом случае, в соответствии с особенностями внешних воздействий и в целях практически приемлемой оценки различных структурно-механических свойств материалов, возникает представление о нескольких видах и степенях стойкости.

Все виды стойкости гидрофильных строительных материалов, применяемых для наружных ограждений зданий, связаны с нестационарными воздействиями температуры и влаги.

Отдельно рассматриваемый вид стойкости материалов при периодических колебаниях температуры (нагрев и остывание) имеет доминирующее значение для материалов, находящихся в сухом состоянии. Воздействия колебаний температур на увлажненные материалы более разрушительны и устанавливаются совместо с другими видами стойкости, связанными с воздействиями влаги.

Стойкость против последовательных увлажнений и высыханий, при колебаниях положительной температуры, называют влагостойкостью, а стойкость насыщенного влагой материала, при колебаниях переходящих через точку замерзания, — морозостойкостью.

Стойкость против воздействий влаги, содержащей растворенные агрессивные вещества, во многих случаях известна под названием стойкости против коррозии.

---

* По Бингаму — вязкость неразрушенной структуры.

При оценке срока службы конструкции число циклов воздействий, воспринимаемых последней, устанавливается в соответствии с имеющимися условиями наружного климата и микроклимата ограждаемого помещения.

Как это видно из предыдущего изложения, одно из основных направлений в изучении долговечности базируется на экспериментальных исследованиях, причем реальное длительное время службы конструкции, выполненной из какого-либо конкретного материала, моделируется числом циклов колебаний теплового или влажностного состояния; каждый из этих циклов приравнивается промежутку времени, изменяющемуся в зависимости от особенностей интенсивности реальных внешних воздействий.

В проведении таких исследований много условностей, связанных с несовершенством методики лабораторных экспериментов, производимых обычно на небольших образцах материалов; кроме того, выполнение подобных экспериментов длительно и трудоемко.

В связи с этим возникают другие направления в изучении проблем долговечности. В частности, одно из них основывается на том, что прочность любых реальных твердых тел, в том числе и строительных материалов, зависит от времени действия нагрузки, уменьшаясь с его увеличением. Реальные процессы разрушения связаны с приложением циклически возникающих (длительных) усилий, вызывающих напряжения растяжения или сдвига в наиболее слабых участках структуры материала.

Уменьшение прочности при длительном пребывании материала под растягивающей его нагрузкой объясняется постепенным развитием дефектов в трещинах разрыва. Такое развитие связано с изменениями значений внутренней потенциальной энергии материала, вместе с которыми изменяются и его структурно-механические свойства. Постепенные процессы разрушения выражаются последовательностью постепенных переходов материала из одних состояний с более высоким уровнем внутренней энергии в другие, имеющие меньший ее уровень.

В основе незаметно для человеческого глаза происходящих изменений структуры материала лежит квантовая природа материи и квантовые процессы, подчиняющиеся физико-статистическим закономерностям. Можно считать, что математическая интерпретация этих закономерностей идет от волновой функции [78] и имеет экспоненциальный характер.

В самой общей форме, при наличии термической активации развития трещин, время τ, необходимое для постепенного падения структурно-механических свойств материала вплоть до недопустимого предела, может быть установлено на основе зависимости:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{u}{kT}} = \tau_0 e^{\frac{u_0 - \gamma\sigma}{kT}}, \qquad \text{(VII.3)}$$

где τ_0 — постоянное, ничтожно малое время, численно близкое к периоду колебаний атомов в структурной решетке материала; e — основание натуральных логарифмов; u — энергетический уровень,

который необходимо преодолеть внешним воздействиям для того, чтобы вызвать структурные изменения в опасной зоне конструкции. Этот энергетический уровень, при развитии процессов постепенного разрушения: $u=u_0-\gamma\sigma$, где u_0 — энергия, необходимая для возникновения (активации) процесса изменения структурных свойств материала в отсутствии внешних усилий, вызывающих напряжения*; γ — коэффициент, зависящий от природы и структурных свойств материала; σ — напряжение на сдвиг или растяжение; $\kappa=R/N_0$ — постоянная Больцмана (отношение универсальной газовой постоянной R к числу молекул N_0 в 1 *г/мол.* вещества); T — температура в шкале Кельвина.

Поскольку период колебаний атомов τ_0 в структурной решетке материала зависит от величины заряда атомного ядра, время, необходимое для изменения структурных качеств, оказывается закономерно связанным с основными физико-химическими свойствами материала, его плотностью, строением электронных оболочек атомов и с периодическим законом Д. И. Менделеева.

Величина u_0 зависит от степени совершенства структурно-механических свойств рассматриваемого материала и в пределе может приближаться к энергии связи атомов в кристаллической решетке идеального материала (по абсолютной величине, близкой к энергии сублимации, но обратной ей по знаку). Для бетона эта величина в некоторой недостаточной мере связана с маркой бетона (т. е. с весьма грубыми градациями одного из видов прочности материала, применяемыми в практике строительства), но явным образом зависит также от особенностей процесса кристаллизации в бетоне, характера пористости и активности сцепления цементного раствора с поверхностью песка и крупного заполнителя. При преобладании мелких кристаллических образований, закрытой пористости и химическом сродстве между вяжущим и заполнителем (или активировании поверхности последнего, обеспечивающем повышение сцепления) значение u_0 возрастает. Структурный коэффициент γ резким образом изменяется с возрастом бетона, уменьшаясь в два и более раза по мере упрочнения материала.

В основе кинетической теории изменений прочности, выражаемой уравнением (VII.3) и устанавливающей зависимость процессов изменения структурных свойств материала от величины напряжений и времени, лежат физические представления о возможности возникновения упрочняющих процессов, связанных с зарождением новых центров кристаллизации и развитием кристаллической структуры и о постепенном разрушении, проявляющемся в росте трещин, происходящем путем последовательного разрыва межчастичных (молекулярных или атомных) связей. Эти упрочняющие и разру-

---

* В соответствии с представлениями академика П. А. Ребиндера, эта величина при развитии процессов постепенного упрочнения материала: $v_0=f\left(\frac{\Delta\mu_0}{V'}\right)$, где $\Delta\mu_0$ — разность химических потенциалов, приведенная к одной молекуле вещества и отнесенная к ее единичному объему V_1'.

шающие процессы развиваются при определенных энергетических условиях, связанных с конкретными температурно-влажностными воздействиями внешней среды.

Исследование долговечности конструктивных элементов на основе использования уравнения (VII.3) только начинает развиваться. При этом основной элемент исследования заключается в том, что сравнимые образцы конкретного материала подвергаются серии силовых воздействий с градациями различной интенсивности, в целях возникновения напряжений (на растяжение или сдвиг), при которых разрушение образцов происходит через различные интервалы времени.

На основе таких экспериментов определяются количество энергии u_0, необходимой для возникновения процессов разрушения и значения структурных коэффициентов γ, т. е. неизвестные величины, входящие в уравнение (VII.3).

Тем самым устанавливается конкретная зависимость между напряжениями, возникающими в материале, и сроками его службы до возможного предела разрушения.

Далее, на основе анализа внешних физико-климатических воздействий, которым будет подвергаться изучаемая ограждающая конструкция, конкретизируются значения напряжений (например, от неравномерного распределения температур и влагосодержания, ветровых и других механических нагрузок и т. п.).

Независящие друг от друга разрушительные эффекты, возникающие при найденных напряжениях, суммируются друг с другом.

Результативная долговечность τ при комплексном действии различных напряжений, возникающих от внешних физических и механических воздействий, определяется на основе зависимости:

$$1/(\tau_\Sigma) = 1/\tau_1 + 1/\tau_2 + \ldots + 1/\tau_n = \sum_{i=1}^{n} 1/\tau_i. \qquad \text{(VII.4)}$$

Как видно из этой последовательности отдельных этапов изучения, использование в практических целях уравнения (VII.3) связано с необходимостью проведения специальных экспериментов.

Исследования, проведенные в целях изучения долговечности наружных отделочных (фактурных) слоев крупных панелей [88] показали, что в климатических условиях г. Перми сроки службы фактуры из мелкозернистых бетонов на карбонатных песках примерно вдвое более длительны по сравнению со сроками службы таких же бетонов, но на кварцевых песках.

Развитие сетки силовых трещин на поверхности наружной фактуры с карбонатным заполнителем происходит более медленно и в количественном отношении менее выражено, чем у фактуры с заполнителем из кварцевого песка. Объясняется это большей однородностью структурных свойств фактуры с карбонатным заполнителем, поскольку сцепление вяжущего с поверхностью родственного в химическом отношении заполнителя происходит более активно и отличается относительно высокой прочностью.

Третьим направлением в исследованиях долговечности ограждающих конструкций является применение математических методов теории надежности к прогнозированию сроков службы тех или иных конструктивных элементов на основе имеющегося опыта эксплуатации, его обобщений и результатов натурных исследований.

Теория надежности была развита применительно к кинематическим системам и управляющим устройствам, таким как действующие механизмы, средства транспорта, автоматического производства и контроля, электронно-вычислительные машины и т. д. Поэтому многие понятия и значительная часть терминологии теории надежности установились применительно к особенностям работы кинематических и им подобных систем и не приложимы, в логическом смысле, к рассмотрению эксплуатации строительных конструкций. Таковы понятия о безотказности работы механизмов, возникновении отказов при использовании автоматических и электронных устройств и некоторые другие. Очевидно, что эти понятия аналогичны таким установившимся в строительстве представлениям, как неизменность и сохранность эксплуатационных качеств ограждающих конструкций и их временное или постоянное нарушение при утрате непроницаемости, теплозащитных свойств или возникновении каких-либо других дефектов.

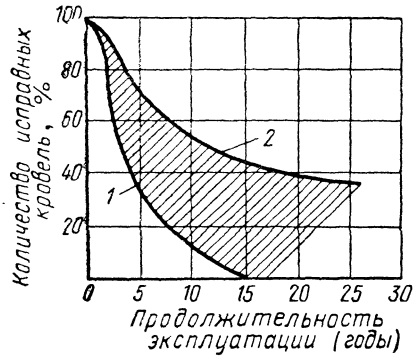


Рис. VII.3. Длительность безремонтной службы надчердачных кровель из асбестоцементных листов (по обследованиям НИИасбестоцемента, обработанным Б. М. Колотилкиным):

1 — в многоэтажных жилых домах; *2* — в одноэтажных индивидуальных жилых домах

Однако математический аппарат, применяемый при изучении надежности, основан на методах теории вероятности и может быть приложен к изучению любых явлений, если последние можно считать входящими в категорию установившихся случайных процессов, а имеющийся опыт статистического учета изменений их особенностей — достаточно развитым и массовым.

Следовательно, применение математических методов теории надежности может дать наибольший познавательный и практический эффект при обработке результатов массовых натурных наблюдений за сроками службы отдельных конструктивных элементов и закономерностями их постепенного разрушения в сходных условиях эксплуатации.

На рис. VII.3 показаны результаты обработки натурных исследований длительности безремонтной службы надчердачных кровель из асбестоцементных листов [84] в жилых домах.

После четырех лет эксплуатации свыше 60% обследованных кровель многоэтажных домов нуждалось в мелком ремонте, после

восьми лет — около 90%, а предельная длительность безремонтной службы составляла около 15 лет. Вторая половина общей длительности службы кровель протекает при периодических ремонтах Для индивидуальных одноэтажных домов сроки безремонтной службы кровель гораздо длительнее, что, по-видимому, объясняется более аккуратной эксплуатацией, а возможно и более крутыми уклонами кровель, поскольку чердачные пространства обычно используются для хозяйственных целей, а иногда и для летнего жилья. Длительность безремонтной службы превышает 30 лет более чем для 20% кровель.

По-видимому, выводы НИИасбестоцемента о том, что в целях увеличения долговечности кровель следует повышать плотность асбестоцементных листов (а, следовательно, уменьшать водопоглощение и увеличивать морозостойкость) и их ударную вязкость, являются правильными.

§ 2. ХАРАКТЕРНЫЕ ПЕРИОДЫ ИЗНОСА КОНСТРУКЦИЙ

Постепенное разрушение (износ) ограждающих конструкций происходит с неодинаковой быстротой в течение общего срока службы здания. На рис. VII.4, *а* по оси ординат отложена изношенность, выраженная в процентах, а по оси абсцисс — время, отсчитываемое от начала эксплуатации здания и измеряемое в годах и десятках лет. Характерная кинетика изменений износа конструкций и нарастания их изношенности с течением времени выражена кривой *1*.

Как видно из рисунка, зависимость утраты не-

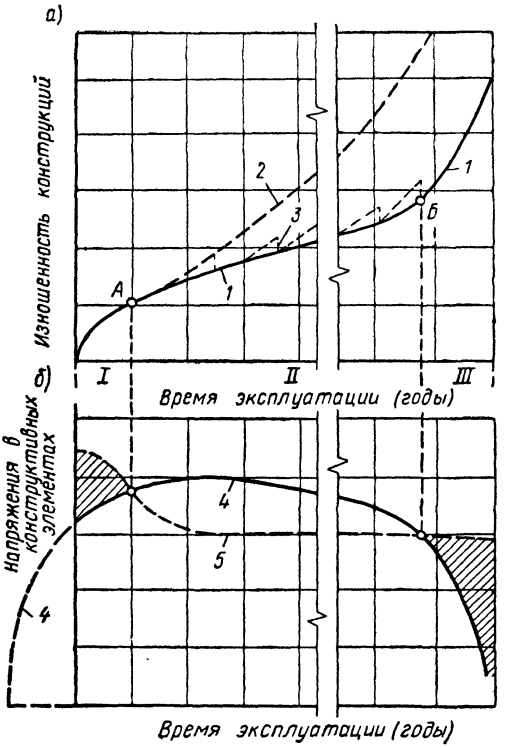


Рис. VII.4. Закономерности и характерные периоды износа ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий:

а — характерные периоды износа (I, II, III); *1* — обобщенная кривая нарастания изношенности конструкций при нормальной эксплуатации здания и периодических ремонтах; *А*; *Б* — характерные точки в зонах перегиба кривой; *2* — нарастание изношенности при отсутствии ремонтов; *3* — возмещение износа путем периодических ремонтов; *б* — закономерности изменения напряжений в конструкциях эксплуатируемых зданий; *4* — характерные изменения предела прочности конструктивных элементов с течением времени; *5* — изменения напряжений от внешних воздействий (заштрихованы периоды возникновения перегрузочных напряжений)

обходимых качеств конструкций от времени (т. е. $\partial p/\partial \tau$ или $\partial \varkappa/\partial \tau$, где p — характерный вид прочности, $\varkappa$ — проницаемость, τ — время) нелинейна и кривая *1* имеет две зоны перегиба вблизи точек *А* и *Б*. Эти зоны перегиба определяют три характерных периода износа конструкций здания (I, II, III), отмеченные на рисунке.

Такие характерные периоды отличаются друг от друга различной интенсивностью износа; в периодах I и III последняя наиболее высока, тогда как в периоде II, самом длительном и занимающем до 80% от общей продолжительности службы здания, интенсивность износа сравнительно незначительна.

Существенные различия интенсивности износа конструкций в характерные периоды эксплуатации здания объясняются типичными изменениями напряженного состояния в эти периоды, что видно из рисунка VII.4, *б*.

Для периодов I и III характерно развитие напряжений, превышающих предел выносливости отдельных элементов ограждающих конструкций; в начальный период это связано с чрезмерными усадочными и термическими напряжениями, а в последний — с падением предела выносливости существенно износившихся конструкций.

В первые годы эксплуатации вновь выстроенного здания характерно ускоренное разрушение (повышенный износ) многих конструктивных элементов. Объясняется это многими причинами, в частности, усадкой и усушкой излишне влажных материалов, примененных при постройке, уплотнением грунта и неравномерной осадкой здания, выявляющимися в первый период эксплуатации, дефектами проектирования и строительных работ, а также недостаточно высокими свойствами материалов и конструкций.

Усадка и усушка материалов, применяемых в конструкциях здания, обычно связаны с повышенным содержанием первоначальной строительной влаги (особенно характерным для конструктивных элементов из бетонов и древесины, изделий, увлажненных при транспортировке, и т. д.). Процессы усадки, усушки и развития термических напряжений обычно сопровождаются образованием трещин, неплотностей и щелей в конструкциях и особенно сопряжениях отдельных крупноразмерных элементов. При этом величины деформаций и вероятность возникновения трещин зависят преимущественно от величины и изменений температурного перепада, градиента влагосодержания, а также характерного размера крупного элемента и условий его деформирования.

Наибольшая усушка, связанная с возникновением неплотностей и щелей, характерна для деревянных конструктивных элементов (полы, перегородки, оконные переплеты, двери и т. д.). Выполнение конструкций из так называемой воздушно-сухой древесины (18% влажности по весу) не в состоянии полностью предотвратить явления усушки, поскольку изменения объема деревянных элементов при их высыхании до равновесного состояния (например, 8—10% по весу) происходят главным образом в пределах гигроскопической влажности.

Усушка конструкций, покрытых штукатуркой, окраской или обоями, связана с образованием трещин и разрывов в этих отделочных слоях.

Возникновение усадочных трещин характерно также для переувлажненных при изготовлении или возведении элементов стен из легких бетонов. Неравномерная осадка стен, вызванная незакономерным уплотнением грунта под подошвой фундаментов, приводит к возникновению определенным образом расположенных трещин в кладке или в зонах сопряжения крупных элементов здания.

Для переувлажненных начальной строительной влагой наружных ограждающих конструкций характерны пониженные теплозащитные свойства; часто такие конструкции являются причиной сырости в помещениях.

Конструкции, осуществленные из недостаточно стойких материалов, а также некачественно выполненные или неудачные по своему общему решению, неизменно обнаруживают дефекты в первый период эксплуатации здания; выявление таких дефектов в течение гарантийного срока обязывает строительную организацию произвести необходимые исправления.

По окончании первого периода эксплуатации, характеризующегося повышенным износом, часто требуется проведение ремонта кровель, защитно-отделочных слоев, деревянных полов, переплетов, сопряжений крупных панелей и т. д. Такой ремонт называется послеосадочным и должен производиться за счет средств, направляемых в новое строительство. При небрежной эксплуатации зданий и отсутствии своевременных периодических ремонтов износ конструкций здания интенсифицируется и общая их долговечность сокращается, что отмечено пунктирными линиями *2* и *3* на рис. VII.4, *а*.

Второй и наиболее длительный (обычно продолжающийся в течение многих десятилетий) период эксплуатации здания характеризуется весьма медленным (нормальным) износом конструкций здания. Такой медленный и для многих основных конструкций практически незаметный износ объясняется тем, что материалы этих конструкций приобрели стабильную, незначительно изменяющуюся в отдельные периоды года, влажность и близки к термодинамическому равновесию с воздействием окружающей воздушной среды; в этих условиях разрушающие процессы активизируются главным образом только при случайных увлажнениях конструкций или нарушениях средних многолетних условий эксплуатации (что связано, например, с изменениями назначения и влажностного режима помещений, увеличением загрязненности и агрессивности наружного воздуха, изменением уровня грунтовых вод и т. д.).

После того как в течение долгих лет конструкции здания подвергаются весьма медленному износу, структура материалов постепенно изменяется, пористость увеличивается, мелкие и при этом закрытые поры разрушаются и превращаются в более крупные и открытые; конструкции утрачивают значительную часть прочности и непроницаемости.

В этих условиях наступает последний (третий) период эксплуатации, характеризующийся ускоренным разрушением ослабленных конструкций здания. Этот период может измеряться годами, но к концу его здание обычно приходит уже в аварийное состояние.

§ 3. ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫМИ МЕРОПРИЯТИЯМИ

Сроки службы конструкций зависят от качества применяемых материалов и изделий, общей целесообразности принятого конструктивного решения, надежности защитно-отделочных слоев или других средств, ограничивающих физико-климатические и другие внешние воздействия на конструкцию. В этот перечень факторов, влияющих на долговечность конструкций не включены особенности и качество производства строительно-монтажных работ, поскольку эти причины далеко не всегда могут быть учтены в стадии проектирования конструкций.

Весьма важным качеством применяемых материалов и изделий является неизменность их необходимых структурно-механических свойств во времени. Это качество обеспечивается отнюдь не высокой начальной прочностью материала, а только достаточной его стойкостью против тех внешних воздействий, которые будут восприниматься проектируемой конструкцией. Виды необходимой стойкости должны быть установлены путем тщательного изучения особенностей эксплуатации. Однако все виды стойкости материала против колебаний температур и изменений влагосодержания (влагостойкость, морозостойкость, стойкость против циклических изменений температуры) могут быть обеспечены соблюдением определенных закономерностей, влияющих на образование структуры материала.

Большинство строительных материалов состоит из нескольких составляющих и отличаются неоднородной структурой, отдельные элементы которой могут состоять из компонентов с различными физико-химическими свойствами *.

Естественно, что различные физические свойства отдельных компонентов наиболее заметны в композиционных материалах, типичным примером которых являются бетоны.

При колебаниях температуры и ее изменениях в отдельных зонах конструкции из этих различных свойств важно, в частности, термическое расширение вяжущего и заполнителей, определяемое величинами коэффициентов $\alpha_т$.

---

* Это относится не только к бетонам, являющимся типично неоднородными материалами, образованными из вяжущего и заполнителей. Неоднороден и сам вяжущий раствор, в состав которого входят различные модификации извести и цемента, и кроме того — в качестве наполнителя песок, свойства которого также неодинаковы. Неоднородны и крупные заполнители, состоящие из отдельных минеральных составляющих. В этом смысле неоднородным является почти любой компонент наиболее распространенных композиционных строительных материалов.

На границе этих компонентов возникают напряжения, пропорциональные разности коэффициентов термического расширения и градиенту температур. При значительных напряжениях и недостаточном сцеплении вяжущего с поверхностью заполнителя у этих границ легко возникают трещины, приводящие при дальнейшем их развитии к заметному для глаза разрушению материала.

В связи с этим при выборе вяжущего и заполнителей для бетонов важно знать величины $\alpha_т$ для этих компонентов и подбирать их так, чтобы их коэффициенты термического расширения отличались друг от друга наименьшим образом.

В табл. VII.1 указаны ориентировочные величины $\alpha_т$ для некоторых характерных материалов.

Таблица VII.1

Значения коэффициентов термического расширения $\alpha_т$, 1/град, для некоторых материалов

Наименование материала	Объемный вес, *кг/м³*	Значения $\alpha_т 10^{-6}$ *1/град*
Цементный раствор	1800	10—12
Известковый раствор	1600	9,0
То же, но с кварцевым песком	1600	6,0—7,5
Кирпич глиняный обожженный	1700	5—6
Кирпич силикатный	1900	8—9
Шлак топливный	700—1000	2,6—5,5
Гранит	2800	2,6
Речной гравий	2000	4,0—4,7
Керамзитобетон на кварцевом песке	1500—1700	7,0—8,0
Керамзитобетон на керамзитовом песке	1300—1400	6,0—7,0
Газосиликат	500—800	6,0—8,0
Газобетон	400—800	7,0—8,0
Пенобетон	500—800	8,0—8,5

Учитывая значения для стойкости бетона величины разности коэффициентов термического расширения вяжущего и крупного заполнителя, можно ожидать, что, например, шлакобетон на цементном вяжущем с заполнителем из топливных шлаков окажется недостаточно стойким и склонным к образованию трещин при колебаниях температуры. Опыт эксплуатации конструкций из шлакобетона этого вида, а также данные по исследованиям воздухопроницаемости подобных материалов подтверждают возникновение в них микротрещин. Шлакобетоны с заполнителем из металлургических шлаков отличаются гораздо более высокой стойкостью, что объясняется возникновением нерастворимых соединений на границе вяжущее — крупный заполнитель и более высоким сцеплением.

Мелкозернистые бетоны на карбонатном песке, применяемые для фактурных слоев крупных панелей и блоков, оказываются гораздо более стойкими по сравнению с мелкозернистыми бетонами на кварцевом песке; одной из причин этого является общность химического состава компонентов вяжущего и мелкого заполнителя (CaO), а также примерно одинаковые коэффициенты их термического расширения ($\alpha_T \approx 9{,}0 \cdot 10^{-6}$).

Повышение физико-химической активности поверхности заполнителя ведет к увеличению сцепления и существенному улучшению структурных свойств композиционного материала. В этом отношении предварительное дробление заполнителей, т. е. обнажение новых поверхностей с высокой физико-химической активностью, является целесообразным технологическим приемом, обеспечивающим повышение любых видов стойкости производимых материалов (высокая стойкость бетона с дробленым гравием и щебнем, ячеистых бетонов с наполнителем из дробленого песка и т. д.). Увеличение сцепления на поверхности заполнителя является одним из наиболее доступных в технологическом отношении приемов, обеспечивающих формирование более совершенной макроструктуры с повышенным запасом внутренней энергии в объеме материала.

Наиболее явно выраженное разрушающее действие колебаний температур отмечается для ограждающих конструкций производственных зданий с наличием интенсивных выделений лучистого тепла, где температура поверхности железобетонных конструкций может достигать свыше 100°, в результате чего отмечается значительное ослабление сцепления бетона с арматурой и постепенное нарушение сцепления цементного камня с поверхностью заполнителей.

Поверхность стен любых зданий и, в частности, наружная часть крупных панелей также могут подвергаться существенным температурным колебаниям, особенно при нагреве их солнечной радиацией. В летнее время в южных районах средние значения колебаний температуры поверхности составляют величину порядка 30° (например, от +15 до +45°); однако наиболее опасны колебания температур в зимнее время в районах с интенсивной солнечной радиацией (южная Сибирь, Приморский край и т. д.), происходящие на поверхности стен, обращенных на юг и юго-запад, примерно, с такой же или еще большей разностью температур в течение суток (например, от —18 до +18°), но связанные с ежесуточными наиболее разрушительными для наружной части стен переходами через нуль.

Для сравнительной оценки вероятности активного образования трещин, которое может быть вызвано такими климатическими воздействиями, важны: 1) число переходов через нуль в наружной части панели n; 2) безразмерная амплитуда колебаний температур A_t (например, отношение разности экстремальных ее значений в рассматриваемом сечении конструкции к среднегодовой температуре); 3) объемное влагосодержание материала ω_o.

Степень стойкости материала (в частности, его морозостойкость должна назначаться в соответствии с величинами этих показателей для наиболее опасного сечения в наружной части панели. Приближенно все три показателя могут быть выражены одной числовой характеристикой, например, их произведением, которое можно считать пропорциональным количеству внешней энергии E, затрачиваемой на деструкцию материала ($E \approx n A_t \omega_o$). Эта числовая ха-

рактеристика обычно имеет наибольшее значение или на поверхности панели, где наиболее велики изменения температуры, или на глубине слоя резких температурных колебаний δ, где возрастает влагосодержание материала (рис. VII.5).

Число переходов через нуль зависит от ориентации панельных стен и условий наружного климата; оно наиболее велико для стен, обращенных на юг, и для территорий с интенсивной солнечной радиацией в зимнее время года (Южная Сибирь, Приморский Край и т. д.).

Для Приморского Края, где зимой преобладают ясные, солнечные дни с холодными ветрами и низкой температурой наружного воздуха, число переходов через нуль достигает на поверхности панелей, обращенных на юг, 80 циклов [85], уменьшаясь на глубине 7 *см.* (граница слоя резких колебаний) примерно до 75, тогда как соответствующие значения для европейской части СССР (г. Куйбышев) приближенно составляют 12 и 8 [86].

Морозостойкость материала наружной части панелей на территориях Дальневосточного края должна быть существенно выше, чем в районах европейской части СССР.

Термические напряжения наружной поверхности панелей на восточных территориях СССР также очень высоки [85] и часто превосходят допустимые напряжения на растяжение для применяемых бетонов (рис. VII.6).

В тех случаях, когда изменения температур сопровождаются резкими колебаниями влагосодержания материала, структура его должна обладать некоторыми дополнительными свойствами. Если бы структура материала состояла из крупных закрытых однородных пор, соединенных тонкими капиллярами, разрушение при воздействиях влаги и вообще водных растворов, протекало бы много медленнее, а материал обладал бы высокой физико-химической стойкостью.

Замедление разрушения при резких изменениях влагосодержания характерно также для материалов с относительно изолированными (замкнутыми) порами, заполненными воздухом и трудно доступными для влаги при обычных условиях, но обеспечивающими ее перераспределение при более высоких давлениях, возникающих, например, при замерзании.

Количество замкнутых пор является мерой обеспечения стойкости материала против внешних разрушающих физико-химических воздействий, связанных с присутствием влаги. Свободная энергия на поверхности замкнутых пор более высока, чем в открытых, доступных для внешних воздействий. С развитием разрушения число замкнутых пор уменьшается, а удельная поверхность неизолированных пор и полостей внутри материала возрастает.

Одновременно уменьшается концентрация поверхностной энергии в объеме материала.

Безобжиговые материалы с неблагоприятно организованной пористостью (крупными открытыми порами) и малой механической прочностью могут в первый же период после изготовления подвер-

гаться саморазрушению при пребывании в воздушной среде с относительно высокой температурой (порядка 25—40° и выше)*.

Аналогичные требования к структуре материала в отношении преимущественно закрытой пористости и хорошего сцепления вяжущего с заполнителем относятся к элементам конструкций, подвергающихся попеременному действию влаги и мороза.

Степень морозостойкости строительных материалов не связана какой-либо определенной зависимостью ни с величиной общей прочности материала при сжатии, ни с его объемным весом; прочный и тяжелый материал может оказаться недостаточно морозостойким и, наоборот, материал с ограниченной механической проч-

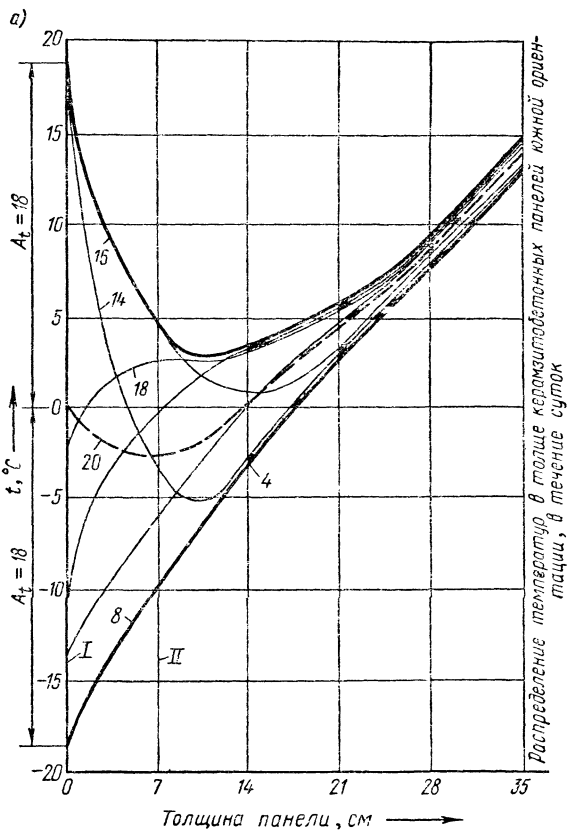


Рис VII.5. Изменения теплового состояния в зимний период года во Владивостоке (по

а — колебания температуры в толще панелей южной пределение влагосодержания по толщине панелей; нуль в течение зимы — $n=80$; $A_t=18°$, $\omega=4\%$); *II* — температуры ($n=75$; $A_t=7{,}5°$; $\omega_1=10\%$); 2, 4, 8, 14,

* По П. А. Ребиндеру это связано с изотермическими перемещениями влаги с мест контакта частиц на всю поверхность пор и сведением к минимуму свободной поверхностной энергии внутри материала.

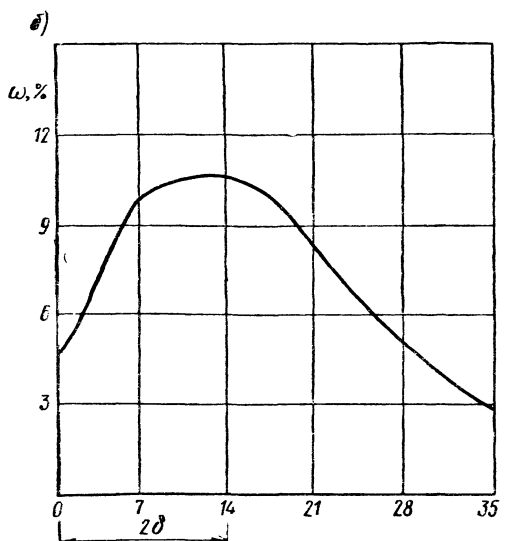
ностью при сжатии и легким весом может выдержать большое число замораживаний и оттаиваний без существенных разрушений.

Действие влаги и мороза на материалы приводит к развитию весьма больших местных напряжений в наиболее слабых участках материала, что и является основной причиной образования и развития трещин.

Материалы, в которых зародыши и зоны вероятного образования трещин возникают в процессе их изготовления, являются совершенно нестойкими в процессе эксплуатации.

Так, например, слоистая и свилеватая структура является одной из основных причин недостаточной морозостойкости глиняного обожженного кирпича, выпускаемого отдельными заводами.

В условиях влажного климата и неустойчивой зимы свилеватый кирпич с высокой механической прочностью при сжатии (до 150 $кГ/см^2$) быстро разрушается в наружных частях стен жилых зданий. Лабораторные исследования этого кирпича на замораживание в водонасыщенном состоянии показывают, что он разрушается после двух-трех замораживаний. В то же время морозостойкость плотного, хорошо обожженного кирпича пластичного формования из однородных глин, не содержащих посторонних растворимых примесей, измеряется более чем 35 циклами замораживания.



и влагосодержания керамзитобетонных панелей данным Л. Б. Векслер):

ориентации в течение суток; *б* — характерное рас-
1 — наружная поверхность (число циклов перехода через
ориентировочная граница слоя резких колебаний
16 и т. д. — часы суток

Тщательная укладка и уплотнение бетона с малым водоцементным отношением, представляющего преимущества в отношении воз-

можного повышения стойкости, но обладающего малой пластичностью, требует интенсивных вибрационных воздействий; в тех случаях, когда это представляет некоторые трудности, большое значение приобретает применение поверхностно-активных добавок, повышающих пластичность бетонов с малым водоцементным отношением и облегчающих их укладку. Одновременно применение таких добавок способствует повышению морозостойкости бетонных изделий.

Введение поверхностно-активных веществ, например, сульфитно-спиртовой барды или абиетиновой смолы, ведет к более совершенному обволакиванию заполнителей цементным тестом и вытеснению с их поверхности воздушной пленки, а следовательно, повышению сцепления. Образование структуры цементного камня имеет свои особенности в зависимости от вида и свойств вводимых добавок. При введении активных гидрофобных добавок типа абиетиновой смолы вытесненные с поверхности заполнителей мельчайшие пузырьки воздуха образуют в цементном тесте замкнутые и равномерно распределенные по объему материала поры, мало доступные для проникновения в них влаги. Подобная структура бетона обеспечивает малую проницаемость и повышает долговечность конструктивных элементов, находящихся в воздушной среде, но периодически подвергающихся увлажнению и замерзанию (например, бетонных ступеней наружных лестниц, бордюрных камней тротуаров и парапетов и т. д.).

Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что при затворении бетона с поверхностно-активными добавками кристаллы трехкальциевого алюмината и других основных минералов, входящих в состав цемента, утрачивают обычную форму пластинчатых шестиугольников, создающих слоистую структуру, и приобретают вытянутую форму палочкообразных кристаллов, растущих преимущественно в длину. Эти вытянутые кристаллы образуют в процессе роста скелетную сетчатую структуру цементного камня, значительно повышающую его прочность на растяжение, а следовательно и стойкость.

Помимо применения стойких материалов, общая целесообразность конструктивного решения проектируемого ограждения должна заключаться в обеспечении наиболее однородного распределения температур, отсутствии недопустимого увлажнения отдельных зон или элементов, опасных в отношении преждевременного разрушения, а также соответствия требованиям нормальной эксплуатации и удобного проведения ремонтов.

Конструкции, в которых сочетается применение относительно мало теплопроводных материалов с полностью или частично пересекающими их в направлении параллельном потоку тепла стальными или железобетонными теплопроводными элементами, не удовлетворяют требованиям достаточной долговечности в условиях сурового или влажного климата.

Зоны пониженных, а иногда и отрицательных температур, возникающие вблизи теплопроводных включений, какими являются

стальные крепления, железобетонные ребра панелей и другие элементы, обеспечивающие жесткость и начальную прочность конструкции, становятся очагами постепенного разрушения, поскольку вместе с периодическими понижениями температуры возникают

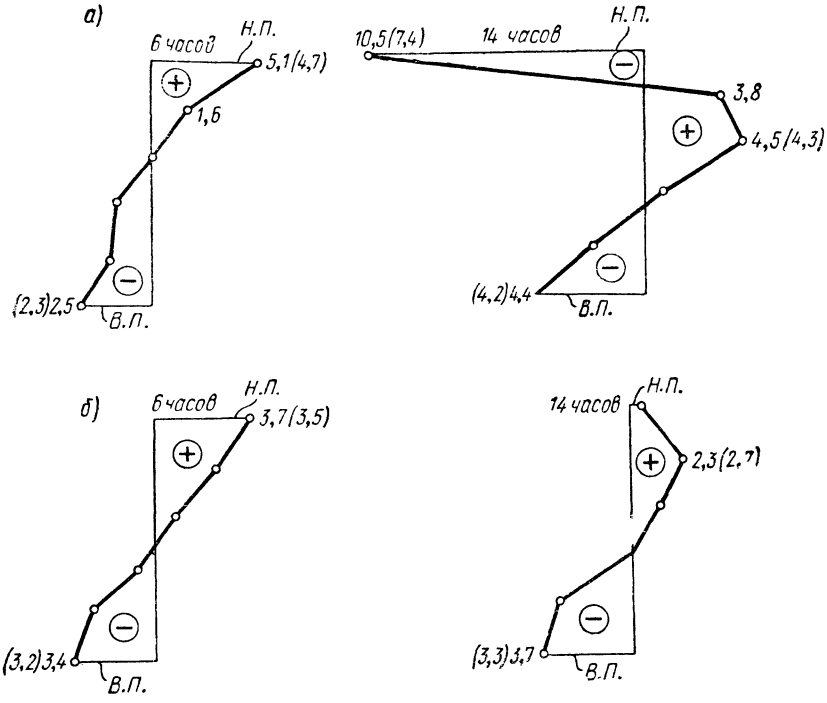


Рис. VII.6. Эпюры зимних температурных напряжений ($кГ/см^2$) в различные часы суток для керамзитобетонных панелей во Владивостоке (по данным Л. Б. Векслер):

а — панель опытного павильона, обращенная на юг; *б* — то же, но обращенная на север (в скобках температурные напряжения, вычисленные для панелей жилых домов; без скобок — замеренные при эксперименте); *н. п.* — наружная поверхность; *в. п.* — внутренняя поверхность

увлажнения, замерзания влаги, образование трещин и процессы коррозии.

Конструкции с однородным температурным полем, характеризуемым монотонным, равномерным распределением изотерм и ограниченной величиной температурного градиента, отличаются большей надежностью в отношении длительных сроков службы и неизменности необходимых эксплуатационных качеств.

В слоистых конструкциях с применением эффективных теплоизоляционных материалов утепляющие слои ни в коем случае не должны пересекаться теплопроводными включениями; несущие конструктивные элементы из более тяжелых и плотных материалов, когда это не противоречит теплофизической целесообразности, следует располагать у теплой поверхности конструкции, так же как и стальные элементы конструкции и сварки.

Для конструкций капитальных зданий должны быть предусмотрены гораздо более длительные сроки службы, чем, например, для конструктивных решений наземного, воздушного и водного транспорта, подвергающихся более быстрой моральной амортизации, плотность и стойкость теплоизоляционных материалов, применяемых в строительстве капитальных зданий, должны быть выше, чем в вагоно-, самолето- и пароходостроении. В частности, применение для этих строительных объектов пенопластов с объемным весом менее 100 *кг/м*^{3} вряд ли можно считать целесообразным.

При проектировании ограждающих конструкций следует по возможности обеспечивать равную надежность и долговечность отдельных элементов конструкции. Для многих конструкций характерны места, зоны, детали, обладающие наименьшим сопротивлением разрушению или подвергающиеся более интенсивным внешним воздействиям. Таковы пристенные, прикарнизные и водоотводящие устройства кровель, наиболее увлажняемые атмосферной влагой части стен, парапетов и наружных входов, стальные крепления и уплотняющие заполнения в сопряжениях крупных панелей и т. д. Состояние этих зон и конструктивных деталей может решающим образом влиять на общее снижение эксплуатационных качеств, конструкции, а потому должно привлекать особое внимание в смысле обеспечения их наибольшей защиты от внешних воздействий и повышения надежности при проектировании.

Долговечность конструкций $\tau_{\text{д}}$ зависит не только от стойкости применяемых материалов, но и от ограничения распространения разрушающих воздействий, т. е. $\tau_{\text{д}} = f$ (Ст; $1/D$), где D — коэффициент диффузии агрессивного вещества.

Долговечной будет и хорошо защищенная конструкция из нестойких материалов. При этом виды защиты могут быть самыми разнообразными как естественными, так и искусственными. Примеры этого разнообразия, заимствованные из опыта эксплуатации зданий и сооружений, многочисленны. Из практики эксплуатации химических предприятий, загрязняющих прилегающую к зданиям почву агрессивными веществами, известно, что фундаменты и другие подземные части зданий долго служат в глинистых грунтах, защищающих от фильтрации, и разрушаются в песчаных, хорошо фильтрующих атмосферную влагу, растворяющую агрессивные вещества.

В одном случае защита обеспечивается естественными условиями, в другом требуется осуществить ее глиняной изоляцией, уширенной асфальтовой отмосткой и исключением наружного неорганизованного отвода воды с кровель.

Известно, что возведенные из нестойкого грунтового материала стены Приоратского дворца под Ленинградом служили несколько веков, вплоть до того, как были повреждены в годы Великой Отечественной войны. Длительный срок службы этих стен объяснялся хорошей их защитой наружными и внутренними штукатурными слоями из мелкозернистого известкового бетона. Подобные же примеры защиты фактурными и облицовочными слоями стен из не-

стойких материалов (грунтовых и неморозостойкого кирпича) дает опыт строительства жилых зданий в тридцатые и сороковые годы в Москве и на Крайнем Севере (Мончегорск).

Благоприятное влажностное состояние конструкции в ряде случаев может быть обеспечено не только изоляцией от внешних влияний, но и активной вентиляцией сухим воздухом. В частности, целесообразна вентиляция пустотных конструкций, снимающая атмосферное увлажнение и обеспечивающая сохранность недостаточно стойких материалов.

Вентилируемые воздушные прослойки являются наиболее эффективной защитой от перемещений влаги в жидкой фазе; конструкции с такими прослойками целесообразны и для защиты от атмосферного увлажнения во влажном климате с устойчивыми периодическими ветрами и при разработке ограждающих конструкций для помещений с большими выделениями влаги.

Целесообразное конструктивное решение в состоянии повысить в несколько раз сроки службы проектируемых ограждающих конструкций зданий.

Таблица перевода размерностей теплофизических величин из системы МКГСС в СИ

Наименование	Обозначение	Физическая размерность в системе МКГСС	Коэффициент перевода в систему СИ	Физическая размерность в системе СИ
Масса	M	*кг·сек²/м*	9,81	*кг*
Сила	P	*кГ*	9,81	*н*
Давление	P	*кГ/см²*	0,981	*бар*
»	P	*мм вод. ст.*	9,81	*бар*
»	e, E	*мм рт. ст.*	133,32	*бар*
Работа, энергия	W, E, A	*кГ·м*	9,81	*дж*
Количество тепла	Q	*ккал*	4186,8	*дж*
Поток тепла	Q, I	*ккал/м²ч*	1,163	*вт/м²*
Удельная теплоемкость	c	*ккал/кг·град*	4186,8	*дж/кг·град*
Коэффициент теплопроводности	λ	*ккал/м·ч·град*	1,163	*вт/м·град*
Коэффициенты:				
теплообмена	α	*ккал/м²·ч·град*	1,163	*вт/м²·град*
теплопередачи	K	*ккал/м²·ч·град*	1,163	*вт/м²·град*
теплоусвоения	s, Y	*ккал/м²·ч·град*	1,163	*вт/м²·град*
теплопоглощения	B	*ккал/м²·ч·град*	1,163	*вт/м²·град*
Сопротивления:				
теплопередаче	R_0	*град·м²·ч/ккал*	0,860	*град·м²·/вт*
термическое	R	*град·м²·ч/ккал*	0,860	*град·м²·/вт*
термическое воздушной прослойки	$R_{в.пр}$	*град·м²·ч/ккал*	0,860	*град·м²·/вт*
Коэффициент паропроницаемости	μ	*г/м·мм рт. ст.·ч*	$2{,}0835\times10^{-9}$	*кг/м·бар*
Сопротивление паропроницанию	$R_п$	*мм рт. ст.·м²·ч/г*	$4{,}7996\times10^{8}$	*бар·м² кг*
Коэффициент — воздухопроницаемости	i	*кг/м·мм вод. ст.·ч*	$2{,}8325\times10^{-5}$	*кг/м·бар*
Сопротивление воздухопроницанию	$R_н$	*мм вод. ст.·м²·ч/кг*	$3{,}5304\times10^{4}$	*бар·м²/кг*

Приложени

Насыщающие парциальные давления водяного пара (*E, мм рт. ст.*) при различных температурах и нормальном барометрическом давлении

$t°$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	$t°$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
А. Для отрицательных температур от 0 до —40° (над льдом)											
0	4,58	4,51	4,44	4,36	4,30	—21	0,70	0,69	0,67	0,66	0,65
—1	4,22	4,15	4,08	4,01	3,95	—22	0,64	0,62	0,61	0,60	0,59
—2	3,88	3,82	3,75	3,69	3,63	—23	0,58	0,56	0,55	0,54	0,53
—3	3,57	3,51	3,45	3,39	3,34	—24	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48
—4	3,28	3,22	3,17	3,11	3,06	—25	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43
—5	3,01	2,96	2,91	2,86	2,81	—26	0,42	0,41	0,40	0,39	0,39
—6	2,76	2,72	2,67	2,63	2,58	—27	0,38	0,37	0,36	0,36	0,35
—7	2,53	2,49	2,45	2,41	2,36	—28	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32
—8	2,32	2,28	2,24	2,20	2,17	—29	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28
—9	2,13	2,09	2,05	2,01	1,98	—30	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
—10	1,95	1,91	1,88	1,84	1,81	—31	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23
—11	1,78	1,75	1,72	1,69	1,66	—32	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21
—12	1,63	1,60	1,57	1,55	1,52	—33	0,20	—	—	—	—
—13	1,49	1,46	1,43	1,41	1,38	—34	0,18	—	—	—	—
—14	1,36	1,34	1,31	1,29	1,26	—35	0,17	—	—	—	—
—15	1,24	1,22	1,19	1,17	1,15	—36	0,15	—	—	—	—
—16	1,13	1,11	1,09	1,07	1,05	—37	0,13	—	—	—	—
—17	1,03	1,01	0,99	0,97	0,96	—38	0,12	—	—	—	—
—18	0,94	0,92	0,90	0,88	0,87	—39	0,10	—	—	—	—
—19	0,85	0,83	0,82	0,80	0,79	—40	0,09	—	—	—	—
—20	0,77	0,76	0,75	0,73	0,71	—	—				
Б. Для положительных температур от 0 до +50° (над водой)											
0	4,58	4,65	4,72	4,79	4,86	26	25,21	25,51	25,81	26,12	26,46
1	4,93	5,00	5,07	5,14	5,22	27	26,74	27,06	27,37	27,70	28,02
2	5,28	5,37	5,45	5,53	5,61	28	28,35	28,68	29,02	29,35	29,70
3	5,69	5,77	5,85	5,93	6,02	29	30,04	30,39	30,75	31,10	31,46
4	6,10	6,19	6,27	6,36	6,45	30	31,82	32,19	32,56	32,93	33,31
5	6,54	6,64	6,73	6,82	6,92	31	33,70	34,08	34,47	34,86	35,26
6	7,01	7,11	7,21	7,31	7,41	32	35,66	36,07	36,48	36,89	37,31
7	7,51	7,62	7,72	7,83	7,94	33	37,73	38,16	38,58	39,02	39,46
8	8,05	8,16	8,27	8,38	8,49	34	39,90	40,34	40,80	41,25	41,71
9	8,61	8,73	8,85	8,97	9,09	35	42,18	42,64	43,12	43,60	44,08
10	9,21	9,33	9,46	9,59	9,71	36	44,56	45,05	45,55	46,05	46,56
11	9,84	9,98	10,11	10,24	10,38	37	47,07	47,58	48,10	48,63	49,16
12	10,52	10,66	10,80	10,94	11,09	38	49,69	50,23	50,77	51,32	51,90
13	11,23	11,38	11,53	11,68	11,83	39	52,44	53,01	53,58	54,16	54,74
14	11,99	12,14	12,30	12,46	12,62	40	55,32	55,91	56,51	57,11	57,72
15	12,79	12,95	13,12	13,29	13,46	41	58,34	58,96	59,58	60,22	60,86
16	13,63	13,81	13,99	14,17	14,35	42	61,50	62,14	62,80	63,46	64,12
17	14,53	14,72	14,90	15,09	15,28	43	64,80	65,48	66,16	66,86	67,56
18	15,48	15,67	15,87	16,07	16,27	44	68,26	68,97	69,69	70,41	71,14
19	16,48	16,69	16,89	17,11	17,32	45	71,88	72,62	73,36	74,12	74,88
20	17,54	17,75	17,97	18,20	18,42	46	75,65	76,43	77,21	78,00	78,80
21	18,65	18,88	19,11	19,35	19,59	47	79,60	80,41	81,23	82,05	82,87
22	19,83	20,07	20,32	20,57	20,82	48	83,71	84,56	85,42	86,28	87,14
23	21,07	21,32	21,58	21,85	22,11	49	88,02	88,90	89,79	90,69	91,59
24	22,38	22,65	22,92	23,20	23,48	50	92,51	—	—	—	—
25	23,76	24,04	24,33	24,62	24,91	—	—	—	—	—	—

Расчетные величины теплофизических показателей строительных материалов
(применительно к данным СНиП-II.А.7—71)

№ п.п.	Наименование материала	Объемный вес в сухом состоянии, $кг/м^3$	Коэффициент теплопроводности сухого материала λ, $ккал/ч \cdot м \cdot град$	Расчетные коэффициенты: теплопроводности λ, $ккал/ч \cdot м \cdot град$ при условиях эксплуатации А (сухих)	Расчетные коэффициенты: теплопроводности λ, $ккал/ч \cdot м \cdot град$ при условиях эксплуатации Б (норм)	теплоусвоения (при периоде 24 ч) s_{24}, $ккал/м^2 \cdot ч \cdot град$ при условиях эксплуатации (норм)	паропроницаемости μ, $г/м \cdot ч \cdot мм\ рт.\ ст.$ при влажности материала, соответствующей 80% по изотерме сорбции
1	2	3	4	5	6	7	8
	I. Асбестоцементные изделия (удельная теплоемкость $c=0{,}20$ $ккал/кг \cdot град$)						
1	Асбестоцементные плитки и листы . .	1900	0,35	0,45	0,50	7,04	0,0035
2	То же	1800	0,30	0,40	0,45	6,49	
	II. Асфальтовые и битумные материалы ($c=0{,}40$ $ккал/кг \cdot град$)						
3	Асфальт в полах и стяжках	1800	0,65	0,65	0,65	11,0	0,001
4	Асфальтобетон	2100	0,90	0,90	0,90	14,0	0,001
5	Битумы нефтяные (строительные и кровельные) . . .	1300	0,21	0,21	0,21	5,31	0,001
6	То же	1000	0,15	0,15	0,15	4,05	0,001
7	Битумоперлит . . .	400	0,095	0,1	0,105	3,79	—
	III. Бетоны ($c=0{,}20$ $ккал/кг \cdot град$)						
8	Железобетон . . .	—	1,45	1,65	1,75	—	—
9	Бетон на каменном щебне или гравии	2400	1,3	1,5	1,6	14,13	0,004
10	Бетон на кирпичном щебне	2000	0,60	0,80	0,90	9,7	0,007
11	То же	1600	0,45	0,65	0,75	7,9	0,009
12	Крупнопористый беспесчаный бетон на каменном щебне или гравии	1900	0,65	0,85	1,00	9,9	0,027
13	То же	1700	0,50	0,70	0,80	8,4	0,029
14	»	1500	0,35	0,50	0,60	6,8	0,030

1	2	3	4	5	6	7	8
15	Бетон силикатный на кварцевом песке	2000	0,95	1,1	1,2	11,3	0,008
16	То же	1800	0,90	1,0	1,1	10,14	0,009
17	Бетон силикатный на карбонатном песке	1800	0,50	0,60	0,70	8,07	0,008
18	Шлакобетон на топливных (котельных) шлаках и бетон на аглопорите	1800	0,60	0,70	0,80	8,65	0,010
19	То же	1600	0,50	0,60	0,65	7,35	0,011
20	»	1400	0,45	0,50	0,55	6,33	0,012
21	»	1200	0,35	0,40	0,45	5,48	0,014
22	»	1000	0,25	0,30	0,35	4,25	0,018
23	»	800	0,2	0,25	0,3	3,52	—
24	Шлакобетон на доменных гранулированных шлаках . .	1800	0,50	0,60	0,70	8,1	0,011
25	То же	1600	0,40	0,50	0,55	6,76	0,012
26	»	1200	0,30	0,40	0,45	5,42	0,014
27	»	1000	0,25	0,30	0,35	4,25	0,016
28	Термозитобетон (шлакопемзобетон)	1800	0,45	0,55	0,65	6,49	0,011
29	То же	1600	0,35	0,45	0,50	6,43	—
30	»	1400	0,30	0,35	0,40	5,40	—
31	»	1200	0,25	0,30	0,35	4,58	—
32	»	1000	0,20	0,25	0,30	3,95	—
33	»	800	0,15	0,20	0,25	3,23	—
34	Газо- и пеношлакопемзобетон	1600	0,40	0,55	0,65	7,05	—
35	То же	1400	0,30	0,45	0,50	6,02	—
36	»	1200	0,25	0,35	0,40	5,0	—
37	»	1000	0,20	0,30	0,35	4,25	—
38	»	800	0,15	0,25	0,30	3,59	—
39	»	600	0,13	0,20	0,25	2,78	—
40	Керамзитобетон	1600	0,45	0,55	0,65	7,35	0,012
41	То же	1400	0,40	0,45	0,50	6,02	0,013
42	»	1200	0,30	0,35	0,40	5,0	0,014
43	»	1000	0,20	0,25	0,30	3,95	0,018
44	»	800	0,17	0,20	0,25	3,22	0,025
45	»	600	0,12	0,15	0,20	2,50	0,035
46	Пено- и газокерамзитобетон на кварцевом песке	1000	0,25	0,30	0,35	3,60	—
47	То же	800	0,20	0,26	0,30	2,88	—
48	Перлитобетон	1000	0,23	0,26	0,30	—	0,025
49	То же	800	0,16	0,19	0,22	3,02	0,035
50	»	600	0,10	0,13	0,15	2,16	0,04
51	»	400	0,07	0,1	0,13	1,64	—
52	Вермикулитобетон	700	0,15	0,17	0,18	2,54	—
53	То же	500	0,10	0,11	0,12	1,76	—
54	»	300	0,07	0,08	0,09	1,18	—

1	2	3	4	5	6	7	8
55	Бетоны ячеистые (газобетон, пенобетон, газосиликат, пеносиликат)	1000	0,24	0,30	0,35	4,25	0,015
56	То же	800	0,18	0,22	0,25	3,22	0,018
57	»	600	0,12	0,15	0,18	2,37	0,023
58	»	400	0,09	0,11	0,12	1,58	0,030
59	»	300	0,07	0,09	0,11	1,32	0,035
60	Газозолобетон и пенозолобетон	1200	0,25	0,35	0,40	5,00	0,01
61	То же	800	0,15	0,25	0,30	2,5	0,13
62	»	600	0,10	0,20	0,25	1,77	0,16
	Бетоны на пористых природных заполнителях (c=0,23 ккал/кг·град)						
63	Туфобетон	2000	0,7	0,9	1,0	10,94	—
64	То же	1800	0,55	0,75	0,85	9,55	—
65	»	1600	0,45	0,65	0,70	6,45	—
66	»	1400	0,35	0,45	0,50	5,04	—
67	»	1200	0,25	0,35	0,40	3,95	—
68	Пемзобетон	1700	0,50	0,60	0,65	8,10	—
69	То же	1500	0,4	0,46	0,5	6,70	—
70	»	900	0,19	0,22	0,25	3,07	—
71	»	700	0,13	0,16	0,20	2,89	—
	IV. Вата минеральная и стеклянная и изделия из нее (c=0,18 ккал/кг·град)						
72	Вата минеральная	100	0,038	0,04	0,042	0,44	0,065
73	То же	150	0,042	0,044	0,047	0,55	0,065
74	Плиты минераловатные на синтетическом связующем	100	0,04	0,042	0,045	0,46	—
75	То же	175	0,044	0,047	0,052	0,65	—
76	Плиты минераловатные жесткие на битумном связующем (c=0,22)	300	0,06	0,062	0,065	1,05	0,055
77	То же	400	0,07	0,072	0,075	1,32	0,045
78	Маты минераловатные прошивные	100	0,038	0,04	0,042	0,44	—
79	То же	200	0,046	0,048	0,052	0,70	—
80	Маты минераловатные на синтетическом связующем	75	0,037	0,04	0,042	0,38	—
81	Вата стеклянная (c=0,2)	125	0,042	0,044	0,046	0,55	—
82	Маты из стеклянного волокна	175	0,042	0,044	0,048	0,66	—

1	2	3	4	5	6	7	8
	V. Газостекло, пеностекло и стекло (c=0,20 *ккал/кг·град*)						
83	Газостекло и пеностекло	400	0,08	0,10	0,12	1,58	0,003
84	То же	300	0,07	0,09	0,11	1,30	0,003
85	»	200	0,06	0,08	0,09	1,02	0,004
86	Стекло оконное	2600	0,70	0,70	0,70	0,73	—
	VI. Гипсовые изделия и материалы (c=0,20 *ккал/кг·град*)						
87	Блоки, плиты и камни из гипса	1200	0,33	0,35	0,4	5,0	—
88	То же	1000	0,33	0,35	0,40	4,47	0,014
89	Плиты гипсовые с органическими наполнителями*	700	0,12	0,18	0,2	3,01	0,025
90	То же	500	0,13	0,15	0,20	1,87	—
91	Пеногипс и газогипс	600	0,12	0,15	0,20	2,5	0,04
92	То же	400	0,10	0,12	0,17	1,87	0,05
93	Листы гипсовые обшивочные (сухая штукатурка)** . . .	800	0,13	0,16	0,18	2,98	—
	VII. Грунтовые материалы (c=0,20 *ккал/кг·град*)						
94	Глинобитные стены	1900	0,50	0,70	0,80	8,9	0,013
95	Саманные стены***	1600	0,45	0,50	0,60	7,9	0,023
96	Смазка глинопесчаная	1800	—	0,50	0,60	7,50	0,013
97	Смазка глиношлаковая	1300	—	0,40	0,45	5,40	0,020
98	Смазка глиноопилочная (c=0,3) . .	800	—	0,20	0,25	3,95	0,025
99	Засыпка из сухого песка	1700	0,3	0,40	0,50	6,63	0,022
	VIII. Дерево и изделия из него (c=0,60 *ккал/кг·град*)						
100	Хвойные породы поперек волокон . . .	500	0,10	0,12	0,15	2,79	0,0082
101	То же, вдоль волокон	500	0,20	0,25	0,30	3,95	0,043
102	Дуб поперек волокон	700	0,12	0,15	0,20	3,62	0,0075
103	То ж, вдоль волокон	700	0,25	0,30	0,35	5,22	0,04

* Для плит гипсовых с органическими наполнителями c=0,25 *ккал/кг·град*.
** Для гипсовой штукатурки (сухой) c=0,24 *ккал/кг·град*.
*** Для саманных стен c=0,25 *ккал/кг · град*.

1	2	3	4	5	6	7	8
104	Фанера клееная	600	0,11	0,13	0,15	3,75	0,003
105	Фибролит (на портландцементе) . . .	500	0,12	0,15	0,20	3,06	0,014
106	То же	400	0,095	0,12	0,15	2,43	0,035
107	»	300	0,075	0,10	0,13	1,87	0,040
108	Плиты древесноволокнистые и древесностружечные *	1000	0,13	0,20	0,25	5,68	0,016
109	То же	600	0,09	0,11	0,14	3,30	0,022
110	»	400	0,07	0,09	0,12	2,49	0,026
111	»	200	0,05	0,06	0,07	1,35	0,032
112	Арболит на древесных отходах	700	0,12	0,18	0,23	4,57	—
113	То же	600	0,10	0,15	0,19	3,85	—
114	»	500	0,08	0,12	0,15	3,12	—
	IX. Засыпки теплоизоляционные (c=0,20 ккал/кг·град)						
115	Шлак топливный	1000	0,16	0,20	0,25	3,63	0,026
116	То же	700	0,12	0,15	0,19	2,60	0,029
117	Шлак доменный гранулированный . .	900	0,14	0,18	0,22	3,20	0,027
118	То же	500	0,08	0,12	0,14	1,90	0,031
119	Гравий керамзитовый	800	0,16	0,18	0,20	2,89	0,028
120	То же	600	0,1	0,15	0,17	2,30	0,040
121	»	400	0,105	0,11	0,12	1,57	0,050
122	»	200	0,085	0,09	0,10	0,81	0,070
123	Аглопоритовый щебень	800	0,16	0,19	0,22	3,09	—
124	То же	600	0,13	0,16	0,19	2,43	—
125	»	400	0,105	0,13	0,15	1,77	—
126	Пемза шлаковая	800	0,14	0,18	0,22	3,02	—
127	То же	600	0,12	0,15	0,18	2,38	0,035
128	»	400	0,1	0,12	0,14	1,74	0,045
129	Перлит вспученный	400	0,065	0,075	0,08	1,27	—
130	То же	200	0,055	0,065	0,07	0,85	—
131	»	100	0,04	0,045	0,05	0,61	—
132	Вермикулит вспученный	300	0,065	0,09	0,10	1,24	—
133	То же	200	0,055	0,08	0,09	0,97	—
134	»	100	0,045	0,065	0,07	0,60	—
	X. Камни природные (c=0,22 ккал/кг·град)						
135	Гранит, гнейс, базальт	2700	3,0	3,0	3,0	21,5	0,0015
136	Мрамор	2700	2,5	2,5	2,5	19,6	0,0015
137	Песчаники	2500	1,5	1,8	2,0	16,9	0,005
138	Известняки	2100	0,9	1,1	1,2	11,96	0,008
139	То же	1700	0,55	0,70	0,80	8,8	0,010
140	Известняк-ракушечник	1500	0,45	0,55	0,60	7,15	0,020

* Для плит из отходов древесины c=0,3 *ккал/кг·град.*

1	2	3	4	5	6	7	8
	Туфы месторождений Армянской ССР						
141	Туф известняковый	1300	0,25	0,40	0,45	5,8	0,020
142	Туф артикский . .	1300	0,2	0,28	0,30	4,68	0,013
143	Туф ереванский . .	1600	0,3	0,36	0,40	5,75	0,011
144	Туф фельзитовый	2000	0,65	0,80	0,90	9,60	0,01
	Кладки на тяжелом растворе из камня правильной формы при объемном весе камня, кг/м³						
145	$\gamma=2800$	2600	2,2	2,55	2,75	20,2	0,0028
146	$\gamma=2000$	1900	0,65	0,90	1,0	10,40	0,0086
147	$\gamma=1200$	1200	0,3	0,40	0,45	5,65	0,0175
	Кладки на тяжелом растворе из камня неправильной формы при объемном весе камня, кг/м³						
148	$\gamma=2800$	2400	1,8	2,05	2,2	17,3	0,0055
149	$\gamma=2000$	1850	0,6	0,8	0,9	9,75	0,0098
150	$\gamma=1200$	1300	0,35	0,45	0,5	6,1	0,0162
	XI. Кирпичная кладка (c=0,21 ккал/кг·град)						
151	Кирпичная кладка из глиняного обожженного кирпича на тяжелом растворе .	1800	0,48	0,60	0,70	8,3	0,014
152	То же, на легком растворе объемного веса 1400 *кг/м³* . . .	1600	0,4	0,5	0,55	6,90	0,016
153	Кладка из пористого кирпича 1300 *кг/м³*, семищелевых керамических камней, дырчатого кирпича (при 30 отверстиях) на тяжелом растворе	1400	0,35	0,45	0,5	6,15	0,018
154	Кладка из многодырчатого кирпича на тяжелом растворе (при 100 отверстиях в кирпиче)	1200	0,3	0,4	0,45	5,45	0,020
155	Кладка из силикатного кирпича на любом растворе . . .	1900	0,60	0,65	0,75	8,2	0,014
156	Кладка из шлакового кирпича с объемным весом 1400 *кг/м³* на тяжелом растворе	1500	0,45	0,55	0,60	7,0	0,014
	XII. Металлы (c=0,115 ккал/кг·град)						
157	Сталь строительная	7850	50	50	50	108,4	—
158	Чугун	7200	43	43	43	96,4	—
159	Алюминий	2600	190	190	190	121,5	—

1	2	3	4	5	6	7	8
	XIII. Органические теплоизоляционные материалы (c=0,40 ккал/кг·град)						
160	Камышит	350	0,06	0,08	0,12	2,10	0,06
161	То же	250	0,05	0,06	0,08	1,45	0,065
162	Пакля	150	0,035	0,04	0,06	0,97	0,065
163	Плиты торфоизоляционные	250	0,05	0,055	0,065	1,30	0,025
164	То же	170	0,04	0,045	0,05	0,94	0,040
	XIV. Пористые полимерные материалы (c=0,32 ккал/кг · град)						
165	Пенопласт ПС-4	75	0,035	0,036	0,037	0,48	—
166	Пенопласт ПС-1	100	0,035	0,036	0,037	0,55	—
167	То же	150	0,04	0,041	0,042	0,72	—
168	»	200	0,05	0,051	0,052	0,93	—
169	Пенопласт ПХВ-1	100	0,04	0,041	0,043	0,6	—
170	То же	125	0,05	0,051	0,053	0,74	—
171	Пенопласт ПВ-1	125	0,04	0,041	0,043	0,67	—
172	Пенополиуретан	75	0,035	0,036	0,037	0,48	—
	XV. Растворы строительные и штукатурки (c=0,20 ккал/кг·град)						
173	Цементно-песчаный раствор или штукатурка из него . . .	1800	0,5	0,65	0,80	8,65	0,012
174	Сложный раствор (песок, известь, цемент) или штукатурка из него	1700	0,45	0,60	0,75	8,15	0,013
175	Известково-песчаный раствор или штукатурка из него . . .	1600	0,4	0,60	0,70	7,65	0,016
176	Штукатурка известково-песчаным раствором по драни . .	1400	0,35	0,45	0,55	6,35	0,016
177	Цементно-шлаковый раствор	1400	0,35	0,45	0,55	6,35	0,015
178	То же	1200	0,3	0,4	0,5	5,6	0,018
	XVI. Рулонные материалы (c=0,35 ккал/кг·град)						
179	Линолеум поливинилхлоридный, многослойный	1800	0,33	0,33	0,33	7,35	0,0002
180	То же	1600	0,28	0,28	0,28	6,40	0,0002
181	То же, на тканевой основе	1700	0,27	0,27	0,27	6,47	0,0002
182	То же	1500	0,22	0,22	0,22	5,47	0,0002
183	Картон облицовочный*	1000	0,15	0,18	0,20	4,1	—
184	Картон строительный, многослойный, «Энсонит»	650	0,11	0,15	0,15	2,85	—
185	Рубероид, пергамин, толь	600	0,15	0,15	0,18	2,86	—

* Для картонов c=0,32 ккал/кг · град.

Сорбционное увлажнение строительных материалов (обобщение экспериментальных данных на основе теории сорбции)

№ п.п.	Наименование материалов	Объемный вес в сухом состоянии, кг/м³	Весовая влажность материала ω, % при относительном парциальном давлении φ, % и температуре, °С											
			φ=40%			φ=60%			φ=80%			φ=100%		
			−20°	0°	+20°	−20°	0°	+20°	−20°	0	+20°	−20°	0°	+20°
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Гипс и гипсовые изделия	1000	0,12	0,1	0,09	0,19	0,17	0,16	0,32	0,28	0,24	0,55	0,52	0,46
	То же	1200	0,21	0,18	0,15	0,29	0,26	0,22	0,46	0,4	0,37	0,68	0,72	0,69
	»	1400	0,27	0,21	0,21	0,34	0,32	0,30	0,54	0,48	0,44	0,87	0,84	0,75
2	Древесина	400	8,8	8,0	7,6	11,3	10,6	9,7	16,1	15,0	14,3	28,7	27,4	26,3
	»	500	10,0	9,0	8,0	13,0	12,2	11,2	18,1	17,0	16,0	32,9	31,5	30,5
	»	600	11,6	10,7	9,3	14,9	14,0	12,9	21,0	19,8	18,5	38,4	36,7	35,0
3	Известняк	1400	0,15	2,12	0,11	0,32	0,19	0,16	0,34	0,30	0,26	0,59	0,54	0,50
	»	1600	0,21	0,18	0,16	0,31	0,27	0,24	0,46	0,41	0,37	0,78	0,74	0,69
	»	1800	0,28	0,24	0,21	0,40	0,35	0,31	0,58	0,53	0,47	1,0	0,92	0,84
4	Кирпич обожженый глиняный	1200	0,04	0,02	0,02	0,09	0,07	0,05	0,19	0,16	0,12	0,47	0,42	0,37
	То же	1400	0,06	0,04	0,03	0,11	0,09	0,06	0,22	0,18	0,15	0,52	0,47	0,41
	»	1600	0,08	0,06	0,04	0,14	0,11	0,09	0,28	0,23	0,19	0,62	0,56	0,50
	»	1800	0,1	0,08	0,06	0,19	0,15	0,12	0,33	0,28	0,24	0,72	0,67	0,51
5	Кирпич саманный	1200	1,9	1,7	1,5	2,5	2,2	2,0	3,3	3,0	2,8	4,9	4,7	4,4
	Кирпич саманный	1400	2,1	1,8	1,6	2,6	2,4	2,1	3,5	3,2	3,0	5,0	4,8	4,5
6	Кирпич силикатный	1700	0,35	0,3	0,26	0,51	0,44	0,38	0,72	0,65	0,59	1,2	1,10	1,01

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	Кирпич силикатный	1900	0,43	0,37	0,32	0,59	0,53	0,46	0,84	0,76	0,69	1,35	1,26	1,18
	Кирпич трепельный . .	600	1,45	1,25	1,07	2,02	1,80	1,55	2,83	2,53	2,32	4,50	4,20	3,92
	Кирпич трепельный . .	800	1,56	1,31	1,14	2,09	1,85	1,63	2,88	2,63	2,40	4,50	4,25	4,00
	Кирпич трепельный	1000	1,70	1,43	1,25	2,20	2,00	1,80	3,03	2,80	2,54	4,55	4,30	4,05
8	Силикатные материалы для кладки стен	1400	0,25	0,21	0,18	0,35	0,31	0,26	0,52	0,47	0,42	0,89	0,85	0,78
	Силикатные материалы для кладки стен	1600	0,32	0,27	0,23	0,44	0,39	0,34	0,64	0,59	0,50	1,11	1,01	1,00
9	Пемзобетон	1000	1,33	1,15	0,99	1,80	1,60	1,40	2,48	2,28	2,09	3,75	3,55	3,25
	»	1200	1,50	1,29	1,11	1,93	1,77	1,58	2,67	2,46	2,25	3,96	3,77	3,54
10	Пенобетон	400	2,95	2,50	2,15	3,92	3,50	3,15	5,50	5,00	4,62	8,50	8,00	7,42
	»	600	2,80	2,40	2,10	3,67	3,34	2,97	5,08	4,58	4,16	7,65	7,19	6,75
	»	800	2,81	2,48	2,16	3,66	3,36	2,97	4,87	4,50	4,19	7,25	6,80	6,50
	»	1000	3,00	2,65	2,35	3,85	3,50	3,17	5,10	4,70	4,35	7,50	7,07	6,63
11	Пеносиликат	600	1,49	1,27	1,06	1,99	1,79	1,54	2,85	2,57	2,34	4,55	4,30	4,02
	»	800	1,60	1,39	1,01	2,13	1,89	1,70	2,98	2,72	2,47	4,52	4,27	4,07
12	Пеносиликальцит . .	600	2,80	2,40	2,10	3,67	3,33	2,93	5,08	4,58	4,17	7,63	7,20	6,67
	Пеносиликальцит . . .	800	2,81	2,48	2,16	3,66	3,25	2,94	4,88	4,50	4,08	7,25	6,88	6,50
		1000	3,00	3,65	2,35	3,85	3,50	3,15	6,10	4,70	4,35	7,39	7,00	6,60
13	Песчаник	1600	0,34	0,28	0,25	0,47	0,42	0,36	0,69	0,62	0,55	1,15	1,06	0,98
	»	1800	0,45	0,38	0,33	0,61	0,54	0,47	0,88	0,79	0,71	1,39	1,31	1,22
	»	2000	0,59	0,50	0,44	0,77	0,70	0,61	1,10	1,00	0,92	1,68	1,58	1,50
14	Раствор шлаковый	700	1,17	1,00	0,86	1,59	1,41	1,21	2,29	2,01	1,86	3,57	3,66	3,14

Продолжение прилож. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Раствор шлаковый	900	1,26	1,09	0,93	1,69	1,50	1,33	2,37	2,18	1,97	3,68	3,48	3,28
15	Силикат-органик . . .	400	4,80	4,35	3,85	6,17	5,75	5,33	8,80	8,25	7,70	15,80	15,10	14,50
	Силикат-органик	600	6,50	5,92	5,25	8,30	7,80	7,25	11,80	11,10	10,40	21,40	20,50	19,60
16	Торфяные изделия . .	200	10,80	9,75	8,70	13,90	13,00	12,00	19,80	18,60	17,40	35,50	34,00	32,60
	Торфяные изделия . . .	400	11,50	9,25	—	14,80	13,90	12,80	20,80	19,50	18,30	37,50	36,00	34,30
17	Торфоплиты	200	9,35	8,25	7,40	11,80	11,00	10,20	16,00	15,40	14,60	30,20	29,00	28,00
	»	400	9,25	8,38	7,43	12,00	11,30	10,30	16,80	15,60	14,80	30,50	29,00	27,90
18	Трепельные изделия	400	1,50	1,28	1,10	2,08	1,88	1,63	3,05	2,75	2,50	5,00	4,70	4,40
	Трепельные изделия	500	1,48	1,24	1,06	2,06	1,80	1,58	2,90	3,24	2,38	4,72	4,40	4,10
19	Туф артикский	900	0,10	0,08	0,07	0,17	0,13	0,11	0,26	0,22	0,20	0,47	0,43	0,39
	Туф артикский	1100	0,16	0,14	0,12	0,25	0,21	0,18	0,36	0,33	0,29	0,66	0,62	0,56
	Туф артикский	1300	0,25	0,21	0,15	0,35	0,31	0,26	0,51	0,46	0,41	0,89	0,83	0,77
20	Фибролит	300	10,0	9,0	8,0	13,0	12,1	11,2	18,3	17,3	16,0	33,3	32,2	30,7
	»	500	12,6	11,5	10,2	16,3	15,1	14,0	23,0	21,6	20,4	42,0	40,0	38,2
21	Шлак гранулированный . .	400	1,40	1,20	1,00	1,90	1,70	1,48	2,80	2,60	2,30	4,70	4,35	4,00
	Шлак доменный	600	1,33	1,17	1,13	1,85	1,65	1,42	2,67	2,35	2,17	4,28	3,95	3,67
	Шлак котельный	800	1,44	1,23	1,05	1,90	1,71	1,50	2,66	2,45	2,25	4,14	3,90	3,58
	Шлак котельный	1000	1,55	1,34	1,16	2,06	1,85	1,65	2,90	2,55	2,35	4,28	4,01	3,76
22	Шлакобетон	1400	1,64	1,43	1,27	2,14	1,93	1,74	2,86	2,61	2,43	4,21	4,00	3,79
	»	1600	1,82	1,59	1,41	2,36	2,16	1,94	3,13	2,88	2,66	4,50	4,31	4,06

Расчетные величины сопротивлений воздухопроницанию $R_и$ $м^2 \cdot мм$ *вод. ст. ч/кг* наиболее распространенных материалов и конструктивных элементов

№ п.п.	Вид и материал слоев	Толщина слоев, *мм*	$R_и$, $м^2 \cdot мм$ *вод. ст·ч/кг*
1	2	3	4
1	Бетон (сплошной без швов)	100	2000
2	Обои бумажные	—	2,0
3	Известняк-ракушечник	500	0,6
4	Облицовка стен штучными керамическими плитами или мелкоразмерными блоками	Менее 250	0,2
5	Картон строительный (без швов)	1,3	6,5
6	Стена кирпичная сплошная на тяжелом растворе толщиной более 1 кирпича	Более 250	1,8
7	То же, в 1 кирпич и менее	250 и менее	0,2
8	Стена кирпичная сплошная на легком растворе толщиной более 1 кирпича	Более 250	0,2
9	То же, в 1 кирпич и менее	250 и менее	0,0
10	Стена из пустотелых керамических камней толщиной в $1^1/_2$ камня на тяжелом растворе	—	0,9
11	Стена из шлакобетонных камней на тяжелом растворе	400	1,3
12	То же, на легком растворе	400	0,1
13	Обшивка из обрезных досок, соединенных впритык или в четверть	20—25	0,01
14	То же, соединенных в шпунт	20—25	0,15
15	Обшивка из досок двойная с прокладкой между обшивками строительной бумаги	50	10,0
16	Обшивка из фибролита, древесноволокнистых бесцементных мягких плит и торфоплит с заделкой швов	15—70	0—25
17	То же, без заделки швов	15—70	0—05
18	Обшивка из жестких древесноволокнистых листов (с заделкой швов)	10	3,4
19	Обшивка из гипсовых облицовочных листов (сухая штукатурка с заделкой швов)	10	2,0
20	Газосиликат сплошной (без швов)	140	2,1
21	Пенобетон автоклавный с преобладанием закрытых пор, без швов или при тщательном заполнении их раствором	100	200
22	То же, неавтоклавный	100	20,0
23	Пеностекло сплошное (без швов), с преобладанием закрытых пор	12	Воздухонепроницаемо
24	Плиты минераловатные жесткие	50	0,2
25	Рубероид	1,5	Воздухонепроницаем
26	Смазка глиняная, тщательно выполненная	5—7	0,7
27	Стена брусчатая или бревенчатая рубленая (при тщательной конопатке пазов)	—	4,0
28	Стиропор	50—100	8,0
29	Толь	1—5	50,0
30	Фанера клееная (без швов)	3—4	300,0
31	Шлакобетон на топливных шлаках сплошной без швов	100	1,4
32	Штукатурка по каменной или кирпичной кладке цементная	15	38,0

1	2	3	4
33	Штукатурка по каменной или кирпичной кладке известковая	15	14,5
34	Штукатурка известково-гипсовая по драни (по дереву)	20	1,7

Примечания:
1: При иной, чем указано в настоящей таблице, толщине слоя:

а) при больших толщинах допускается принимать сопротивление воздухопроницанию прямо пропорциональным величинам, приведенным в таблице;
б) при меньших толщинах величину сопротивления воздухопроницанию следует устанавливать на основании лабораторно-экспериментальных данных.

2. Для каменных стен, имеющих расшивку швов по наружной поверхности, сопротивление воздухопроницанию увеличивается на 2 *мм вод. ст.* · *м*² · *ч/кг* против величин, приведенных в таблице.
3. Для воздушных прослоек и для слоев из сыпучих (шлак, керамзит, пемза и пр.) и рыхлых волокнистых материалов (минеральная вата, солома, стружки и пр.) в расчетах принимается $R_и = 0$, независимо от толщины слоя.

Приложение 5

Расчетные величины сопротивлений паропроницанию *мм рт. ст.* · *м*² · *ч/г* некоторых листовых материалов и окрасочных пленок

№ п.п.	Наименование листовых материалов, пленок и окрасочных пленок	Толщина слоя, *мм*	$R_п$, *мм рт. ст* · *м*² · *ч/г*
1	Картон строительный	1	0,12
2	Листы обшивочные гипсовые	8	0,9
3	То же, древесно-волокнистые, жесткие	8	0,8
4	То же, древесно-волокнистые, мягкие	10	0,4
5	Окраска горячим битумом за 1 раз (при тщательном выполнении)	—	2,0
6	Окраска масляная за 2 раза со шпаклевкой и грунтовкой	—	4,8
7	Окраска эмалевой краской	—	3,6
8	Покрытие поливинилхлоридным лаком за 2 раза	—	29,0
9	То же, хлоркаучуковым лаком за 2 раза	—	26,0
10	Покрытие изольной мастикой за 1 раз	—	4,5
11	Покрытие битумно-кукерсольной мастикой за 1 раз	—	4,8
12	То же, за 2 раза	—	8,1
13	Пергамин	0,4	2,5
14	Рубероид	1,5	8,3
15	Рулонный ковер двухслойный (1 слой рубероида и 1 слой пергамина на битумной мастике)	6	12,8
16	Рулонный ковер 3-х слойный (1 слой рубероида и 2 слоя пергамина на битумной мастике)	10	18,6
17	Толь кровельный	1,9	3,0
18	Фанера клееная трехслойная	5	1,7

Климатологические данные по некоторым пунктам СССР

№ п.п.	Наименование пунктов	Температура воздуха, *град*					Средняя скорость ветра в январе, *м/сек*	Парциальное давление водяного пара за зимний период *мм рт. ст.*	Влажностно-климатическая характеристика
		расчетная		среднемесячная					
		для легких конструкций	для массивных конструкций	самого холодного месяца	самого жаркого месяца	средняя максимальная			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Александровск-Сахалинский	—32	—26	—18,5	16,6	20,5	7,8	1,3	В
2	Алма-Ата	—28	—27	—8,0	22,3	28,5	1,9	—	С
3	Архангельск	—36	—32	—12,5	15,6	20,8	5,9	2,6	В
4	Астрахань	—26	—22	—6,8	25,3	30,9	4,8	3,0	С
5	Ашхабад	—14	—11	1,4	30,7	37,5	2,8		С
6	Баку	—6	—4	3,8	25,7	29,8	8,4	—	
7	Барнаул	—43	—39	—17,7	19,7	25,7	5,9	—	С
8	Батуми	—2	—1	6,5	22,6	26,0	—	5,9	В
9	Благовещенск	—37	—34	—24,3	21,4	26,9	6,6	0,6	У
10	Братск	—46	—43	—23,6	18,2	25,1	3,4	0,8	С
11	Брест	—24	—20	—4,4	18,8	24,6	5,2	3,4	У
12	Брянск	—29	—24	—8,5	18,4	24,8	6,3	2,5	У
13	Великие Луки	—31	—27	—8,2	17,2	23,0	6,1	2,8	У
14	Вильнюс	—25	—23	—5,5	18,0	23,4	5,5	3,2	У
15	Вилюйск	—56	—52	—38,2	18,0	24,2	3,0	0,3	С
16	Витебск	—31	—26	—7,8	18,0	23,1	5,9	2,8	У
17	Владивосток	—26	—25	—14,4	20,0	23,2	9,0	1,4	В
18	Владимир	—33	—27	—11,4	18,1	23,5	4,5	2,1	У
19	Волгоград	—29	—22	—9,2	24,2	30,6	7,1	2,3	С
20	Вологда	—35	—31	—11,7	17,1	22,2	6,0	—	У
21	Воркута	—45	—41	—20,3	11,7	17,1	10,0	—	У
22	Воронеж	—30	—25	—9,3	19,9	25,9	5,4	2,5	С
23	Ворошиловград	—29	—25	—6,6	22,3	29,1	5,3	2,9	С
24	Гомель	—27	—25	—6,9	18,6	24,2	5,5	—	У
25	Горький	—33	—30	—12,0	18,1	23,1	5,1	2,0	У
26	Гродно	—25	—21	—5,1	18,0	23,6	5,1	—	У
27	Грозный	—23	—16	—3,6	23,8	30,7	3,5	3,7	С
28	Днепропетровск	—26	—24	—5,4	22,3	28,2	5,5	3,0	С
29	Дудинка	—51	—46	—28,0	12,8	17,5	7,7	1,8	У
30	Енисейск	—50	—47	—22	18,4	24,4	3,7	1,1	У
31	Ереван	—20	—19	—4,0	25,1	32,5	2,5	3,1	С
32	Жданов	—28	—23	—5,2	22,7	28,7	6,1	3,4	С
33	Запорожье	—25	—23	—5,2	22,7	29,2	5,4	3,0	С
34	Златоуст	—36	—30	—15,4	16,4	22,0	4,6	—	С
35	Иваново	—33	—28	—11,8	17,4	23,0	4,9	2,1	У
36	Игарка	—53	—48	—28,6	14,8	19,5	7,8	—	У
37	Иркутск	—40	—38	—20,9	17,6	24,8	2,8	1,0	С
38	Казань	—35	—30	—13,5	19	24,7	5,7	1,8	С
39	Калинин	—33	—29	—10,4	17,2	22,8	6,2	3,2	У
40	Калининград	—22	—18	—3,4	17,4	22,4	—	3,7	У
41	Калуга	—31	—26	—10,0	17,6	23,4	500	2,3	У
42	Камышин	—30	—26	—11,0	23,8	29,9	8,5	2,1	С
43	Караганда	—35	—32	—15,1	20,3	27,0	7,7	—	С

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
44	Каунас	—24	—20	—4,9	17,9	23,3	4,8	3,2	У
45	Киев	—26	—21	—5,9	19,8	25,6	4,3	3,0	У
46	Киров	—35	—31	—14,2	17,8	23,2	5,3	1,8	У
47	Кишинев	—20	—15	—3,5	21,5	28,1	4,2	3,5	С
48	Комсомольск-на-Амуре	—37	—34	—25,6	19,9	24,9	5,7	—	У
49	Красноводск	—11	—7	—2,9	28,8	33,9	5,2	—	С
50	Краснодар	—23	—19	—1,8	23,2	29,8	3,6	4,1	С
51	Красноярск	—44	—40	—17,1	18,7	24,5	6,2	1,3	С
52	Куйбышев	—36	—27	—13,8	20,7	26,3	5,4	—	С
53	Курск	—29	—24	—8,6	19,3	25,0	5,3	2,5	У
54	Кустанай	—40	—35	—17,7	20,2	26,8	5,8	—	С
55	Ленинград	—28	—25	—7,7	17,8	22,1	4,2	2,6	В
56	Львов	—23	—19	—3,9	18,8	23,6	6,4	3,4	У
57	Магадан	—37	—35	—21	12,6	17 9	6,6	0,8	У
58	Магнитогорск	—37	—34	—16,9	18,3	24,7	8,1	—	С
59	Минск	—30	—25	—6,9	17,8	23,2	5,4	2,9	У
60	Могилев	—29	—25	—7,5	18,2	23,6	5,0	2,8	У
61	Москва	—32	—25	—9,4	19,3	24,4	4,9	2,2	У
62	Мурманск	—34	—28	—10,0	22,4	17,4	7,5	2,9	В
63	Николаев	—22	—19	—3,6	23,0	29,4	5,4	3,5	С
64	Николаевск-на-Амуре	—38	—35	—23,9	16,5	21,3	4,5	0,8	У
65	Новгород	—31	—27	—8,6	17,3	22,8	6,6	2,6	В
66	Новокузнецк	—41	—38	—17,8	18,5	24,7	5,6	1,4	С
67	Новороссийск	—19	—13	2,6	23,7	28,4	6,7	4,8	В
68	Новосибирск	—42	—39	—19	18,7	24,6	5,7	1,2	У
69	Одесса	—21	—17	—2,5	22,2	26,9	8,5	3,9	С
70	Омск	—41	—37	—19,2	18,3	24,5	5,1	1,0	С
71	Орджоникидзе	—19	—17	—5,0	19,7	25,2	3,0	3,2	У
72	Оренбург	—35	—29	—14,8	21,9	28,5	6,1	1,6	С
73	Орск	—36	—29	—16,4	21,3	28,2	5,0	—	С
74	Павлодар	—40	—37	—17,9	21,2	27,5	6,7	—	С
75	Пенза	—33	—27	—12,1	19,8	25,6	5,6	2,0	С
76	Пермь	—38	—34	—15,1	18,1	23,7	3,8	—	У
77	Петрозаводск	—33	—29	—9,8	16,6	21,0	5,9	2,4	У
78	Петропавловск Камчатский	—24	—23	—8,4	13,5	16,9	7,6	1,9	В
79	Полтава	—27	—22	—6,9	20,6	26,5	6,2	2,9	С
80	Псков	—31	—26	—7,5	17,6	22,9	4,8	—	У
81	Рига	—25	—20	—5,0	17,1	21,9	4,5	—	У
82	Ростов-на-Дону	—27	—22	—5,7	22,9	29,1	6,5	3,3	С
83	Рязань	—33	—27	—11,1	18,8	24,4	7,3	2,2	У
84	Саранск	—34	—28	—12,1	19,3	25,1	6,9	—	С
85	Саратов	—33	—28	—12	21,5	25,7	5,6	2,1	С
86	Свердловск	—38	—31	—15,3	17,4	22,9	5,0	—	С
87	Севастополь	—14	—11	2,7	22,4	26,5	6,4	4,9	С
88	Семипалатинск	—39	—38	—16,2	22,2	29,2	4,3	—	С
89	Симферополь	—20	—16	—1,0	21,8	28,2	6,0	—	С
90	Смоленск	—31	—26	—8,6	17,6	22,7	6,8	2,6	У
91	Средне-Колымск	—54	—52	—37,6	13,6	18,9	2,9	0,2	С
92	Ставрополь	—23	—18	—3,7	21,9	27,2	7,4	3,3	У
93	Таллин	—25	—21	—4,7	16,6	20,8	7,7	3,1	В
94	Тамбов	—32	—27	—10,8	20,2	26,1	4,7	2,2	С
95	Ташкент	—18	—15	0,9	26,9	35,3	1,7	—	С

Продолжение прилож. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
96	**Тбилиси**	—10	—7	0,9	24,4	30,8	3,9	—	С
97	Томск	—44	—40	—19,2	18,1	23,7	5,6	1,2	У
98	Тула	—31	—28	—10,1	18,4	24,2	4,9	2,4	У
99	Ульяновск . . .	—36	—31	—13,8	19,6	25,7	—	—	С
100	Уфа	—36	—29	—14,1	19,3	55,3	—	—	С
101	Фрунзе	—27	—23	—5,6	24,1	31,1	2,4	—	С
102	Хабаровск	—34	—32	—22,3	21,1	25,7	5,9	0,8	У
103	Харьков . . .	—28	—23	—7,3	20,8	26,7	5,0	2,8	С
104	Целиноград .	—39	—35	—17,4	20,2	27,0	7,7	—	С
105	Челябинск	—35	—29	—15,5	18,8	24,6	4,5	—	С
106	Чернигов	—27	—22	—6,7	19,4	25,0	4,2	3,0	У
107	Чита	—41	—38	—26,6	18,8	26,3	3,9	0,6	С
108	Южно-Сахалинск . .	—27	—24	—13,8	17,3	22,7	8,5	—	В
109	Якутск	—58	—55	—43,2	18,7	25,2	2,6	0,2	С

Примечание. В последней графе таблицы приведена влажностно-климатическая характеристика отдельных пунктов, с подразделением их на влажные (В), умеренные (У) и сухие (С).

К главе I

1. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1956.
2. Гребер Г., Эрк С., Григулль У. Основы учения о теплообмене. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
3. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М., Стройиздат, 1973.
4. Лыков А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск., Изд-во Академии Наук БССР, 1961.
5. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М., Изд-во «Высшая школа», 1970.
6. Шкловер А. М., Васильев Б. Ф., Ушков Ф. В. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. М., Госстройиздат, 1956.
7. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М., Изд. АН СССР, 1957.
8. Ушков Ф. В. Теплотехнические свойства крупнопанельных стен. М., Стройиздат, 1956.

К главе II

9. Фокин К. Ф. Расчетные температуры наружного воздуха. М., Стандартгиз, 1946.
10. Шкловер А. М. Теплотехнические расчеты жилых и гражданских зданий для летних условий в южных районах. М., Госстройиздат, 1952.
11. Дашкевич Л. Л. Методы расчета инсоляции при проектировании промышленных зданий. М., Госстройиздат, 1939.
12. Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. М., Гидрометиздат, 1948.
13. Воейков А. И. Климаты земного шара, в особенности России. СПБ, 1884.
14. Строительная климатология и геофизика. Основные положения проектирования. СНиП II-А.6—72.
15. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. М., Гидрометеоиздат, 1956.
16. Струзер Л. Р. Передвижение парообразной влаги в почве, в процессе испарения. «Труды ГГИ». Вып. 34(88), 1952.
17. Лыков А. В. Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло- и массопереноса в пограничном слое. Минск, Изд-во Академии Наук БССР, 1961.
18. Алисов Б. П. Климатические области и районы СССР. М., Географгиз, 1947.
19. Чубуков Л. А. Комплексная климатология. М., Гидрометеоиздат, 1949.
20. Педь Д. А., Туркетти З. Л. Распределение суточных амплитуд температуры воздуха на территории СССР. М., Гидрометеоиздат, 1961.
21. Мищенко З. А. Суточный ход температуры воздуха и его агроклиматическое значение. М., Гидрометеоиздат, 1962.
22. Федоров Е. Е. Типы погод суховеев и их распространение по равнине европейской части СССР. М., Изд-во АН СССР, 1938.
23. Лебедева О. Н. Происхождение и характер оттепелей в Европейской части СССР. «Труды ГГО». Вып. 16 «Климатология» (4), 1938.

24. Федоров Е. Е. Распределение дождливых погод и их типов. М., «Труды Института географии АН СССР». Вып. XXVIII, 1938.
25. Сабаляускас И. И., Баркаускас В. И. К вопросу учета климатических воздействий в камеральных испытаниях ограждающих конструкций и их лицевого слоя. Труды АН Литовской ССР. Серия Б. 2/22, 1960.
26. Юрьев О. Ф. Теплофизические свойства ограждающих конструкций промышленных зданий с влажным режимом, в условиях Крайнего Севера. Канд. дисс., М., 1971.
27. Арон М. Б. и Френкель Я. И. О поведении жидких капель на поверхности твердого тела. «Журнал экспериментальной и теоретической физики». Вып. 9, 1949.
28. Шишкин Н. С. О размере капель дождя. М., Доклады АН СССР. № 2, 1953.
29. Бугаев В. А. Климат Средней Азии и Казахстана. Ташкент, 1946.
30. Визе Ю. В. Климат Якутии. Л., Изд-во АН СССР, 1927.
31. Колдомасов Л. И. Климат Западной Сибири. Новосибирск, 1947.
32. Bilham E. J. The climate of the British Isles, London, 1936.
33. Михель В. М., Руднева А. В. Районирование территории СССР по переносу снега. Труды ГГО. Вып. 210, 1967.
34. Михель В. М., Руднева А. В. Метод расчета снегопереноса. Инф. письмо № 17, Гидрометеоиздат, 1969.
35. Горячев Л. Б. Промышленное строительство, 1968, № 7, 10.

К главе III

36. Абрамович Г. Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М., Госэнергоиздат, 1948.
37. Sutton, Mycrometeorologie, N. J., London, 1955.
38. Дунский В. Ф. Траектории теплых струй в приземном слое воздуха. «Журнал технической физики». Вып. 14, 1955.
39. Андреев П. И. Распространение тепла и влаги в цехах промышленных предприятий. М., Госстройиздат, 1955.
40. Батурин В. В., Эльтерман В. М. Аэрация промышленных зданий. М., Госстройиздат, 1953.
41. Реттер Э. И., Стриженов С. И. Аэродинамика зданий. М., Госстройиздат, 1968.
42. Ливчак И. Ф. Вентиляция многоэтажных жилых домов. М., Госстройиздат, 1951.
43. Булгаков Е. И., Довжик Г. А., Ильинский В. М. (ЦНИПС). Технические условия на строительное проектирование основных цехов машиностроительных заводов. М., ОНТИ, 1938.
44. Шаламов Н. П. и др. В сб. «Защита строительных конструкций предприятий черной металлургии». М., Госстройиздат, 1962.
45. Васильев Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий. М., Госстройиздат, 1957.
46. Шкловер А. М. В сб.: «Исследования по строительной физике». М., Госстройиздат, 1959.
47. Ильинский В. М. Климатические воздействия на ограждающие конструкции зданий. В сб.: «Исследования по строительной физике». М., Госстройиздат, 1949.
48. Гусев Н. М. Естественное освещение зданий. М., Госстройиздат, 1961.

К главам IV и V

49. Власов О. Е. Основы строительной теплотехники. ВИА РККА, 1938.
50. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., Гостехнотеоретиздат, 1952, 1967.
51. Ильинский В. М. Проектирование ограждающих конструкций зданий (с учетом физико-климатических воздействий). М., Стройиздат, 1965.

52. Брилинг Р. Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М., Стройиздат, 1948.
53. Ивашкова В. К. Исследование теплотехнических свойств ограждающих конструкций методом электромоделирования. М., Стройиздат, 1960.
54. Шкловер А. М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. М., Госэнергоиздат, 1961.
55. Ушков Ф. В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. М., Стройиздат, 1969.
56. Станкявичус. Исследования теплотехнических свойств стеновых панелей из ячеистого бетона. Канд. дисс., Каунас, 1963.
57. Титов В. П. Учет воздухопроницаемости стыков панелей при теплотехническом расчете ограждений. В сб.: «Сантехпроект», 4(8), 1961.
58. Cadiergues M. R. Annales de L'institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Septembre, 1953.
59. Cammerer I. S. Wärme und Kälteschutz in der Industrie, 1951.
60. Гиндоян А. Г. Теплотехнические основы проектирования полов из полимерных материалов. М., Стройиздат, 1969.
61. Нигматов И. И. Наружные ограждения жилых зданий в условиях жаркого климата Таджикистана. Канд. дисс., М., 1969.

К главе VI

62. Ребиндер П. А. В сб.: «Сушка и увлажнение строительных материалов и конструкций». М., Профиздат, 1958.
63. Брунауэр. Адсорбция газов и паров. Изд-во иностр. лит., 1948.
64. Schäke H. Die Durchfeuchtung von Baustoffen und Bauteilen auf Grund des Diffusionsvorganges und ihre rechnerische Abschätzung, Gesundheits-Ingenieur, Heft 5—6, 1953.
65. Ильинский В. М. Расчет влажностного состояния ограждающих конструкций при диффузии водяного пара. «Промышленное строительство», 1962, № 2.
66. Ильинский В. М. Коэффициенты переноса водяного пара для расчета влажностного состояния ограждающих конструкций зданий. Инженерно-физический журнал. Т. 8, 1965, № 2.
67. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М., Гостехнотеоретиздат, 1954.
68. Лыков А. В. Теория сушки. М., Госэнергоиздат, 1968.
69. Кришер О. Научные основы техники сушки. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
70. Цимерманис Л. Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел. Южно-Уральское книжное издательство, Челябинск, 1971.
71. Хелемский А. М. Исследование пароизоляционных материалов и покрытий ограждающих конструкций холодильников. Канд. дисс., Одесса, 1970.

К главе VII

72. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. М., «Знание», 1957.
73. Кузнецов В. Д. Кристаллы и кристаллизация. М., Гостехнотеоретиздат, 1954.
74. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Изд-во АН СССР, 1966.
75. Беррер Р. Диффузия в твердых телах. М., Изд-во иностр. лит., 1948.
76. Доброхотов Н. Н. К динамике диффузионных процессов. Киев, Изд-во АН УССР, 1948.
77. Мощанский Н. А. Плотность и стойкость бетонов. Госстройиздат, 1951.
78. Борн Макс. Атомная физика. М., Изд-во «Мир», 1970.
79. Королев М. М. К вопросу о напряжениях, возникающих в бетоне под действием попеременного увлажнения и высыхания. Ленинград, «Известия ВНИИГ», т. 43, 1950.
80. Залесский Б. В., Степанов В. Я., Флоренский К. П. М., «Труды АН СССР», сер. петрографическая, 121, 122, 1950.

81. Мощанский Н. А., Медведев В. М. Долговечность бетона и железобетона. М., «Известия Академии строительства и архитектуры СССР», 1959, № 4.

82. Власов О. Е., Еремеев Г. Г. и др. Долговечность ограждающих и строительных конструкций. М., Госстройиздат, 1963.

83. Баркаускас В. И. Изменение физико-механических свойств некоторых облицовочных материалов под воздействием климата. Труды АН Литовской ССР, сер. Б, 2, 1958.

84. Колотилкин Б. М. Проблемы долговечности и надежности жилых зданий. М., «Знание», 1969.

85. Векслер Л. Б. Зимние температурные воздействия в Приморском Крае и их влияние на долговечность крупнопанельных стен. Канд. дисс., Владивосток, 1969.

86. Гончаров А. К. Исследование смещения нулевой изотермы в однослойной наружной стене. В сб.: НИИ Строительной физики. М., 1966.

87. Абрагам. Асфальты и родственные им материалы. Гл. XXXVII «Изменения прочности кровельных материалов во времени». Нью-Йорк, 1945.

88. Маковецкий А. И. Исследование сроков службы наружной отделки гражданских зданий. Канд. дисс., М., 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

Глава I. **Процессы теплообмена и массообмена в зданиях и их конструкциях**

§ 1. Различия процессов переноса тепла и вещества 8
§ 2. Температурное поле и его изменения 12
§ 3. Виды распространения тепла 15
§ 4. Уравнения теплопроводности и температурного поля 16
§ 5. Понятия о критериях подобия физических процессов 20
§ 6. Особенности теплообмена на поверхностях ограждающих конструкций 23
§ 7. Теплопроводность строительных материалов 29
§ 8. Термическое сопротивление конструкций 35
§ 9. Термическое сопротивление воздушных прослоек 39
§ 10. Основные закономерности влагообмена 44

Глава II. **Внешние физико-климатические воздействия на здания**

§ 1. Особенности проектирования зданий и их ограждений в различных климатах СССР 49
§ 2. Расчетные температуры в холодный период года 58
§ 3. Сочетание низких температур с ветром 62
§ 4. Расчетные данные для теплого периода года 66
§ 5. Влажностно-климатическое зонирование районов строительства . . . 73
§ 6. Перенос снега и эксплуатационные качества зданий 81

Глава III. **Микроклимат помещений**

§ 1. Классификация помещений по особенностям микроклимата 90
§ 2. Распределение аэродинамических давлений и естественный воздухообмен в помещениях 100
§ 3. Распределение тепла и влаги в помещениях 117
§ 4. Колебания температуры и влажности в помещениях 129

Глава IV. **Необходимые теплозащитные свойства ограждающих конструкций**

§ 1. Сопротивление теплопередаче конструкций однородных в теплофизическом отношении 138
§ 2. Сопротивление теплопередаче неоднородных конструкций 141
§ 3. Двумерные температурные поля и их моделирование 147
§ 4. Расчет теплопроводных включений в ограждающих конструкциях . 154
§ 5. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций 166

Глава V. **Теплоустойчивость ограждающих конструкций и помещений**

§ 1. Необходимость расчетов при неустановившемся потоке тепла . . . 183
§ 2. Понятия о теории теплоустойчивости 184
§ 3. Изменения температур ограждающих конструкций в летний период . 193
§ 4. Теплофизические свойства полов 201
§ 5. Теплоустойчивость помещений 205

Глава VI. **Влажностное состояние ограждающих конструкций**

§ 1. Физические причины увлажнения и изменений влажностного состояния конструкций 216

§ 2. Основные параметры влажного воздуха 219
§ 3. Связь влаги со строительными материалами 224
§ 4. Сорбционные процессы 227
§ 5. Закономерности перемещений влаги в капиллярно-пористых материалах 235
§ 6. Расчет ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения 248
§ 7. Понятия об уточненных методах расчета влажностного состояния ограждающих конструкций в неустановившихся условиях 260
§ 8. Изменения влажностного состояния конструкций в зависимости от начального влагосодержания и климата 264

Глава VII. **Долговечность ограждающих конструкций и зданий**

§ 1. Понятие и методы изучения долговечности 273
§ 2. Характерные периоды износа конструкций 285
§ 3. Повышение долговечности элементов зданий строительными мероприятиями 288
Таблица перевода размерностей теплофизических величин 297

Приложения

Приложение 1 298
Приложение 2 299
Приложение 3 306
Приложение 4 309
Приложение 5 310
Приложение 6 311
Литература 314

Ильинский Владимир Михайлович

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Редактор Ж. А. Тартаковская
Художник Б. А. Школьник
Художественный редактор В. П. Бабикова
Технический редактор Э. М. Чижевский
Корректор Н. С. Логунова

Т-02266. Сдано в наб. 10/V-73 г. Подп. к печ. 10/XII-73 г.
Формат 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 3. Объем 20 печ. л.
+ вкл. 0,36 п. л. Уч.-изд. л. 22,85. Изд. № СТР 193
Тираж. 18.000 экз. Цена 75 коп.
БЗ—25—16 от 30/III—73 г.
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7. Зак. 3106.

Параметры хранения и OSR

Оцифрованный вариант издания хранится в «Электронной библиотеке строителя».

Доступ в «Электронную библиотеку строителя» свободный, бесплатный, беспарольный и без каких либо предварительных условий по электронному адресу:
www.allbeton.ru

Оцифровку издания осуществляли:

Сергей Ружинский
Юрий Ружинский
Александр Раенко

МП «Городок»
ул. Чкалова 1
г. Харьков
Украина

тел/факс +38 (057) 315-32-63
E-mail: rygınski@aport.ru

дата последней редакции - 23.03.06