К. Ф. ФОКИН,
доктор технических наук

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА ОГРАЖДАЮЩИХ ЧАСТЕЙ ЗДАНИЙ

Издание 4-е, переработанное и дополненное

СТРОЙИЗДАТ МОСКВА—1973

тие поверхности масляной краской с тщательной подготовкой[1], смоляными лаками и т. д. Влага, конденсирующаяся при этом на внутренней поверхности ограждения, не сможет повысить его влажность

На характер конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения кроме температуры ее оказывает влияние также обработка этой поверхности. Например, на некрашеных деревянных поверхностях конденсация влаги начинается при температуре более низкой, чем точка росы. Структура внутренней штукатурки также оказывает большое влияние на появление видимой конденсации на поверхности ограждения. В то время как на поверхности, покрытой плотной цементной штукатуркой или масляной краской, капли росы появляются сразу же с понижением температуры ниже точки росы, на поверхности, покрытой пористой известковой штукатуркой, это явление начинается значительно позднее. Объясняется это тем, что при наступлении процесса конденсации влага впитывается штукатуркой и на поверхности ограждения нет видимого стекания конденсата. Только после того как штукатурка достаточно увлажнится, на поверхности ограждения появится сырость. Если условия конденсации наступают редко и действуют непродолжительно, например в зрительных залах театров и кино, при случайных перерывах в отоплении и т. д., на пористой штукатурке не образуется видимого увлажнения, а влага, впитанная ею за этот период, легко отдается, когда условия конденсации исчезнут. Таким образом, пористая штукатурка является как бы автоматическим регулятором влажностного режима внутренней поверхности ограждения. В этом отношении пористый материал на внутренней поверхности ограждения имеет преимущество перед плотной штукатуркой. Однако, если конденсация влаги продолжается долго, пористая штукатурка становится сырой и для высыхания ее требуется много времени.

4. СОРБЦИЯ И ДЕСОРБЦИЯ

Образец строительного материала, высушенный до постоянного веса, т. е. имеющий влажность, равную нулю, помещенный в атмосферу воздуха, имеющего хотя бы и незначительное влагосодержание, приобретает некоторую влажность. Эта влажность будет тем большей, чем больше относительная влажность воздуха, окружающего материал, и чем ниже его температура. При этом увеличение влажности материала происходит в результате поглощения влаги из окружающего воздуха, находя-

[1] Покрытие масляной краской дает надежный водоизолирующий слой лишь в том случае, если краска будет нанесена на сухую поверхность после тщательной шпаклевки ее. Нанесение масляной краски на сырую поверхность не дает желаемых результатов, так как слой краски окажется непрочным вследствие вздутия его и отслаивания от поверхности ограждения.

УДК 697.1 : 536.2 : 69.022

Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1973, с. 287.

Книга содержит подробное изложение теплотехнических свойств строительных материалов, теплопередачи при стационарном и нестационарном тепловом потоке, расчета плоских и пространственных температурных полей, воздухопроницания ограждений, особенностей теплотехнического режима отдельных частей наружных ограждений, влажностного режима ограждений при увлажнении их жидкой и парообразной влагой. Изложение поясняется большим количеством числовых примеров.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных организаций.

Табл. 38, ил. 84, список лит. 43 назв.

Научный редактор — д-р техн. наук Ф. В. УШКОВ

© СТРОЙИЗДАТ, 1973

Ф $\frac{0325-340}{047(01)-73}$ 98—73

щейся в нем в виде водяного пара. Это явление носит название сорбции. Процесс сорбции не требует разности температур воздуха и материала, следовательно, он не связан с температурной конденсацией.

Понятие сорбции охватывает два явления поглощения материалом водяного пара: 1) поглощение пара поверхностью его пор в результате соударения молекул пара с поверхностью пор и как бы прилипания их к этой поверхности; это явление носит название адсорбции и имеет превалирующее значение; 2) пог-

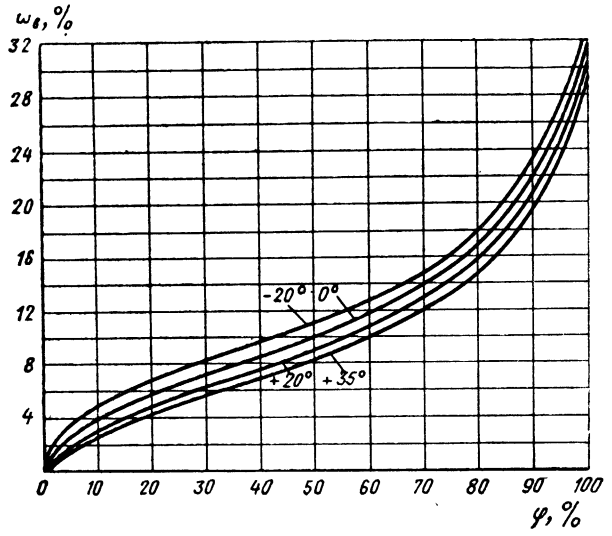
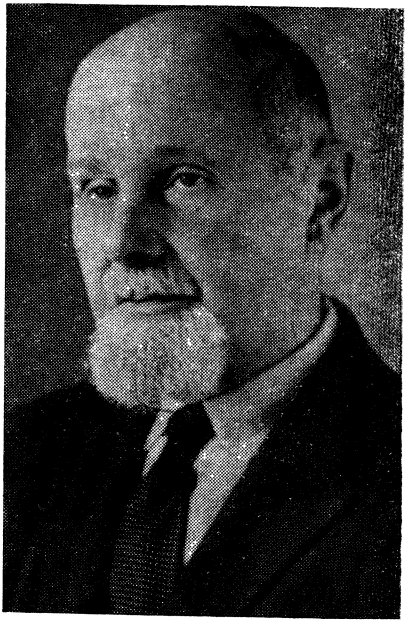


Рис. 62. Изотерма сорбции водяного пара древесиной

лощение пара, состоящее в прямом растворении его в объеме твердого тела; это явление называется абсорбцией. Во многих случаях разграничение этих явлений представляет задачу чрезвычайно трудную, а порой и неразрешимую. По этой причине было предложено для объединения этих явлений укороченное название «сорбция» в качестве термина, не заключающего в себе определенной физической гипотезы. Этот термин и принят в дальнейшем изложении для строительных материалов, в которых в основном преобладает явление адсорбции.

Зависимость между влажностью материала и относительной упругостью водяного пара (относительной влажностью воздуха) изображается графически в виде изотерм сорбции. Изотермы сорбции для дерева (рис. 62), построенные по данным Н. Н. Чулицкого, показывают, что влажность дерева увеличивается с повышением относительной упругости водяного пара и понижением температуры. Если у дерева влияние температуры на величину сорбционного увлажнения оказывается большим, то у других материалов (например, у кирпича, фиброли-

Доктор технических наук Константин Федорович Фокин (11.VI.1896—2.VIII.1972)



Константин Федорович Фокин родился в г. Иваново-Вознесенске в семье служащего ткацкой мануфактуры. Высшее образование получил на инженерно-строительном факультете Московского высшего технического училища.

Научную деятельность К. Ф. Фокин начал в Государственном институте сооружений (впоследствии ЦНИПС) в 1927 г. будучи уже сформировавшимся инженером. За время работы в ЦНИПС им созданы фундаментальные труды, которые легли в основу нового раздела строительной физики — строительной теплотехники. На этих трудах воспитывалось не одно поколение инженеров-строителей.

К. Ф. Фокин наряду с такими ученым, как О. Е. Власов, Б. Ф. Васильев, А. М. Шкловер, является одним из создателей отечественной строительной теплотехники. Им организованы и проведены первые натурные теплофизические исследования в жилых домах, выполнены крупные исследования влажностного режима ограждающих конструкций, температурных полей узлов ограждающих конструкций, предложена методика определения расчетных зимних температур наружного воздуха. Эти исследования завершились разработкой общей теории конструирования

та) это влияние незначительно. В результате сорбции весовая влажность древесины может повыситься до 32,7%.

Неорганические материалы обладают меньшей сорбционной способностью сравнительно с материалами органическими. На рис. 63 приведены изотермы сорбции обычного глиняного кирпича и минеральной ваты, у которых предел сорбционного увлажнения не превышает 0,6%. При близких значениях предела сорбционного увлажнения кирпича и минеральной ваты характер изотерм у них различный.

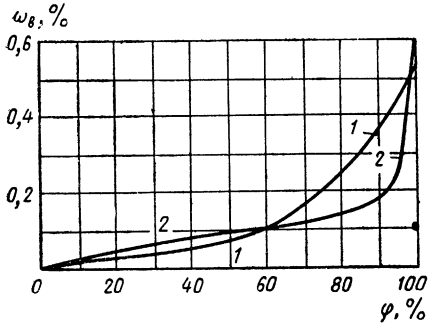


Рис. 63. Изотермы сорбции водяного пара

1 — глиняным обыкновенным кирпичом; *2*—минеральной ватой

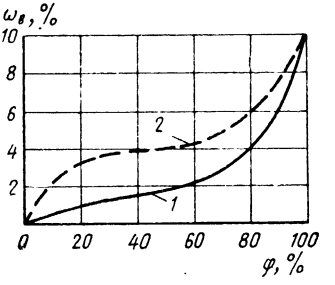


Рис. 64. Изотермы сорбции *1* и десорбции *2* водяного пара пеносиликатом

Для сравнения между собой сорбционной способности строительных материалов нагляднее сравнить их объемные влажности. Для строительных материалов предел сорбционного увлажнения изменяется в широких пределах. Так, при 0° наименьший предел сорбционного увлажнения (в объемных влажностях) имеет минеральная вата $\omega_0=0{,}13\%$, а наибольший — древесина $\omega_0=15{,}7\%$.

Для получения изотерм сорбции образцы материалов, предварительно высушенные, помещают в эксикаторы с растворами серной кислоты различных концентраций, дающих различные относительные влажности воздуха. Образцы выдерживаются в эксикаторах до приобретения ими постоянного веса. Если в эксикаторы поместить влажные образцы, то они будут отдавать влагу воздуху, содержащемуся в эксикаторах; это явление носит название «десорбция».

Для подавляющего числа строительных материалов изотермы сорбции и десорбции не совпадают. На рис. 64 приведены изотермы сорбции и десорбции пеносиликата объемного веса 700 *кг/м*^{3} (по данным Р. П. Рейзмана). Рис. 64 показывает, что при относительной упругости водяного пара $\varphi=60\%$ при сорбции пеносиликат имеет весовую влажность $\omega_в=2{,}1\%$, а при десорбции $\omega_в=4{,}3\%$, т. е. в этом случае сорбционный гистере-

зис равен 2,2% весовой влажности. Сорбционный гистерезис объясняется наличием адсорбированного слоя воздуха и неполным смачиванием стенок капилляров при адсорбции, вследствие чего в материале образуются мениски жидкости различные при сорбции и при десорбции. При этом будут и различными величины отношений максимальной упругости водяного пара над мениском жидкости и над плоской ее поверхностью (табл. 22).

На основании изложенного в расчетах влажностного режима ограждений нужно было бы пользоваться: при увлажнении материалов — изотермами сорбции, а при высыхании — изотермами десорбции. Однако ввиду отсутствия данных по десорбции строительных материалов в расчетах влажностного режима ограждений приходится пользоваться только изотермами сорбции.

В процессе сорбции водяного пара можно различить три стадии: 1-я стадия, когда на поверхности пор образуется только мономолекулярный (однослойный) адсорбированный слой. На изотермах сорбции этот период соответствует той их части, где выпуклость обращена вверх; 2-я стадия, когда на поверхностях, ограничивающих поры, образуется полимолекулярный (многослойный) адсорбированный слой. Влага в этом слое является связанной и находится в сжатом состоянии, чем и отличается от свободной капиллярной влаги. 3-я стадия, когда к адсорбции присоединяется явление капиллярной конденсации. На изотермах сорбции это соответствует резкому увеличению влажности материала.

Причиной капиллярной конденсации является то, что максимальная упругость водяного пара над вогнутой поверхностью воды меньше, чем над плоскостью. В капиллярах малого радиуса, а также в местах контакта отдельных частиц влага образует вогнутые мениски, над которыми максимальная упругость водяного пара будет меньше, чем над плоской поверхностью. Этим и объясняется возможность конденсации водяного пара в капиллярах малого радиуса и в местах контактов отдельных частиц материала. Чем меньше будет радиус мениска жидкости, тем больше будет разница в максимальных упругостях водяного пара над ними по сравнению с упругостью над плоской поверхностью. Для иллюстрации этого различия в табл. 22 приведены величины отношений максимальной упругости водяного пара над вогнутой поверхностью $E_{\text{вогн}}$ к максимальной упругости над плоскостью $E_{\text{пл}}$ при одной и той же температуре.

Таблица 22

Понижение упругости водяного пара над вогнутой поверхностью

Радиус мениска воды в *мк*	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,003	0,001
Отношение $E_{\text{вогн}} : E_{\text{пл}}$	0,99	0,98	0,96	0,9	0,82	0,71	0,36

ограждающих конструкций зданий и сделали имя ученого широко известным инженерам-строителям.

К. Ф. Фокиным совместно с профессором О. Е. Власовым были разработаны первые в СССР нормы строительной теплотехники, изданные в 1929 г. Все последующие редакции норм подготавливались при участии Константина Федоровича.

Как подлинный ученый К. Ф. Фокин всегда стремился, чтобы основные положения прикладной науки органически сочетались с практикой, проверявшей развиваемые теории.

Начиная с 1928 г. К. Ф. Фокин является членом ученых советов ряда вузов, научно-исследовательских, проектных и строительных организаций — МИСИ им. В. В. Куйбышева, ЦНИПС, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, ЦНИИ МПС, НИИСФ, МНИИТЭП, Моспроект, НИИМосстроя, Главмосстроя и др.; участвует в разработке ограждающих конструкций уникальных зданий в Москве — Кремлевского Дворца съездов, высотных зданий, а также гостиниц «Россия», «Националь», института «Гидропроект» и др.

Огромный практический опыт ученого использовался при разработке проектов сохранности мемориальных комплексов и памятников старины (Останкинского дворца, кремля во Владимире и др.). К. Ф. Фокин активно сотрудничал в научно-техническом совете Министерства культуры СССР по охране памятников.

Многолетняя научная и практическая деятельность К. Ф. Фокина в НИИМосстроя Мосгорисполкома оказала большое влияние на развитие современного индустриального жилищного строительства и непосредственно на совершенствование крупнопанельного домостроения в Москве.

Инженеры старшего поколения помнят содержательные лекции К. Ф. Фокина в Московском инженерно-строительном и архитектурном институтах, прививше научный подход к проектированию ограждающих конструкций зданий. Многие специалисты повседневно обращаются к трудам ученого, без которых невозможно правильное решение ряда проблем, выдвигаемых практикой строительства.

Книга К. Ф. Фокина «Строительная теплотехника ограждающих частей зданий» с 1933 г. (1-е издание) служит практическим пособием для проектировщиков и студентов. Книга содействовала закреплению приоритета нашей страны в области теплотехнических исследований и наряду с многочисленными трудами принесла Константину Федоровичу Фокину мировую известность. Настоящее издание подготовлено самим автором.

Д-ра техн. наук профессора Г. Г. Булычев, В. М. Ильинский, В. М. Предтеченский, Э. И. Реттер, д-р техн. наук Ф. В. Ушков, канд. техн. наук В. Р. Хлевчук

Таблица показывает, что капиллярная конденсация может быть только в капиллярах очень малого диаметра. При диаметре узкого места капилляра, большем 0,2 μ ($2 \cdot 10^{-5}$ *см*), капиллярной конденсации в нем быть не может.

Все три стадии сорбции наглядно видны на изотерме сорбции минеральной ваты (рис. 63): при относительной упругости водяного пара от 0 до 15% — мономолекулярная адсорбция, от 15 до 90% — полимолекулярная адсорбция и при относительной упругости от 90 до 100% — капиллярная конденсация.

У некоторых материалов, например у глиняного кирпича, такого четкого различия стадий сорбции не наблюдается.

В приложении 4 приведены данные по сорбционному увлажнению строительных материалов. На основании этих данных могут быть построены изотермы сорбции, необходимые при расчетах влажностного режима ограждений.

Изотермы сорбции показывают, что определенной влажности материала соответствует определенная относительная упругость водяного пара в его порах. Следовательно, для изменения относительной упругости водяного пара в порах материала необходимо изменить его влагосодержание. Здесь мы имеем некоторую аналогию с теплоемкостью материала и можем говорить об удельной пароемкости материала, понимая под этим количество водяного пара в граммах, которое необходимо сообщить 1 *кг* материала, чтобы повысить упругость пара в его порах на 1 *мм рт. ст.* Изотермы показывают, что эта величина не постоянная, а зависит от температуры и относительной упругости пара в порах материала. Кроме того, повышение упругости возможно только до предела, которым является максимальная упругость водяного пара, соответствующая данной температуре.

В курсах строительных материалов встречается понятие гигроскопичность. Для определения гигроскопичности кубик материала размером 7×7×7 *см*, предварительно высушенный до постоянного веса, помещают в эксикатор с дистиллированной водой и выдерживают в нем в течение 10 суток, после чего определяют его влажность, которая и представляет собой характеристику гигроскопичности материала. Таким образом, здесь мы имеем дело с незаконченным процессом сорбции при относительной упругости водяного пара, равной 100%. Гигроскопичность есть условное понятие, дающее сравнительную характеристику оценки скорости сорбции водяного пара строительными материалами в первые 10 дней при относительной упругости водяного пара, равной 100%, и для образцов установленного размера.

Строительная теплотехника занимается изучением теплопередачи и воздухопроницания через ограждающие конструкции зданий, а также влажностного режима ограждающих конструкций, связанного с процессами теплопередачи.

Знание строительной теплотехники необходимо строителям для рационального проектирования наружных ограждающих конструкций. Особенно большое значение имеет знание строительной теплотехники для современного строительства, в котором широко применяются сборные облегченные конструкции из новых эффективных материалов.

От теплотехнических качеств наружных ограждений зданий зависят: а) в отапливаемых зданиях — количество тепла, теряемого зданием в зимний период; б) в холодильниках — количество холода, теряемого в летнее время, а следовательно, необходимая мощность холодильной установки и стоимость эксплуатации холодильника; в) постоянство температуры воздуха в здании во времени при неравномерной отдаче тепла системой отопления; г) защита здания от перегрева в летнее время, особенно в южных районах СССР; д) температура внутренней поверхности ограждения, гарантирующая от образования на ней конденсата; е) влажностный режим ограждения, влияющий на теплозащитные качества ограждения и его долговечность.

Только ясное представление о процессах, происходящих в ограждениях при теплопередаче, и умение пользоваться соответствующими расчетами дают возможность проектировщику обеспечить требуемые теплотехнические качества наружных ограждающих конструкций.

Строительная теплотехника как раздел строительной физики создана в СССР за последние 45 лет советскими учеными, работы которых обеспечили нашей стране приоритет и ведущее положение в мировой науке. Книга проф. В. Д. Мачинского «Теплотехнические основы гражданского строительства», вышедшая в 1925 г., была первой работой по строительной теплотехнике. Большое влияние на развитие строительной теплотехники оказали работы проф. О. Е. Власова, особенно его труд по теплоустойчивости ограждающих конструкций и исследования влажностного режима. На базе теории теплоустойчивости О. Е. Власова канд. техн. наук А. М. Шкловер разработал метод расчета зату-

Глава X. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ В ОГРАЖДЕНИИ ПАРООБРАЗНОЙ ВЛАГИ

Отсутствие конденсации влаги на внутренней поверхности не гарантирует ограждение от увлажнения, так как оно может происходить вследствие сорбции и конденсации водяных паров в толще самого ограждения. В большинстве случаев это и является причиной повышения влажности материалов ограждения.

1. ПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ

В зимнее время температура воздуха с внутренней стороны ограждения бывает значительно выше температуры наружного воздуха. Если при этом предположить, что относительные влажности внутреннего и наружного воздуха будут одинаковыми, то упругость водяного пара с внутренней стороны ограждения окажется значительно более высокой, чем с наружной его стороны. Таким образом, в зимнее время наружное ограждение отапливаемых зданий разделяет две воздушные среды с одинаковым барометрическим давлением, но с разными значениями упругости (парциальными давлениями) водяного пара. Разность величин упругости водяного пара в обычных условиях может достигать 10 *мм рт. ст.*, а в зданиях с повышенной температурой и высокой относительной влажностью воздуха может быть и значительно выше.

Разность величин упругости водяного пара с одной и с другой стороны ограждения вызывает поток водяного пара через ограждение от внутренней его стороны к наружной стороне. Это явление носит название диффузии водяного пара через ограждение. Таким образом, в зимнее время водяной пар диффундирует через ограждение из помещения наружу. В летнее время при более холодном воздухе внутри помещения (холодильники) диффузия водяного пара может идти в обратном направлении, но это явление будет выражено значительно слабее вследствие меньшей разности температур и меньшей относительной влажности наружного воздуха. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать преимущественно диффузию водяного пара через ограждение в зимнее время.

Одновременно с диффузией водяного пара через ограждение в обратном направлении, т. е. от наружной к внутренней стороне ограждения, диффундирует воздух. Причина диффузии воздуха — разность парциальных давлений газов, составляющих воздушную атмосферу, причем эти парциальные давления будут более высокими с наружной стороны ограждения из-за меньшего парциального давления водяного пара с этой стороны ограждения. В этом и заключается принципиальное различие между диффузией и воздухопроницаемостью. При воздухопро-

хания температурных колебаний в ограждении и колебаний температуры воздуха в здании, а проф. Л. А. Семенов — практический метод расчета колебаний температуры воздуха в помещении при печном отоплении.

Практический метод расчета влажностного режима ограждений при увлажнении их парообразной и жидкой влагой, метод расчета температурных полей в ограждающих конструкциях, методика определения расчетных температур наружного воздуха разработаны автором книги. Канд. техн. наук Р. Е. Брилинг разработал вопросы воздухопроницания ограждений, а также миграции влаги в строительных материалах. Разработке теории проектирования ограждающих конструкций, а также созданию основ строительной климатологии и климатического районирования территории СССР посвящены работы проф. В. М. Ильинского. Большой вклад в строительную теплотехнику внесли работы докторов техн. наук В. Н. Богословского, Ф. В. Ушкова, А. У. Франчука.

В книге для пояснения изложенных методов расчета приводится большое количество числовых примеров. В этих примерах рассматриваются современные конструкции крупнопанельных зданий и конструкции с применением кирпича, мелкоразмерных штучных материалов и древесины, освоенных и ставших в городском строительстве традиционными, а в условиях широкого развития сельского строительства приобретающие особое значение. В методическом отношении эти примеры подобраны так, что могут быть использованы при теплотехнических расчетах и оперативной оценке новых конструктивных решений ограждений с применением высокоэффективных утеплителей. На основании результатов числовых примеров могут быть установлены общие принципы конструирования ограждений, обладающих необходимой экономичностью и долговечностью.

ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Q — количество тепла в *ккал* или плотность теплового потока в *ккал/м²·ч*;
t — температура воздуха в *град*;
$t_в$ — температура внутреннего воздуха в *град*;
$t_н$ — температура наружного воздуха в *град*;
T — абсолютная температура в °К ($T = t°\,C + 273,16°$);
τ — температура материала или поверхности ограждения в *град*;
$\tau_в$ — температура внутренней поверхности ограждения в *град*;
$\tau_н$ — температура наружной поверхности ограждения в *град*;
$\tau_р$ — температура точки росы в *град*;
A_t — амплитуда колебания температуры воздуха в *град*;
$A\tau$ — амплитуда колебания температуры поверхности в *град*;
λ — коэффициент теплопроводности материала в *ккал/м·ч·град*;
$\lambda_э$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки в *ккал/м·ч·град*;
c — удельная теплоемкость материала в *ккал/кг·град*;
g — удельный вес материала в *кг/м³*;
γ — объемный вес материала в *кг/м³*;
a — коэффициент температуропроводности материала в *м²/ч*;
s — коэффициент теплоусвоения материала в *ккал/м²·ч·град*;
y — коэффициент теплоусвоения поверхности в *ккал/м²·ч·град*;
b — коэффициент тепловой активности материала в *ккал/м²·ч^{0,5}·град*;
C — коэффициент излучения материала в *ккал/м²·ч°К⁴*;
k — коэффициент теплопередачи ограждения в *ккал/м²·ч·град*;
R_0 — сопротивление теплопередаче ограждения в *град·м²·ч/ккал*;
R — термическое сопротивление слоя в *град·м²·ч/ккал*;
$\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией в *ккал/м²·ч·град*;
$\alpha_л$ — коэффициент теплоотдачи излучением в *ккал/м²·ч·град*;
$\alpha_в$ — коэффициент теплоотдачи (тепловосприятия) у внутренней поверхности в *ккал/м²·ч·град*;
$R_в$ — сопротивление тепловосприятию в *град·м²·ч/ккал*;
$\alpha_н$ — коэффициент теплоотдачи у наружной поверхности в *ккал/м²·ч·град*;
$R_н$ — сопротивление теплоотдаче в *ккал/м²·ч·град*;
D — характеристика тепловой инерции ограждения;
W — количество воздуха в *кг* или *кг/м²·ч*;
v — скорость движения воздуха в *м/сек*;
i — коэффициент воздухопроницаемости материала в *кг/м·ч·мм вод. ст.*;
Δp — разность давлений воздуха в *мм вод. ст.* или в *кгс/м²*;
$R_и$ — сопротивление воздухопроницанию слоя в *мм вод. ст.·ч·м²/кг*;
e — парциальное давление (упругость) водяного пара в *мм рт. ст.*;
E — давление (максимальная упругость) насыщенного водяного пара в *мм рт. ст.*;
f — абсолютная влажность воздуха в *г/м³*;
φ — относительная влажность воздуха в %;
$\omega_в$ — весовая влажность материала в %;
$\omega_о$ — объемная влажность материала в %;
μ — коэффициент паропроницаемости материала в *г/м·ч·мм рт. ст.*;

цицании происходит движение всей массы газа под влиянием разности полных давлений, при диффузии полные давления газа одинаковы, различны только их парциальные давления. Следовательно, диффузия есть чисто молекулярное явление, состоящее как бы во взаимной замене молекул одного газа молекулами другого газа.

Из физики известно, что между процессами диффузии газов и процессами теплопроводности имеется полная аналогия. Следовательно, все положения, на которых построены законы теплопроводности, вполне применимы и к явлениям диффузии водяного пара.

По аналогии с формулой (12) и для количества водяного пара, которое будет диффундировать в стационарных условиях через плоскую стенку, состоящую из однородного материала, можно написать:

$$P = (e_в - e_н)FZ\frac{\mu}{\delta}, \qquad (84)$$

где P — количество диффундирующего пара в *г*; $e_в$ и $e_н$ — упругости водяного пара с внутренней и с наружной стороны ограждения в *мм рт. ст.*; μ — коэффициент паропроницаемости материала в *г/м·ч·мм рт. ст.*

Формула (84) справедлива только при отсутствии конденсации водяного пара в стенке.

Коэффициент паропроницаемости материала μ зависит от физических свойств данного материала и отражает его способность проводить диффундирующий через него водяной пар. Коэффициент паропроницаемости материала аналогичен коэффициенту теплопроводности и определяет количество водяного пара в граммах, которое будет диффундировать в течение 1 *ч* через 1 $м^2$ плоской стенки толщиной 1 *м*, сделанной из данного материала, при разности упругости водяного пара с одной и с другой ее стороны, равной 1 *мм рт. ст.* *.

Расчетные значения величин коэффициентов паропроницаемости строительных материалов приведены в приложении 1. Наименьший коэффициент паропроницаемости имеет рубероид (μ=0,00018), наибольший — минеральная и стеклянная вата (μ=0,065). Оконное стекло и металлы являются паронепроницаемыми. Воздух имеет наибольший коэффициент паропрони-

* В физике коэффициент диффузии газа выражается количеством газа, проникающего за единицу времени через единицу поверхности при условии, что разность концентраций на двух поверхностях, отстоящих друг от друга на единицу длины, равна единице, и имеет размерность $см^2/сек$ или $м^2/ч$.

Для пересчета коэффициента диффузии из размерности $см^2/сек$ в размерность *г/м·ч·мм рт. ст.* необходимо его умножить на $0{,}36\frac{\gamma_t}{E_t}$, где γ_t — удельный вес водяного пара в $г/м^3$ и E_t — максимальная упругость его при температуре t.

$R_п$ — сопротивление паропроницанию слоя в *мм рт. ст.·ч·м²/г*;
ξ — удельная пароемкость материала в *г/кг·мм рт. ст.*;
ξ_0 — относительная пароемкость материала в *г/кг*;
β — коэффициент влагопроводности материала в *г/м·ч·%*;
P — плотность потока водяного пара в *г/м²·ч*;
G — плотность потока жидкой влаги в *г/м²·ч*;
δ — толщина слоя или ограждения в *м*;
F — площадь в *м²*;
v — объем в *м³* или *см³*;
z — время, часы или сутки.

цаемости, равный 0,083 (когда конвекционных токов нет), при конвекции воздуха он может достигать 0,135 *г/м·ч·мм рт. ст.*

Для одного и того же материала коэффициент паропроницаемости может изменяться в зависимости от температуры и влажности материала. С понижением температуры величина μ будет уменьшаться. Влияние влажности такое же: с повышением влажности материала повышается и его коэффициент паропроницаемости. Экспериментально в лабораторных условиях величины коэффициентов паропроницаемости обычно определяются при относительной упругости водяного пара 100% с одной стороны образца и 50—60% с другой стороны, т. е. при среднем значении относительной упругости пара в образце материала около 75—80%. Следовательно, приведенные в приложении 1 значения μ соответствуют сорбционной влажности материала $\varphi = 75$—80%.

Для определения коэффициентов паропроницаемости (μ_x) при меньшей влажности материала (ω_x) В. М. Ильинским предложена формула

$$\mu_x = \mu_{80} \frac{\omega_x}{\omega_{80}}, \qquad (85)$$

где μ_{80} — коэффициент паропроницаемости, соответствующий по изотерме сорбции относительной упругости пара 80%; ω_{80} — весовая влажность материала, соответствующая по изотерме сорбции относительной упругости пара 80%.

Выполненное В. М. Ильинским сравнение величин коэффициентов паропроницаемости, полученных шведскими исследователями Иогансоном и Эденхольмом для трех материалов при изменении их относительной упругости водяного пара от 30 до 70%, с данными, полученными по формуле (85), показало близкое совпадение этих величин.

Однако необходимо иметь в виду, что формулу (85) нельзя распространять на материалы, имеющие влажность более 80%, так как при этом для некоторых материалов получается μ большее μ воздуха, чего быть не может. Например, для цементного фибролита объемного веса 350 *кг/м*^{3} при сорбционной влажности 26,5%, соответствующей $\varphi = 100\%$, получим следующее значение μ. По изотерме сорбции фибролит имеет $\omega_{80} = 9{,}2\%$ (см. приложение 4). При $\varphi = 80\%$ фибролит имеет $\mu_{80} = 0{,}035$ *г/м·ч·мм рт. ст.* По формуле (85) при $\omega_{100} = 26{,}5\%$ получим:

$$\mu_{100} = 0{,}035 \frac{26{,}5}{9{,}2} = 0{,}101,$$

что на 22% больше коэффициента паропроницаемости воздуха, равного 0,083.

Исследования В. Плонского[1] по определению коэффициен-

[1] В. Плонский. Исследование паропроницаемости некоторых строительных материалов. В сб.: «Строительная теплофизика». Институт тепломассообмена АН БССР. «Энергия», 1966, стр. 220.

Часть I. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Глава I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Перемещение тепла в какой-либо среде возможно при условии, если температура в отдельных ее местах неодинакова. Разность температур в среде — необходимое условие для возникновения в ней теплопередачи, при этом перемещение тепла происходит в направлении более низкой температуры.

При разности температур воздуха внутри и снаружи здания происходит теплопередача через наружные ограждающие конструкции. Зимой в отапливаемых зданиях теплопередача происходит через наружные ограждения из здания; теряемое при этом зданием тепло возмещается теплом, подаваемым различными системами отопления. В зданиях холодильников в летний период теплопередача происходит в обратном направлении, т. е. внутрь здания. В холодильниках требуемая температура воздуха поддерживается холодильными машинами, в других зданиях — при помощи вентиляции, в зданиях специального назначения — системами кондиционирования воздуха.

Различают три вида теплопередачи: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Передача тепла *теплопроводностью* может происходить в твердой, жидкой и газообразной средах, однако в чистом виде она наблюдается только в сплошных твердых телах.

В твердых телах (диэлектриках) и в жидкостях энергия переносится упругими волнами, в газах — диффузией атомов или молекул, а в металлах — диффузией электронов. Подавляющее большинство строительных материалов представляет собой пористые тела, в порах которых возможны все виды теплопередачи; однако при теплотехнических расчетах можно считать, что распространение тепла в материалах происходит лишь по законам теплопроводности.

Конвекция может быть лишь в жидкой и газообразной средах. Конвекция представляет собой перенос тепла движущимися частицами жидкости или газа. Различают два вида конвекции: естественную, при которой движение частиц среды обусловливается разностью температур, а следовательно, и неодинаковой

та паропроницаемости девяти строительных материалов при влажности, соответствующей средним относительным значениям упругости водяного пара в образцах около 25 и 75%, показали, что коэффициенты паропроницаемости материалов в обоих случаях оказались одинаковыми, а для некоторых материалов (известковая штукатурка и пеностекло) μ_{25} даже больше, чем μ_{75}. На основании этих исследований В. Плонским сделан вывод, что зависимость коэффициентов паропроницаемости от влажности не выявлена и можно считать, что в пределах сорбционного увлажнения коэффициент паропроницаемости не зависит от влажности материала.

На основании сказанного можно считать, что в настоящее время нет достаточно надежного способа определения количественной зависимости коэффициента паропроницаемости материала от его влажности и в расчетах приходится принимать величины μ постоянными, не зависящими от влажности материала, тем более что в расчетах влажностного режима ограждающих конструкций обычно средняя влажность материала близка к его сорбционной влажности при $\varphi=80\%$.

Коэффициент паропроницаемости дерева зависит от направления диффузии пара по отношению к волокнам древесины. Для сплошной сосновой древесины (без трещин и щелей) коэффициент паропроницаемости равен: при направлении поперек волокон $\mu=0{,}0082$, а вдоль волокон $\mu=0{,}043$ *г/м·ч·мм рт. ст.*, т. е. в 5 раз больше. Обшивки из дерева или деревянные настилы обычно не бывают абсолютно плотными; это повышает их паропроницаемость через щели вследствие большой паропроницаемости воздуха, что необходимо учитывать при расчетах.

При диффузии водяного пара через слой материала последний оказывает сопротивление потоку пара, аналогичное сопротивлению тепловому потоку. Это сопротивление называется сопротивлением паропроницанию слоя $R_{\text{п}}$ в *мм рт. ст. ч·м²/г* и определяется по формуле

$$R_{\text{п}} = \frac{\delta}{\mu}, \tag{86}$$

где δ — толщина слоя в *м*.

Сопротивление паропроницанию показывает, какую необходимо создать разность упругости водяного пара (в *мм рт. ст.*) на поверхностях слоя, чтобы через 1 $м^2$ его диффундировал поток пара, равный 1 *г* в 1 *ч*.

Полное сопротивление $R_{\text{о.п}}$, которое оказывает ограждение потоку диффундирующего через него водяного пара, будет равно сумме сопротивлений отдельных слоев:

$$R_{\text{о.п}} = R_{\text{в.п}} + R_{1.\text{п}} + R_{2.\text{п}} + \ldots + R_{\text{п.п}} + R_{\text{н.п}} = R_{\text{в.п}} + \\ + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \ldots + \frac{\delta_n}{\mu_n} + R_{\text{г.п}}, \tag{87}$$

где $R_{1п}$, $R_{2п}$... — сопротивления паропроницанию отдельных слоев ограждения в *мм рт. ст·ч·м²/г*; n — число всех слоев ограждения; $R_{в.п}$ — сопротивление влагообмену внутренней поверхности ограждения в *мм рт. ст.·ч·м²/г*; $R_{н.п}$ — сопротивление влагообмену у наружной поверхности ограждения в *мм рт. ст·ч·м²/г*.

Сопротивления влагообмену аналогичны сопротивлениям тепловосприятию и теплоотдаче. Точных данных о значениях этих сопротивлений не имеется. В. М. Ильинским для определения величины сопротивления влагообмену у внутренней поверхности ограждения предложена формула

$$R_{в.п} = 1 - \frac{\varphi_в}{100}, \qquad (88)$$

где $\varphi_в$ — относительная влажность воздуха в помещении в %. Формула (88) показывает, что величина $R_{в.п}$ понижается с повышением влажности воздуха около поверхности ограждения.

Поскольку величина $R_{в.п}$ значительно меньше сопротивления паропроницанию отдельных слоев ограждения, для практических расчетов можно принимать следующие значения этих сопротивлений: у внутренней поверхности ограждения $R_{в.п}=0{,}2$; у наружной поверхности $R_{н.п}=0{,}1$ *мм рт. ст·ч·м²/г*.

Упругость водяного пара, диффундирующего через ограждение, в его толще будет понижаться от величины $e_в$ до величины $e_н$ вследствие сопротивления паропроницанию ограждения. При этом в ограждении, состоящем из одного материала, падение упругости водяного пара будет идти по прямой линии. В слоистом ограждении линия падения упругости водяного пара будет ломаной, причем более интенсивное падение упругости будет в слоях, состоящих из малопаропроницаемых материалов. Для построения линии падения упругости водяного пара в слоистом ограждении необходимо знать величины упругостей водяного пара на границах слоев ограждения. Упругость водяного пара на границах слоев ограждения определяется по формуле

$$e_n = e_в - \frac{e_в - e_н}{R_{о.п}} \Sigma_{n-1} R_п, \qquad (89)$$

где e_n — упругость водяного пара на внутренней поверхности любого n-го слоя ограждения; $\Sigma_{n-1}R_{n-1}$ — сумма сопротивлений паропроницанию $n-1$ первых слоев ограждения, считая от его внутренней поверхности, включая и сопротивление влагообмену у внутренней поверхности $R_{в.п}$.

Формулы (86), (87) и (89) так же как и формула (84), справедливы только при отсутствии конденсации пара внутри ограждения. При конденсации пара эти формулы справедливы только для тех слоев, в которых нет конденсации водяного пара.

плотностью среды, и вынужденную, при которой движение частиц вызывается внешними воздействиями (перемешивание среды, продувание воздуха вентилятором и пр.).

Излучение может происходить в газообразной среде или в пустоте. Тепловое излучение представляет собой перенос энергии в виде электромагнитных волн между двумя взаимно излучающими поверхностями. При этом происходит двойное превращение энергии: тепловой в лучистую на поверхности тела, излучающего тепло, и лучистой в тепловую на поверхности тела, поглощающего лучистое тепло.

При передаче тепла через ограждающие конструкции зданий теплопередача осуществляется главным образом теплопроводностью. Теплопередача конвекцией и излучением происходит в воздушных прослойках, а также у поверхностей, отделяющих конструкцию от внутреннего и наружного воздуха.

1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Аналитическая теория теплопроводности игнорирует молекулярное строение вещества и рассматривает его как сплошную массу.

Для вывода дифференциального уравнения теплопроводности рассмотрим сначала случай одномерной задачи, т. е. когда движение тепла происходит только в направлении одной из осей координат, например при передаче тепла через неограниченно протяженную плоскую стенку. Выделим внутри такой стенки бесконечно тонкий слой толщиной dx, в котором температура изменяется на величину dt. Если бы температура слоя не изменялась во времени, т. е. при стационарном тепловом потоке, то количество тепла, проходящего через 1 $м^2$ этого слоя в течение 1 $ч$, было бы равно:

$$Q_1 = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

где λ — коэффициент теплопроводности среды в $ккал/м \cdot ч \cdot град$*.

Отношение dt/dx носит название градиента температуры и имеет размерность $град/м$. Знак минус в правой части уравнения поставлен потому, что движение тепла происходит в направлении понижения температуры (отрицательный градиент температуры).

В общем случае (нестационарные условия теплопередачи) величина теплового потока при прохождении его через выделенный слой будет изменяться. Для определения величины изменения теплового потока по толщине слоя нужно предыдущее уравнение продифференцировать по dx, тогда получим:

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

* Размерность в системе СИ и переводные коэффициенты приведены в приложении 6.

Изменение величины теплового потока связано с поглощением или выделением тепла слоем при изменении его температуры во времени. Количество тепла dQ_2, необходимое для повышения температуры слоя толщиной dx на dt градусов за промежуток времени dz, будет пропорционально теплоемкости слоя, равной $c\gamma dx$, т. е.

$$dQ_2 = -c\gamma\, dx \frac{dt}{dz},$$

где c — удельная теплоемкость материала слоя в *ккал/кг·град.*

Знак минус в правой части этого уравнения поставлен потому, что повышение температуры слоя связано с поглощением им тепла и уменьшением величины теплового потока (dQ_2 — отрицательная величина).

Последнее уравнение может быть написано в частных производных в виде:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial x} = -c\gamma \frac{\partial t}{\partial z}; \qquad \text{(б)}$$

оно показывает изменение величины теплового потока по толщине слоя в результате аккумулирования им тепла.

Так как изменение величины теплового потока в слое при отсутствии в нем внутренних источников тепла является следствием только поглощения тепла слоем, величины $\frac{dQ_1}{dx}$ и $\frac{\partial Q_2}{\partial x}$ должны быть равны, откуда из уравнений (а) и (б) получим:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \qquad (1)$$

Это и есть дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного движения тепла, т. е. только в направлении одной из осей координат. Величина $\frac{\lambda}{c\gamma}$ носит название «коэффициента температуропроводности» материала, обозначается буквой a и имеет размерность $м^2/ч$.

Физический смысл уравнения (1) заключается в следующем. Левая часть уравнения представляет изменение температуры среды во времени. Производная, стоящая в правой части уравнения, дает пространственное изменение градиента температуры. Следовательно, уравнение (1) показывает, что в каждой точке среды изменение температуры во времени пропорционально пространственному изменению градиента температуры. Коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ является коэффициентом этой пропорциональности, следовательно, его физический смысл состоит в том, что он характеризует скорость выравнивания температуры в различных точках среды. Чем больше будет величина a, тем скорее все точки какого-либо тела при его остывании или нагреве достигнут одинаковой температуры.

Все изложенное относится только к условиям стационарного состояния диффузии водяного пара через ограждение, т. е. когда упругость водяного пара не изменяется во времени как в самом ограждении, так и в окружающем воздухе, а также когда температура в ограждении постоянна. Расчеты паропроницания при неустановившихся условиях диффузии водяного пара изложены далее в п. 3.

2. РАСЧЕТ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ДИФФУЗИИ ВОДЯНОГО ПАРА

Для расчетов влажностного режима наружных ограждений на увлажнение их парообразной влагой необходимо знать температуры и влажности внутреннего и наружного воздуха. Температура и влажность внутреннего воздуха принимаются те же, что и для расчетов конденсации на внутренней поверхности ограждения. Температура наружного воздуха берется более высокой по сравнению с расчетной температурой для теплотехнических расчетов, так как процессы диффузии водяного пара протекают значительно медленнее процессов теплопередачи и для наступления стационарных условий диффузии требуется более продолжительное время. Поэтому при расчетах влажностного режима по стационарным условиям обычно принимается средняя месячная температура наиболее холодного месяца. Относительная влажность наружного воздуха берется также равной средней влажности наиболее холодного месяца.

Диффундирующий через ограждение водяной пар будет внутри его понижать свою упругость и, кроме того, встречать на своем пути более холодные слои ограждения. В некоторых случаях падение упругости водяного пара и падение температуры в ограждении будут идти в такой последовательности, что конденсации влаги в толще ограждения не будет. В других же случаях, когда падение температуры в ограждении будет более интенсивным, чем падение упругости водяного пара, могут создаться условия, вызывающие конденсацию водяного пара в толще ограждения.

Расчет на конденсацию влаги в ограждении делается графически следующим образом. В ограждении строится линия падения температуры (линия τ). По температурной линии строится линия изменения максимальной упругости водяного пара в ограждении (линия E). Затем строится линия падения упругости водяного пара (линия e). Если линии E и e не пересекаются, то это указывает на отсутствие конденсации водяного пара в ограждении, так как при этом в любой плоскости ограждения действительная упругость водяного пара оказывается ниже максимальной упругости, что исключает возможность конденсации водяного пара. Если же линии E и e пересекаются, то это значит, что в ограждении возможна конденсация водяного пара.

В общем случае движение тепла может происходить во всех направлениях (по всем трем осям координат), тогда дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a\left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right]. \qquad (2)$$

Решение задач, связанных с передачей тепла теплопроводностью, сводится к интегрированию дифференциальных уравнений Фурье (1) и (2), при этом для того, чтобы найти постоянные интегрирования, необходимо знать граничные условия. Граничные условия разделяются на временные и пространственные. Временные граничные условия состоят в задании начального распределения температуры, т. е. распределения температуры в момент времени $z=0$. Пространственные граничные условия относятся к поверхностям, ограничивающим данную среду. Различают три рода граничных условий.

Граничное условие I рода — заданы распределение температуры на поверхности и ее изменение во времени. Это условие является наиболее простым, но в практике встречается редко.

Граничное условие II рода — заданы величины теплового потока, проходящего через поверхность, и его изменения во времени. Следовательно, в этом случае известен угол наклона касательной к температурной кривой в точке ее пересечения с поверхностью, но не величина температуры этой поверхности.

Граничное условие III рода — заданы температура среды, окружающей поверхность (обычно воздуха или жидкости), и закон теплообмена между поверхностью и окружающей средой. Это граничное условие наиболее сложное и вместе с тем наиболее распространенное в практических случаях.

Аналитическое решение дифференциальных уравнений теплопроводности представляет собой сложные математические задачи, которые в настоящее время могут быть решены с применением электронно-вычислительных машин. Точные инженерные решения имеются лишь для некоторых частных случаев и при ряде упрощающих предпосылок. В частности, из задач, имеющих значение для строительного проектирования, решены следующие:

1) остывания и нагревания однородной плоской стенки или цилиндра с одинаковой начальной температурой во всех точках в окружающей среде с постоянной температурой;

2) изменения температуры во времени в плоской стенке при гармонических колебаниях температуры окружающего воздуха;

3) изменения во времени температуры в плоской стенке неограниченной толщины при мгновенном изменении температуры на ее поверхности;

4) промерзания влажной почвы при условиях предыдущей задачи (в этом случае учитывается влияние на процесс теплопередачи изменения агрегатного состояния влаги почвы).

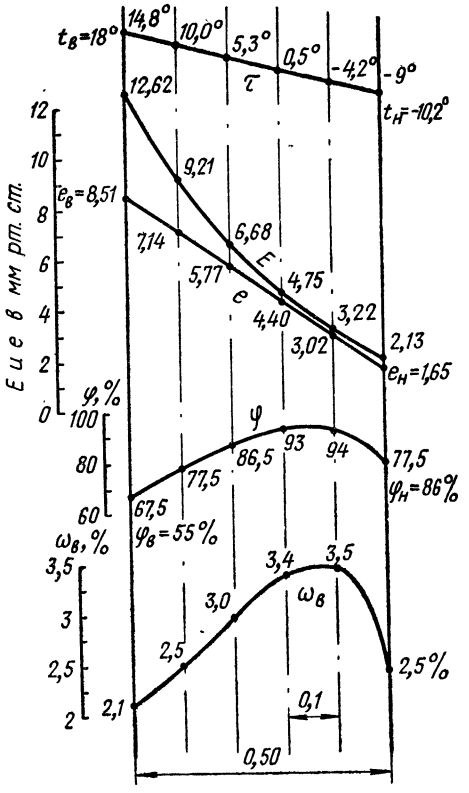


Рис. 65. Схема стационарного влажностного режима сплошной легкобетонной стены в зимний период

При этом для построения линии действительного изменения упругости водяного пара в ограждении из точек на поверхностях ограждения, соответствующих $e_в$ и $e_н$, проводятся касательные к линии максимальной упругости водяного пара. Между точками касания будет находиться зона конденсации, т. е. та часть ограждения, в которой будет конденсироваться водяной пар. Количество конденсата в ограждении определяется по разности количеств водяного пара, притекающего к зоне конденсации и уходящего от нее. Пояснение этого метода расчета дано в следующих примерах.

Пример 42. Рассчитать влажностный режим стены из легкого бетона толщиной 50 *см* при температурах и влажностях воздуха: внутреннего $t_в = 18°$, $φ_в = 55\%$, что дает $e_в = 8{,}51$ *мм рт. ст.*, наружного $t_н = -10{,}2°$, $φ_н = 86\%$, что дает $e_н = 1{,}65$ *мм**. Бетон объемного веса 1300 *кг/м*³ имеет: $λ = 0{,}5$ *ккал/м·ч·град* и $μ = 0{,}0145$ *г/м·ч·мм рт. ст.*

Сопротивление теплопередаче стены

$$R_0 = 0{,}133 + \frac{0{,}5}{0{,}5} + 0{,}05 = 1{,}183 \text{ град·м}^2\text{·ч/ккал}.$$

Сопротивление паропроницанию стены по формуле (86)

$$R_{о.п} = \frac{0{,}5}{0{,}0145} = 34{,}5 \text{ мм рт. ст·ч·м}^2\text{/г}^{**}.$$

На основании приведенных данных на рис. 65 построены температурная линия τ и линия упругости водяного пара *e* в стене. Для построения линии максимальной упругости водяного пара *E* разделим стену на произвольное число слоев. На рис.

* Условия января для Москвы.

** Сопротивления влагообмену $R_{в.п}$ и $R_{н.п}$ не учитываем ввиду их незначительности сравнительно с величиной $R_{о.п}$.

Значительно упрощается решение задач теплопередачи в частном случае при стационарных условиях. Стационарные условия теплопередачи характеризуются постоянством температуры среды во времени, при этом постоянной оказывается и величина теплового потока. Действительные условия теплопередачи далеки от стационарных, так как в натуре происходят колебания температуры наружного и внутреннего воздуха, а следовательно, и колебания величины теплового потока, проходящего через ограждающие конструкции зданий. Однако в некоторых случаях с точностью, допустимой в практических расчетах, можно считать теплопередачу через ограждающие конструкции стационарной. При этом температура воздуха в здании принимается осредненной за некоторый период времени (например, за сутки), а для наружной температуры устанавливается некоторое расчетное ее значение исходя из климатических условий данной местности и массивности ограждения. По стационарным условиям теплопередачи определяются: потери тепла зданием для установления требуемой мощности системы отопления, необходимые теплозащитные качества наружных ограждений, распределение температуры в ограждении и пр.

В стационарных условиях теплопередачи температура в любых точках среды остается постоянной во времени, следовательно, в уравнении (2) при этом будем иметь $\frac{\partial t}{\partial z}=0$, а так как в общем случае a не равно нулю, то нулю должно быть равно выражение, стоящее в скобках в правой части уравнения, т. е. для этого случая получим дифференциальное уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}=0. \qquad (3)$$

Это есть дифференциальное уравнение температурного поля в стационарных условиях теплопередачи, дающее решение задачи о распределении температуры в данной среде. Физический смысл уравнения (3) будет ясен, если каждое из слагаемых его левой части умножить на величину коэффициента теплопроводности среды λ, тогда каждое из слагаемых будет представлять собой величину изменения теплового потока в данной точке поля по одной из осей координат. Следовательно, сумма изменений величины теплового потока в любой точке поля должна быть равной нулю. Или, другими словами, сумма количеств тепла, притекающего к данной точке по всем направлениям, должна быть равна нулю. Это — основное условие так называемого «теплового баланса».

Для двухмерной задачи уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}=0. \qquad (4)$$

65 стена разделена на пять равных слоев толщиной по 10 *см*. По температурной линии находим температуры на границах этих слоев, а по приложению 3 — соответствующие им значения E. Нанося полученные значения E на границы слоев в том же масштабе, в каком построена линия падения упругости водяного пара, и соединяя полученные точки плавной кривой,

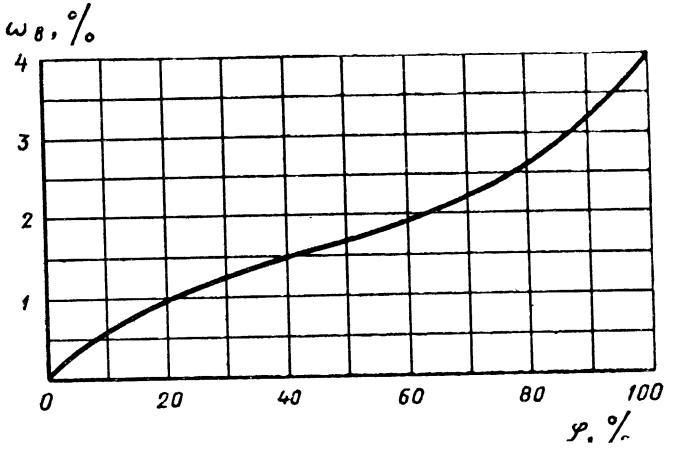


Рис. 66. Изотерма сорбции водяного пара бетоном с объемным весом 1400 *кг/м*³

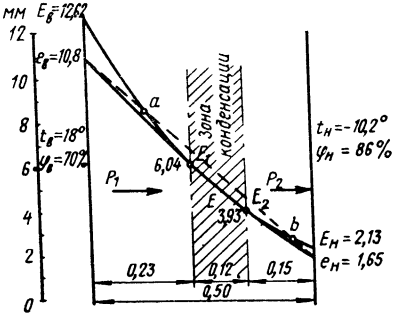


Рис. 67. Определение границ зоны конденсации в сплошной легкобетонной стене

получим линию E максимальной возможной упругости водяного пара в стене. Так как в данном случае (рис. 65) линии e и E не пересекаются, конденсации водяного пара в стене не будет.

В толще стены изменяется также относительная упругость водяного пара в порах бетона. На рис. 65 построена линия изменения относительной упругости водяного пара φ в стене. Для построения этой линии по формуле (83) вычислены относительные упругости на границах слоев по значениям величин e и E в этих плоскостях. Линия φ показывает, что в стене относительная упругость водяного пара достигает 94% и понижается как к внутренней, так и к наружной стороне ее. Следовательно, и влажность бетона будет неодинаковой по толщине стены. Для определения влажности бетона в стене на рис. 66 приведена

В этом случае в направлении оси z температура остается постоянной.

Для одномерной задачи — при передаче тепла через плоскую стенку из однородного материала — получим: $\frac{d^2t}{dx^2} = 0$, т. е. в однородной плоской стенке при стационарном режиме теплопередачи и постоянном значении λ изменение температуры по толщине стенки выражается прямой линией.

Аналитическое решение уравнений (3) и (4) представляет также значительные трудности. Пространственные граничные условия остаются теми же, граничные условия времени отпадают.

В теплотехнических расчетах наружных ограждений зданий большое значение имеет уравнение (4) для расчета температурного поля в ограждении, что бывает необходимо, если в ограждении есть теплопроводные включения (элементы железобетонного или стального каркаса, ребра в трехслойных стеновых панелях и пр.). Задача решается интегрированием уравнения (4) в конечных разностях, что дает хорошие результаты с достаточной для практических целей точностью. Метод конечных разностей применяется также и для решения уравнения (1). Решение дифференциальных уравнений теплопроводности в конечных разностях изложено в главах IV и V.

2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА КОНВЕКЦИЕЙ

При обмене тепла между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела одновременно с конвекцией происходит и передача тепла теплопроводностью в жидкой или газообразной среде. Совместное воздействие конвекции и теплопроводности носит название «конвективного теплообмена».

При конвекции передача тепла связана с молярным переносом жидкости или газа, что сильно усложняет явление этого вида теплопередачи. Количество тепла, передаваемого конвекцией, зависит от характера движения жидкой или газообразной среды; ее плотности, вязкости и температуры; состояния поверхности твердого тела; величины температурного перепада между жидкостью или газом и поверхностью и пр. Применение математического анализа в большинстве случаев ограничивается лишь составлением дифференциальных уравнений и установлением граничных условий. Решение этих уравнений возможно лишь для некоторых частных случаев и при целом ряде упрощающих предпосылок. Поэтому при изучении процессов конвективного теплообмена большое значение имеют эксперимент и обработка его результатов на основании теории подобия.

В практических расчетах для определения количества тепла (в *ккал/ч*), передаваемого при конвективном теплообмене между

изотерма сорбции бетона. На основании этой изотермы и линии распределения относительной упругости γ на рис. 65 построена линия $\omega_в$ изменения влажности бетона в стене. Эта линия показывает, что в толще стены влажность бетона повышается до 3,5% при влажности его у внутренней поверхности 2,1% и у наружной поверхности 2,5% Средняя влажность бетона в стене будет 2,95%, что по изотерме сорбции (рис. 66) соответствует 86% относительной упругости водяного пара. Аналогичное распределение влажности материала в сплошных стенах наблюдается и в действительности. Следовательно, даже при отсутствии конденсации влаги в зимнее время влажность материалов ограждения в результате сорбции ими водяного пара будет повышаться.

Пример 43. Рассчитать влажностный режим стены из легкого бетона, приведенной в примере 45, при условии повышения относительной влажности внутреннего воздуха до 70%. Остальные условия остаются без изменения.

При повышении относительной влажности внутреннего воздуха до 70% упругость водяного пара с внутренней стороны ограждения повысится до $e_в = 10{,}8$ *мм*. Так как температурные условия остались без изменения, то и линия максимальной упругости водяного пара в стене будет в точности соответствовать линии E, приведенной на рис. 65.

Графический расчет влажностного режима стены приведен на рис. 67. Так как в данном случае линия падения упругости водяного пара в стене (пунктирная линия) пересекается с линией максимальной упругости, в стене будет конденсироваться водяной пар. В этом случае снижение упругости водяного пара в стене будет происходит не только вследствие сопротивления, оказываемого стеной диффузии пара, но и вследствие процесса конденсации водяного пара в стене.

Для построения линии падения упругости водяного пара в стене при конденсации в ней влаги проводим из точек $e_в$ и $e_н$, соответствующих упругостям водяного пара на поверхностях стены, прямые, касательные к линии максимальной упругости в точках E_1 и E_2 (рис. 67). Таким образом, получаем линию $e_в E_1 E_2 e_н$ действительного падения упругости водяного пара в стене. На прямолинейных участках этой линии $e_в E_1$ и $E_2 e_н$ падение упругости водяного пара происходит только вследствие сопротивления, оказываемого ему соответствующими частями стены, т. е. здесь конденсации влаги нет. На криволинейном участке $E_1 E_2$, совпадающем с линией максимальной упругости водяного пара, падение упругости пара происходит в результате конденсации его в жидкость. Плоскости, параллельные поверхностям стены и проходящие через точки E_1 и E_2, выделяют в середине стены «зону конденсации», в которой и происходит конденсация водяного пара[1].

[1] Проведение касательных к линии E для построения действительной линии падения упругости водяного пара вызывается следующими соображениями. По формуле (84) количество водяного пара P, проходящего через любой

жидкостью или газом и поверхностью твердого тела, пользуются формулой

$$Q = \alpha_к F (t_в - t_п), \qquad (5)$$

где F — поверхность твердого тела в $м^2$; $t_в$ — температура жидкости или газа в *град*; $t_п$ — температура поверхности в *град*; $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией в *ккал/м²·ч·град*.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_к$ показывает количество тепла в *ккал*, передаваемого в течение часа от жидкости или газа к 1 $м^2$ поверхности твердого тела при разности температур в 1° между жидкостью или газом и поверхностью.

Простота формулы (5) только кажущаяся, она не разрешает задачи, а только переносит их на выбор значений $\alpha_к$.

Для определения величины $\alpha_к$ для различных случаев конвективного теплообмена предложен ряд эмпирических формул, имеющих, однако, ограниченную область применения. Значительно лучшие результаты дает определение величины $\alpha_к$ через «критерии подобия», вытекающие из дифференциальных уравнений теплопередачи. Обработка экспериментальных данных с группировкой отдельных влияющих факторов в комплексные величины (безразмерные критерии) дает возможность распространить эксперимент на большую область явлений и получить надежные значения величины $\alpha_к$ [20].

Для условий теплопередачи через наружные ограждения зданий в главе III приводятся некоторые формулы для определения величин $\alpha_к$, а также их расчетные значения.

3. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ИЗЛУЧЕНИЕМ

При нагревании какого-либо тела часть тепловой энергии превращается на его поверхности в энергию лучистую. Излучение тепла поверхностью тела аналогично световому излучению и отличается от него длиной волн. Видимые световые лучи имеют длины волн от 0,4 до 0,8 μ, а тепловые (инфракрасные) лучи — от 0,8 до 800 μ. Законы распространения, отражения и преломления, установленные для видимых световых лучей, справедливы и для тепловых.

Если на поверхность какого-либо тела падает некоторое количество лучистого тепла, то в общем случае часть его поглощается телом и нагревает его, часть отражается, а часть проходит сквозь тело. Если поверхность тела без отражения поглощает всю падающую на нее лучистую энергию, расходуя ее только на повышение температуры тела, то такое тело называется абсолютно черным. Если поверхность тела полностью отражает всю падающую на нее лучистую энергию, то такое тело называется абсолютно белым. Если вся лучистая энергия, падающая на поверхность тела, полностью проходит через него без повышения температуры тела, то такое тело называется абсолютно прозрачным или диатермичным.

Для определения количества влаги, которое будет конденсироваться в стене, вычисляем по формуле (84) количество водяного пара, проходящего через внутреннюю сухую зону P_1, и количество водяного пара, проходящего через наружную сухую зону P_2.

Для 1 $м^2$ стены при коэффициенте паропроницаемости бетона $\mu=0{,}0145$ получим (рис. 67):

$$P_1 = \frac{10{,}8 - 6{,}04}{0{,}23}\, 0{,}0145 = 0{,}3\ г/м^2 \cdot ч;$$

$$P_2 = \frac{3{,}93 - 1{,}65}{0{,}15}\, 0{,}0145 = 0{,}22\ г/м^2 \cdot ч.$$

Разность этих количеств и даст количество влаги P_ω, конденсирующейся в стене, т. е.

$$P_\omega = P_1 - P_2 = 0{,}3 - 0{,}22 = 0{,}08\ г/м^2 \cdot ч.$$

В сутки это составит только $0{,}08 \cdot 24 = 1{,}92\ г/м^2$.

В данном случае в стене (как и вообще в сплошных однородных ограждениях) конденсируется незначительное количество влаги, которое не может намного повысить влажность материалов стены по сравнению с пределом их сорбционного увлажнения.

Изучение распределения влажности в наружных кирпичных стенах в зимнее время показало, что влажность материала оказывается максимальной в середине стены и понижается к внутренней и к наружной поверхности ее, что совпадает и с данными расчета. Кроме того, известно, что влажность кирпичных стен несколько повышается к концу зимы, что также является результатом сорбции и конденсации влаги в толще стены. С повышением температуры наружного воздуха явление конденсации прекращается и влага, конденсировавшаяся в ограждении, будет постепенно испаряться из него.

В многослойных ограждениях влажностный режим зависит от порядка расположения слоев.

При расчетах влажностного режима многослойных ограждений описанным методом встречается затруднение в нахождении точек касания линий e и E, так как при этом между точкой касания и точкой $e_в$ линия падения упругости водяного пара может оказаться ломаной. Поэтому в таких случаях для графиче-

---

слой однородного ограждения, пропорционально разности упругостей пара на его поверхностях и обратно пропорционально его толщине, т. е. величина P пропорциональна тангенсу угла наклона линии e к горизонтали. Если положить, что падение упругости водяного пара в стене будет идти по линии $e_в a E_1 E_2 b e_н$, т. е. зона конденсации будет лежать между точками a и b, соответствующими пересечению пунктирной линии с линией E, то при этом получим, что к точке a будет слева притекать меньшее количество пара, чем уходить вправо (меньший уклон линии $e_в a$ против уклона линии E в точке a). Это было бы возможно только при условии, что в плоскости a есть внутренние источники паровыделения, чего в действительности нет. То же самое было бы и в точке b. Условием равенства количеств пара, притекающего к границе зоны конденсации и отдаваемого ей, будет только касание линий $e_в E_1$ и линии E.

Интенсивность излучения тепла поверхностью тела зависит от ее температуры и способности тела излучать тепло. Чем больше лучистого тепла поглощается телом, тем больше тепла оно и излучает, следовательно, максимальной излучательной способностью обладает абсолютно черное тело. Строительные материалы обладают большей или меньшей способностью излучать тепло, но всегда меньшей, чем абсолютно черное тело; такие тела называются серыми.

Количество тепла, излучаемого единицей поверхности тела в единицу времени, определяется формулой

$$Q = C\left[\frac{T}{100}\right]^4, \qquad (6)$$

где Q — количество излучаемого тепла в *ккал/м²·ч*; C — коэффициент излучения поверхности в *ккал/м²·ч·°К⁴*; T — температура поверхности в °К.

Формула (6) носит название закона Стефана — Больцмана. Строго говоря, этот закон справедлив только для абсолютно черного тела. Однако опытами ряда исследователей было показано, что этот закон применим также и к серым телам.

Формула (6) показывает, что количество тепла, излучаемого поверхностью тела, пропорционально четвертой степени ее абсолютной температуры, т. е. интенсивность излучения резко возрастает с повышением температуры поверхности тела.

Абсолютно черное тело имеет коэффициент излучения $C_0 = 4{,}96$. Коэффициенты излучения строительных материалов зависят от состава материала, состояния его поверхности и температуры, они всегда меньше C_0. Количество тепла (в *ккал/ч*), передаваемого излучением между двумя произвольно расположенными поверхностями, определяется по формуле

$$Q = \frac{C_1 C_2}{C_0}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\int_{F_1}\int_{F_2}\frac{\cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2}{\pi r^2}\,dF_1\,dF_2, \qquad (7)$$

где C_1 и C_2 — коэффициенты излучения поверхностей в *ккал/м²·ч·°К⁴*; C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_1 и T_2 — температуры излучающих поверхностей в °К; r — расстояние между центрами элементов dF_1 и dF_2 обеих поверхностей в *м* (рис. 1); φ_1 и φ_2 — углы между линией, соединяющей центры элементов, и нормалями к соответствующим поверхностям (рис. 1).

Из уравнения (7) следует, что количество тепла, передаваемого излучением между поверхностью F_2 и элементом поверхности dF_1 (рис. 1), будет:

$$dQ = \frac{C_1 C_2}{C_0}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]dF_1\int_{F_2}\frac{\cos\varphi_1\cos\varphi_2}{\pi r^2}\,dF_2. \qquad (7а)$$

ского расчета ограждение вычерчивается в масштабе сопротивлений паропроницанию его слоев (аналогично расчету изменения температуры в ограждении, изложенному в части I) и точки $e_в$ и $e_н$ соединяются прямой линией, а при пересечении линии $e_в e_н$ с линией E из этих точек проводятся прямые, касательные к линии E.

Пример 44. Кирпичная стена толщиной в 1 кирпич утеплена с внутренней стороны слоем цементного фибролита объемным весом 350 *кг/м*³ толщиной 75 *мм*. Поверхность фибролита оштукатурена известково-песчаным раствором толщиной 20 *мм*. Наружная поверхность стены оштукатурена сложным раствором толщиной 15 *мм*. Сделать расчет на конденсацию в ней влаги при температурах и влажностях воздуха:

внутреннего $t_в=18°$, $\varphi_в=60\ \%$, $e_в=9{,}29$ *мм рт. ст.*;

наружного $t_н=-15°$, $\varphi_н=80\ \%$, $e_н=1$ » » ».

Коэффициенты паропроницаемости материалов стены (см. приложение 1): кирпичной кладки $\mu=0{,}014$; фибролита $\mu=0{,}035$; известковой штукатурки $\mu=0{,}016$; штукатурки сложным раствором $\mu=0{,}013$ *г/м·ч·мм рт. ст.*

Сопротивление теплопередаче стены

$$R_0 = 0{,}133 + \frac{0{,}02}{0{,}7} + \frac{0{,}075}{0{,}13} + \frac{0{,}25}{0{,}7} + \frac{0{,}015}{0{,}75} + 0{,}05 = 1{,}166\ .$$

Сопротивления паропроницанию слоев стены (без учета сопротивлений влагообмену):

Известковая штукатурка 20 *мм*	$R_{п1}=0{,}02:0{,}016=1{,}25$
Цементный фибролит 75 *мм*	$R_{п2}=0{,}075:0{,}035=2{,}15$
Кирпичная кладка 250 *мм*	$R_{п3}=0{,}25:0{,}014=17{,}85$
Наружная штукатурка 15 *мм*	$R_{п4}=0{,}015:0{,}013=1{,}15$
Сопротивление всей стены	$R_{о.п}=22{,}4$

На рис. 68 стена вычерчена в масштабе сопротивлений паропроницанию, и на ней нанесена температурная линия τ и построенная по ней линия максимальной упругости водяного пара E.

Прямая, соединяющая точки $e_в$ и $e_н$ (пунктирная линия), пересекается с линией максимальной упругости водяного пара E, следовательно, в стене будет конденсация водяного пара. Для построения действительной линии падения упругости водяного пара при конденсации влаги в стене проводим из точек $e_в$ и $e_н$ касательные прямые к линии E. Лежащая между точками касания «зона конденсации» имеет в данном случае толщину 80 *мм*. Основное количество конденсата будет образовываться в плоскости примыкания фибролита к кирпичной стене, где линия e имеет резкий перелом. В зоне конденсации, расположенной в кирпичной стене, будет конденсироваться незначительное количество водяного пара.

Количество водяного пара, поступающего к зоне конденсации

$$P_1 = \frac{e_в - 3{,}6}{R_{п1} + R_{п2}} = \frac{9{,}29 - 3{,}6}{1{,}25 + 2{,}15} = 1{,}68\ г/м^2 \cdot ч.$$

Количество водяного пара, уходящего из стены от правой границы зоны конденсации,

$$P_2 = \frac{2{,}7 - 1}{12{,}25 + 1{,}15} = 0{,}13\ г/м^2 \cdot ч.$$

Количество пара, конденсирующегося в стене, $P_1 - P_2 = 1{,}68 - 0{,}13 = 1{,}55\ г/м^2 \cdot ч$, т. е. в данной стене будет конденсироваться пара в 19 раз боль-

Интеграл этого уравнения носит название «углового коэффициента излучения» и обычно обозначается буквой ψ. Таким образом, расчет по формуле (7) сводится к определению величин коэффициентов углового излучения для обеих поверхностей. Коэффициент углового излучения показывает долю тепла, приходящуюся на поверхность F_2, из всего количества тепла, излучаемого элементом dF_1. Величина ψ не зависит от температуры поверхностей, а определяется исключительно взаимным расположением и геометрическими размерами поверхностей.

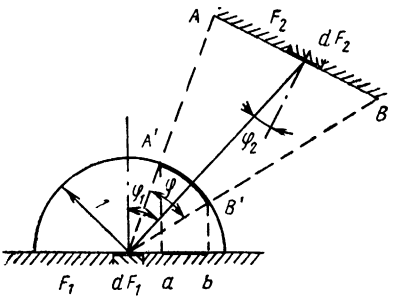


Рис. 1. Графическое построение углового коэффициента излучения

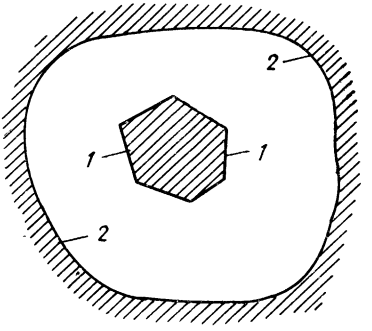


Рис. 2. К расчету лучистого теплообмена между поверхностями *1* и *2*

Определение угловых коэффициентов излучения даже при простейших формах и расположении обеих поверхностей приводит к очень сложным расчетам. Имеется графический способ определения угловых коэффициентов излучения, состоящий в следующем (рис. 1). На поверхности F_1 выделяем элемент dF_1, из центра которого описываем шаровую поверхность радиусом, равным единице. Телесный угол φ, под которым элемент dF_1 «видит» поверхность F_2, вырезает на шаровой поверхности часть сферы $A'B'$, проектируя которую на плоскость, перпендикулярную нормали к элементу dF_1, получаем площадь ab. Отношение площади ab к площади круга с радиусом, равным единице, образуемого пересечением плоскости, проходящей через элемент dF_1, с поверхностью шара, и даст величину ψ. Разделив поверхность F_1 на ряд малых площадок dF_1, проделав для каждой из них соответствующее построение величин ψ и вычислив

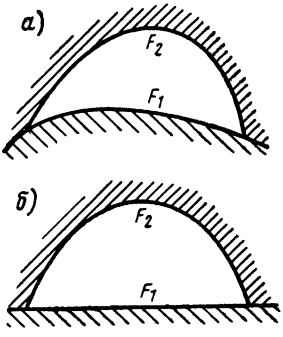


Рис. 3. К расчету лучистого теплообмена в замкнутом пространстве

ше, чем в сплошной бетонной стене (см. пример 46) при большей влажности внутреннего воздуха.

В течение месяца в рассматриваемой стене сконденсируется влаги:

$$P_{\omega} = \frac{1{,}55 \cdot 24 \cdot 30}{1000} = 1{,}12 \ кгс/м^2.$$

Если условно принять, что в фибролите будет конденсироваться половина всего количества конденсата, т. е. 0,56 *кгс/см*^{2}, и увлажнит он одну треть тол-

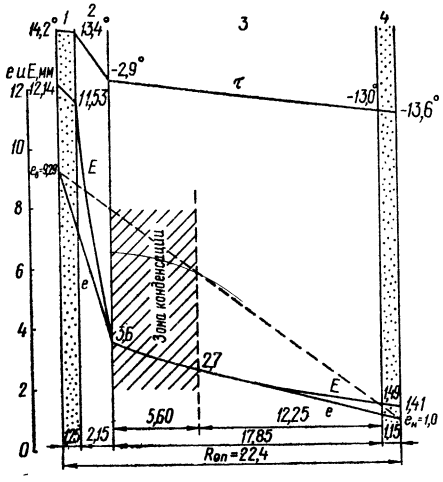


Рис. 68. Конденсация влаги в стене, утепленной с внутренней стороны

1 — штукатурка известковая; *2* — цементный фибролит; *3* — кирпичная кладка; *4* — штукатурка сложным раствором

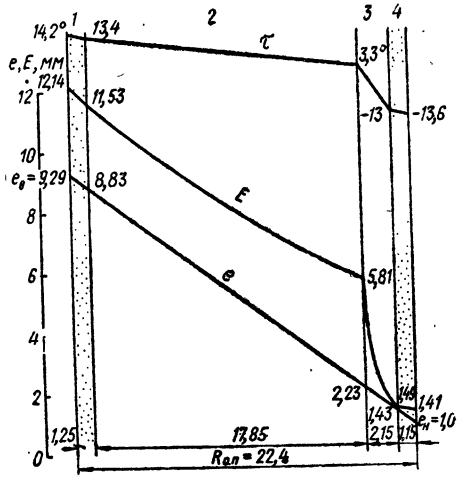


Рис. 69. Схема влажностного режима стены, утепленной с наружной стороны

1 — внутренняя штукатурка; *2* — кирпичная кладка; *3* — фибролит; *4* — наружная штукатурка

щины фибролита, прилегающую к кирпичной стене, имеющую вес $0{,}025 \cdot 350 = 8{,}75$ *кгс/м*^{2}, то весовая влажность фибролита в этой части повысится на:

$$\Delta\omega_{в} = \frac{0{,}56}{8{,}75} 100 = 6{,}4\%.$$

В результате повышения влажности фибролита будет повышаться и его коэффициент теплопроводности, а у стены уменьшаться ее сопротивление теплопередаче. Чем больше будет разница в теплопроводности и паропроницаемости материалов такой стены, тем интенсивнее будет конденсироваться в ней влага.

Наблюдения, проведенные в опытном доме со стенами в 1 кирпич, утепленными с внутренней стороны фибролитом, обнаружили большое количество конденсационной влаги в виде слоя наледи на границе между фибролитом и кирпичной стеной. Это вполне подтверждает полученные результаты расчета.

На рис. 69 показана схема влажностного режима стены, утепленной фибролитом с наружной стороны. Отсутствие пересечения линий *e* и *E* показывает, что в этом случае конденсации влаги в стене нет. Следовательно, влажностный режим такой стены будет лучшим, чем даже в сплошных стенах, в кото-

значения dQ по формуле (7 а), получим полную величину Q обмена лучистой теплоты между поверхностями F_1 и F_2 как сумму величин dQ.

Графическое построение углового коэффициента излучения связано с построением проекции части шаровой поверхности, вырезаемой телесным углом, и вычислением площади этой проекции, что является также сложным вследствие криволинейности ее сторон.

Задача определения лучистого теплообмена между двумя поверхностями резко упрощается в двух частных случаях:

1) когда две плоскости расположены параллельно друг другу на небольшом расстоянии одна от другой, то количество тепла, передаваемого между ними, определяется по формуле

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F; \qquad (8)$$

2) когда одно тело со всех сторон окружено другим телом (рис. 2), то количество тепла, передаваемого между ними, определяется по формуле

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1. \qquad (9)$$

Формула (9) справедлива только в том случае, когда внутреннее тело не имеет входящих углов. Формула (9) применима также в случае, когда теплообмен происходит в замкнутом пространстве, ограниченном вогнутой F_2 и выпуклой F_1 или плоской F_1 поверхностью (рис. 3). Во всех случаях в качестве расчетной принимается площадь выпуклой или плоской поверхности.

Глава II. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Строительные материалы обладают рядом свойств, знание которых необходимо для теплотехнических расчетов. Точность теплотехнических расчетов в значительной степени зависит от правильного выбора значений теплотехнических показателей строительных материалов. По каким бы точным формулам мы ни делали теплотехнические расчеты, результат не может получиться близким к действительности, если взятые при расчете величины теплотехнических показателей материалов не соответствуют их действительным значениям. Эти показатели могут изменяться в зависимости от различных условий, поэтому выбор их представляет большие затруднения. В первую очередь это относится

рых при тех же условиях наблюдается конденсация влаги, правда, незначительная. Более благоприятна эта стена и в отношении сорбции пара, так как на границе фибролита и кирпичной стены в этом случае относительная упругость водяного пара составит только 39%.

На влажностный режим наружных ограждений большое влияние оказывает порядок расположения слоев в них. Для обеспечения ограждения от конденсации в нем влаги необходимо малопаропроницаемые слои располагать у внутренней поверхности ограждения, а малотеплопроводные более паропроницаемые слои—у наружной его поверхности. Такое расположение слоев, кроме того, повышает и теплоустойчивость ограждения.

Как показывают приведенные примеры, количество влаги, конденсирующейся в ограждении, зависит от его конструкции и теплотехнических свойств материалов. Кроме того, большое влияние оказывают температура и влажность внутреннего и наружного воздуха. С повышением влажности внутреннего воздуха резко возрастает количество конденсата в ограждении. Температура внутреннего воздуха имеет двоякое влияние: при сохранении постоянной относительной влажности воздуха количество конденсата возрастает при повышении температуры воздуха, так как при этом возрастает его абсолютная влажность; при постоянной абсолютной влажности воздуха с повышением его температуры количество конденсата уменьшается. С понижением температуры наружного воздуха количество конденсата в ограждении увеличивается. Относительная влажность наружного воздуха в зимнее время влияния на влажностный режим ограждения почти не оказывает ввиду малых значений максимальных упругостей водяного пара E при низких температурах воздуха.

Процессы сорбции и конденсации пара обусловливают повышенную влажность материалов в наружных ограждениях отапливаемых зданий — так называемую нормальную влажность, значения которой для некоторых материалов приведены в табл. 1. Очевидно, что величина нормальной влажности материала зависит не только от его физических свойств, но также от конструкции ограждения, расположения в нем материала и температурно-влажностных условий внутреннего и наружного воздуха. Следовательно, приведенные в табл. 1 значения нормальной влажности материалов являются некоторыми средними значениями с возможными отклонениями в отдельных случаях. Расчет влажностного режима ограждений позволяет более точно определять нормальную влажность для каждого частного случая и уже после этого вносить поправки к значениям коэффициентов теплопроводности материалов для уточнения теплотехнических расчетов.

Изложенный метод расчета влажностного режима наружных ограждений дает возможность рассчитать и скорость последую-

к тем строительным материалам, теплотехнические свойства которых еще мало изучены, а порой и совсем неизвестны.

В этой главе приводятся характеристики основных теплотехнических показателей строительных материалов и факторов, влияющих на величины этих показателей.

1. ПОРИСТОСТЬ И ОБЪЕМНЫЙ ВЕС

Подавляющее большинство строительных материалов — пористые тела. Пористость определяет процентное содержание пор (p в %) в материале и выражается процентным отношением объема пор к общему объему материала.

Объемный вес материала γ *кг/м*^{3} характеризуется весом в килограммах 1 *м*^{3} материала в том состоянии, в каком он будет применяться в строительстве.

Понятие объемного веса не надо смешивать с понятием удельного веса. Удельный вес выражается весом единицы объема вещества, из которого состоит материал, считая, что в материале совсем нет пор.

Объемный вес зависит от пористости материала, а для сыпучих материалов — еще и от степени их уплотнения. Например, для обожженного кирпича, состоящего из смеси глины с песком, подверженной обжигу, удельный вес $g=2600$ *кг/м*^{3}, объемный же вес кирпича будет изменяться в пределах от $\gamma=1900$ *кг/м*^{3} для плотного кирпича до $\gamma=600$ *кг/м*^{3} для высокопористого кирпича.

Объемный вес входит в выражение коэффициента температуропроводности, а также в ряд формул и уравнений для теплотехнических расчетов и расчетов влажностного режима ограждающих конструкций. Кроме того, объемный вес имеет большое значение в строительной теплотехнике как свойство материала, дающее возможность приблизительно оценивать его теплопроводность.

Для строительных материалов объемный вес изменяется в пределах от 2800 *кг/м*^{3} (для гранита) до 90 *кг/м*^{3} (для легких волокнистых материалов). У таких материалов, как мипора и пенополистирол (стиропор), объемный вес снижается до 20 *кг/м*^{3}.

Удельный вес строительных материалов g изменяется в пределах: для неорганических материалов — от 2400 до 2800 *кг/м*^{3}, для органических материалов — от 1450 до 1560 *кг/м*^{3}.

Если известны значения удельного веса материала g и его объемного веса γ, то величина пористости p определяется по формуле

$$p = \frac{g-\gamma}{g} 100. \qquad (10)$$

При определенном удельном весе материала значение пористости его будет тем большим, чем меньше его объемный вес, и наоборот. Для строительных материалов силикатного проис-

щего просыхания ограждения после прекращения конденсации в нем водяного пара, а именно — при повышении температуры наружного воздуха. При этом в пределах зоны конденсации принимаем упругость водяного пара равной максимальной $E_к$, соответствующей температуре в этой зоне, независимо от величин упругостей водяного пара внутреннего и наружного воздуха. Затем по формуле (84) определяем величины P_1 и P_2. При этом, если $e_в$ будет больше $E_к$, но P_1 будет меньше P_2, высыхание будет идти только по направлению к наружной поверхности ограждения и количество влаги, удаляемой с 1 $м^2$ ограждения в 1 $ч$, будет: $P_{высых}=P_2-P_1$.

Если $e_в<E_к>e_н$, то процесс высыхания будет идти в обоих направлениях и $P_{высых}=P_1+P_2$.

Таким образом можно определить время, требуемое для удаления из ограждения влаги, сконденсированной в нем в течение зимнего периода, деля полное количество влаги, сконденсированной за период конденсации, на величину $P_{высых}$.

Пример 45. Рассчитать скорость удаления влаги в летнее время из стены, приведенной в примере 44, имеющей утепление фибролитом на внутренней стороне.

Примем для летнего времени следующие значения температур и влажностей воздуха:

внутреннего $t_в=20°$, $\varphi_в=70$ % и. $e_в=12,3$ *мм рт. ст.*;

наружного $t_н=18°$, $\varphi_н=73$ % и. $e_н=11,3$ »

Для определения по формуле (28) температуры в плоскости прилегания фибролита к кирпичной стене имеем:

$$R_в+R_1+R_2=0,133+\frac{0,02}{0,7}+\frac{0,075}{0,13}=0,739.$$

При этом

$$\tau_з=20-\frac{20-18}{1,166}0,739=18,7°,$$

чему соответствует максимальная упругость водяного пара $E_з=16,17$ *мм рт. ст.*

Другая поверхность зоны конденсации (см. рис. 68) отстоит от внутренней поверхности кирпичной стены на 80 *мм*, следовательно, термическое сопротивление зоны конденсации

$$R_к=\frac{0,08}{0,7}=0,114$$

и температура этой поверхности по формуле (28)

$$\tau_к=20-\frac{2}{1,166}(0,739+0,114)=18,5° \text{ и } E_к=15,97.$$

Так как $E_з>e_в$, высыхание будет идти в обоих направлениях.

Количество влаги, удаляемой в сторону помещения,

$$P_1=\frac{16,17-12,3}{1,25+2,15}=1,14\ г/м^2\cdot ч.$$

Количество влаги, удаляемой по направлению к наружной стороне:

$$P_2=\frac{15,97-11,3}{12,25+1,15}=0,35\ г/м^2\cdot ч;$$

хождения пористость изменяется от нуля (для плотных пород, например гранита) до 90% (для легкого пенобетона). У пенополистирола и мипоры пористость достигает 98%.

2. ВЛАЖНОСТЬ

Влажность характеризуется наличием в материале несвязанной химически воды. Влажность оказывает большое влияние на теплопроводность и теплоемкость материала, а также имеет большое значение для оценки влажностного режима ограждений. Влажность можно выражать или в весовом отношении — «весовая влажность» или в объемном отношении — «объемная влажность».

Весовая влажность $\omega_в$ выражается в процентах и определяется отношением массы влаги, содержащейся в образце материала, к массе образца в сухом состоянии[1]:

$$\omega_в = \frac{P_1 - P_2}{P_2} 100, \qquad (11)$$

где P_1 — масса образца материала до его высушивания; P_2 — масса того же образца после высушивания.

Объемная влажность ω_0 выражается в процентах и определяется отношением объема влаги, содержащейся в образце материала, к объему образца

$$\omega_0 = \frac{V_1}{V_2} 100, \qquad (11а)$$

где V_1 — объем влаги, содержащейся в образце материала, V_2 — объем самого образца.

При одном и том же объемном содержании влаги в образце выражение весовой влажности будет различным в зависимости от объемного веса материала. Для материалов с бóльшим объемным весом весовая влажность выразится меньшим процентом, чем для материала с меньшим объемным весом. Таким образом, объемная влажность дает более ясное представление о содержании влаги в материале, чем весовая влажность. Более распространено выражение влажности материала в весовых процентах, так как определять весовую влажность значительно проще, чем объемную. Особенно трудно определить объемную

[1] Иногда это отношение берется к массе образца во влажном состоянии. Величина весовой влажности, отнесенной к массе сухого образца $\omega_в$, и величина влажности, отнесенной к влажному образцу $\omega'_в$, связаны соотношением

$$\omega_в = \frac{100\omega'_в}{100 - \omega'_в}.$$

По нормам влажность строительных материалов определяется отношением к массе образца в сухом состоянии.

$$P'_{\text{высых}} = P_1 + P_2 = 1{,}14 + 0{,}35 = 1{,}49 \; г/м^2 \cdot ч.$$

По мере удаления влаги из стены будет сокращаться зона, в которой влажность материала выше предела сорбционного увлажнения, и под конец обратится в плоскость на границе кирпичной кладки и фибролита. Для этого момента получим:

$$P_2 = \frac{16{,}17 - 11{,}3}{17{,}85 + 1{,}15} = 0{,}26 \; г/м^2 \cdot ч; \; P''_{\text{высых}} = 1{,}14 + 0{,}26 = 1{,}4 \; г/м^2 \cdot ч$$

Среднее количество влаги, удаляемой из стены за летний период:

$$P_{\text{высых}} = \frac{1{,}49 + 1{,}4}{2} = 1{,}44 \; г/м^2 \cdot ч$$

или в течение месяца $\frac{1{,}44 \cdot 24 \cdot 30}{1000} = 1{,}03 \; кгс/м^2$, что меньше зимнего месячного конденсата.

Метод расчета влажностного режима по стационарным условиям является ориентировочным и не отражает действительной картины изменения влажности материала в ограждении вследствие того, что процессы диффузии водяного пара протекают медленно. Поэтому, если по расчету получается, что в ограждении происходит конденсация пара, то это еще не значит, что в действительности она обязательно будет, особенно в ограждениях массивных, так как для наступления конденсации пара требуется некоторое количество времени. Чем менее массивным будет ограждение, тем более результаты расчета будут приближаться к действительности. Для получения действительной картины влажностного режима ограждения необходимо делать расчет по нестационарным условиям, метод которого изложен далее.

Однако расчет влажностного режима по стационарным условиям является простым и может дать достаточно точный ответ на два следующих вопроса:

1) будет ли гарантировано ограждение от конденсации влаги? Если по расчету конденсации влаги в ограждении не должно быть, то оно действительно будет гарантировано от конденсации;

2) каков будет годовой баланс влаги в ограждении? Делая расчеты влажностного режима ограждения для годового периода помесячно или по четырем периодам года (осень, зима, весна, лето), можно установить годовой баланс влаги в ограждении, т. е. выяснить, происходит ли в ограждении систематическое накопление влаги или влага, конденсированная в зимний период, успевает испариться из ограждения в течение летнего периода. Таким образом, можно установить, будет ли ограждение с течением времени увлажняться или постепенно просыхать.

Все другие вопросы, связанные с влажностным режимом ограждений, должны решаться на основании расчетов по нестационарным условиям диффузии водяного пара.

влажность материала, когда образец его приходится брать из конструкции (шлямбуром или сверлом), так как при этом материал извлекается в измельченном виде, и не всегда можно определить объем пробы. Для определения объема необходимо извлекать из конструкции целый кусок материала, что не всегда возможно и, кроме того, повреждает конструкцию. Поэтому в дальнейшем изложении, если нет оговорок, принимается весовая влажность.

Если известны объемный вес материала γ и его весовая влажность $\omega_в$, то для определения объемной влажности ω_0 можно пользоваться формулой

$$\omega_0 = \frac{\omega_в \gamma}{1000}, \qquad (11б)$$

где γ — объемный вес материала в сухом состоянии в $кг/м^3$.

В ограждающих конструкциях строительный материал никогда не бывает в абсолютно сухом состоянии, а имеет некоторую влажность вследствие процессов сорбции и конденсации водяного пара, происходящих в ограждении. Влажность, которую будет иметь материал в правильно спроектированном и нормально эксплуатируемом ограждении гражданских зданий в нормальной климатической зоне, называется «нормальной влажностью». Значения нормальных влажностей для некоторых материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Нормальные влажности некоторых материалов в наружных ограждающих конструкциях

Материал	Объемный вес γ, $кг/м^3$	Влажность материала в %	
		весовая $\omega_в$	объемная ω_0
Кирпич красный в сплошных стенах	1800	1,5	2,7
Кирпич красный в стенах с воздушными прослойками	1800	0,5	0,9
Кирпич силикатный	1900	2,5	4,8
Бетон тяжелый	2000	1,5	3
Шлакобетон	1300	3	3,9
Керамзитобетон	1000	6	6
Пенобетон в наружных стенах	700	10	7
Пеностекло	350	3	1,1
Штукатурка известково-песчаная	1600	1	1,6
Шлак топливный в засыпке	750	3,5	2,6
Минераловатные плиты	200	2	0,4
Дерево (сосна)	500	15	7,5
Фибролит цементный	350	15	5,2
Торфоплиты	225	20	4,5
Пенополистирол	25	5	0,12

Примечание. Приведенные значения влажности материалов относятся только к конструкциям, правильно спроектированным и находящимся в нормальных условиях эксплуатации. При нарушении нормальных условий эксплуатации конструкций (особенно недостаточно просушенных после окончания строительства) влажность материалов может быть очень высокой.

3. РАСЧЕТ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ДИФФУЗИИ ВОДЯНОГО ПАРА

Изложенный расчет влажностного режима ограждений в стационарных условиях диффузии водяного пара не учитывает изменения влажности материалов в ограждении во времени, а также влияния начальной влажности материалов на влажностный режим ограждения. Проведенные лабораторные исследования и натурные наблюдения, а также практика эксплуатации зданий показали, что действительные условия диффузии водяного пара в наружных ограждениях сильно отличаются от стационарных, для достижения которых требуется весьма продолжительное время. В частности, этим объясняется тот факт, что при применении очень сухого леса в бесчердачных покрытиях даже влажных цехов не было конденсации водяного пара, в то время как расчет по стационарным условиям давал в них образование конденсата. Наличие в покрытии сухого леса с малым коэффициентом паропроницаемости требовало значительного времени для приобретения деревом влажности, соответствующей стационарным условиям, так как эта влага могла проникнуть только из внутреннего воздуха в результате диффузии, замедленной вследствие малой величины коэффициента паропроницаемости древесины. Зимний период был для этого недостаточным, а летом происходило интенсивное просыхание дерева под действием солнечной радиации. Таким образом, расчет влажностного режима по стационарным условиям давал слишком большой запас надежности, в связи с чем некоторые из конструкций, которые в действительных условиях могли иметь вполне благоприятный влажностный режим, браковались.

Распространяя аналогию между теплопроводностью и диффузией и на нестационарные условия, получим для диффузии водяного пара через плоскую стену следующее дифференциальное уравнение, аналогичное дифференциальному уравнению (1) теплопроводности:

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\mu}{\xi\gamma} \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}, \qquad (90)$$

где e — упругость водяного пара в *мм. рт. ст.*; μ — коэффициент паропроницаемости материала в *г/м·ч·мм рт. ст.*; ξ — удельная пароемкость материала в *г/кг·мм рт. ст.*, т. е. количество водяного пара в *г*, которое необходимо для повышения упругости водяного пара в 1 *кг* материала на 1 *мм рт. ст.*

Величина ξ не является постоянной для данного материала, а значительно изменяется с изменением его температуры. Например, для дерева при температуре +20° С по изотерме сорбции (рис. 64, а также по приложению 4) имеем следующее. При повышении относительной упругости водяного пара с 60 до 70% влажность дерева увеличивается на 13—10,9=2,1%, т. е. 1 *кг* древесины приобретает 21 *г* влаги. В зависимости от темпера-

3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Теплопроводность есть способность материала в той или иной степени проводить тепло через свою массу. Степень теплопроводности материала характеризуется величиной его коэффициента теплопроводности λ.

Для выяснения того, что представляет собой коэффициент теплопроводности материала, возьмем однородную плоскую стенку (т. е. стенку, ограниченную двумя параллельными плоскостями) толщиной δ *м*, сделанную только из данного материала и имеющую площадь, равную F *м*^{2}. Если на поверхностях стенки температуры соответственно равны τ_1 и τ_2, причем $\tau_1 > \tau_2$, то количество тепла Q в *ккал* *, проходящее через стенку за время z часов при установившемся тепловом потоке (т. е. при условии постоянства температур на поверхностях стенки), определяется по формуле

$$Q = (\tau_1 - \tau_2) Fz \frac{\lambda}{\delta} . \qquad (12)$$

Если известна величина Q, то по формуле (12) можно определить λ:

$$\lambda = \frac{Q\delta}{(\tau_1 - \tau_2) Fz} . \qquad (12а)$$

Если принять $\delta = 1$ *м*, $F = 1$ *м*^{2}, $\tau_1 - \tau_2 = 1°$ и $z = 1$ *ч*, то из формулы (12а) получим $\lambda = Q$, т. е. коэффициент теплопроводности показывает количество тепла в *ккал*, которое будет проходить за 1 *ч* через 1 *м*^{2} плоской стенки толщиной 1 *м* при разности температур на ее поверхностях, равной 1°.

Из формулы (12а), подставляя размерности входящих в нее величин, получим размерность коэффициента теплопроводности λ *ккал/м·ч·град*.

Коэффициенты теплопроводности строительных материалов изменяются в пределах от $\lambda = 0{,}035$ (мипора, пенополистирол) до $\lambda = 3$ *ккал/м·ч·град* (гранит). Металлы имеют еще бо́льшие величины коэффициента теплопроводности: для стали $\lambda = 50$, для алюминия $\lambda = 190$ *ккал/м·ч·град*.

Величина коэффициента теплопроводности для одного и того же материала не является величиной постоянной, она может изменяться в зависимости от его объемного веса, влажности, температуры и направления теплового потока.

Зависимость коэффициента теплопроводности материала от его объемного веса. С увеличением объемного веса (уменьшением пористости) коэффициент теплопроводности материала возрастает и, наоборот, при уменьшении объемного веса (уве-

* В качестве единицы для измерения количества тепла принята килограмм-калория, т. е. количество тепла, которое необходимо сообщить 1 *кг* воды для повышения ее температуры на 1°.

туры это будет соответствовать следующим значениям удельной пароемкости дерева, приведенным в табл. 23.

Таблица 23

Зависимость удельной пароемкости дерева от температуры

Температура в °С	Максимальная упругость водяного пара E *мм рт.ст.*	10% от E, *мм рт.ст.*	ξ *г/кГ·мм рт.ст.*
+20	17,54	1,75	21:1,75=12
0	4,58	0,46	21:0,46=46
—20	0,77	0,08	21:0,08=262

Табл. 23 показывает, что при изменении температуры от +20 до —20° С удельная пароемкость дерева изменилась в 22 раза.

Для учета этой зависимости введем новое понятие «относительная пароемкость» ξ_0 в *г/кг*, понимая под этим количество влаги в граммах, необходимое для повышения относительной упругости водяного пара в 1 *кг* материала от 0 до 100%.

Величина относительной пароемкости материала определяется по его изотерме сорбции. Так как изотермы сорбции водяного пара строительными материалами являются кривыми линиями, то в пределах отдельных участков изотермы относительные пароемкости материала будут различными. Для небольшого отрезка изотермы средняя величина относительной пароемкости материала определяется по формуле

$$\xi_{0.ср} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\varphi_2 - \varphi_1} 1000^*, \qquad (91)$$

где ω_1 и ω_2 — наименьшая и наибольшая весовые влажности материала на данном отрезке изотермы в %; φ_1 и φ_2 — соответствующие этим влажностям относительные упругости водяного пара в % (по изотерме сорбции).

Формула (91) и вид изотерм сорбции показывают, что относительная пароемкость материала является величиной переменной, зависящей от относительной упругости водяного пара в порах материала. Поэтому в расчетах влажностного режима необходимо учитывать эту зависимость.

Формула (91) показывает, что для определенного значения относительной упругости водяного пара величина относительной пароемкости материала будет:

$$\xi_0 = \frac{d\omega}{d\varphi} 1000. \qquad (91а)$$

---

* Множитель 1000 в формуле (91) получен следующим образом. 1% весовой влажности материала соответствует 10 *г* влаги на 1 *кг* материала. Для перевода относительных упругостей из процентов в доли единицы нужно их умножить на 0,01. Подставляя полученные соотношения в формулу (91), будем иметь: $\frac{10}{0{,}01} = 1000$.

личении пористости) коэффициент теплопроводности уменьшается. Для иллюстрации этой зависимости в табл. 2 приведены коэффициенты теплопроводности глиняного обожженного кирпича в зависимости от его объемного веса и пористости.

Таблица 2

Зависимость λ от γ и p для глиняного обожженного кирпича

Кирпич	Объемный вес γ, $кг/м^3$	Пористость p, %	Коэффициент теплопроводности	
			λ, *ккал/м·ч·град*	в % от наибольшего значения λ
Сухого прессования	1900	27	0,7	100
Плотный машинный	1800	31	0,66	94
Слабопористый	1400	46	0,45	64
Пористый	1200	54	0,38	54
Высокопористый	800	69	0,25	36

Данные этой таблицы наглядно показывают, как уменьшается коэффициент теплопроводности кирпича с уменьшением его объемного веса, а следовательно, и с увеличением его пористости. Состав же материала не меняется.

Изменение коэффициента теплопроводности строительных материалов с изменением их объемного веса происходит вследствие того, что всякий строительный материал состоит из основного вещества — скелета (кварца, кальцита, глинозема и т. п.) и воздуха, находящегося в порах материала. Коэффициент теплопроводности абсолютно плотного материала (пористость равна нулю) имеет следующие значения:

Для органических материалов . . .	от 0,25 до 0,35	*ккал/м·ч·град*
» неорганических » . . .	2,8	»
» кристаллических » . . .	от 4 до 6	»
Кристаллических, но при потоке тепла параллельно кристаллической поверхности	12	»
Для пластмасс	от 0,15 до 0,3	»

Коэффициент теплопроводности воздуха, содержащегося в порах материала, напротив, имеет очень незначительную по сравнению с теплопроводностью основного вещества материала величину, зависящую главным образом от размеров и формы пор, например от $\lambda=0{,}021$ при размере пор около 0,1 *мм* до $\lambda=0{,}027$ при размере пор около 2 *мм*. Коэффициент теплопроводности самого материала равен некоторой средней величине между коэффициентом теплопроводности основного вещества материала и коэффициентом теплопроводности воздуха, содержащегося в порах. Чем меньше пор в материале, а следовательно, чем больше его объемный вес, тем больше и его коэффициент теплопроводности, и наоборот.

Следовательно, относительная пароемкость материала является первой производной изотермы сорбции по относительной упругости водяного пара. Таким образом, по изотерме сорбции материала можно получить зависимость ξ_0 от φ. Если известно уравнение изотермы сорбции материала, то зависимость ξ_0 от φ может быть определена аналитически. Если уравнение изотермы сорбции неизвестно, то кривая зависимости ξ_0 от φ может быть получена графически. Для этого к кривой изотермы сорбции в ряде точек, соответствующих различным значениям φ, проводят касательные и по ним определяют соответствующие значения ξ_0 на основании формулы (91а), а затем по полученным величинам ξ_0 строят график зависимости ξ_0 от φ.

Между величинами ξ и ξ_0 будет следующая зависимость: $\xi = \xi_0/E$, где E — максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре t.

При введении величины ξ_0 дифференциальное уравнение (90) примет вид:

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_t \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} . \qquad (92)$$

Решение уравнения (92) в общем виде является чрезвычайно сложной задачей, поэтому для практических расчетов представим его в конечных разностях:

$$\frac{\Delta e}{\Delta Z} = \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_t \frac{\Delta^2 e}{\Delta x^2} \qquad (92а)$$

Кроме того, примем, что распределение температуры в ограждении постоянно по времени. Последнее предположение основано на том, что стационарные условия теплопередачи наступают во много раз быстрее, чем те же условия для диффузии водяного пара через ограждающие конструкции, так как влажностная инерционность на 1—2 порядка больше тепловой. Для перехода от одних условий температурного режима к другим требуется для обычных ограждений около двух-трех дней, что практически можно заменить моментальным переходом от одного температурного режима к другому.

Для решения уравнения (92а) разделим плоскую однородную стенку на слои одинаковой толщины Δx. Плоскости, разделяющие слои, обозначим номерами ... $n-1$; n; $n+1$;... Время разобьем на равные интервалы ΔZ часов. Упругости водяного пара будем определять в плоскостях, разделяющих слои, и обозначать их буквами e с двойными индексами, причем первый индекс будет обозначать номер плоскости, а второй индекс — момент времени, которому соответствует данная упругость водяного пара. Тогда уравнение (92 а) примет вид:

$$\frac{e_{n,z+1} - e_{n,z}}{\Delta Z} = \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_n \frac{e_{n+1,z} - 2e_{n,z} + e_{n-1,z}}{\Delta x^2} ,$$

Единой для всех материалов зависимости между теплопроводностью материала и его объемным весом не существует, так как на величину коэффициента теплопроводности оказывают влияние кроме пористости также размер пор и структура материала. При одинаковой пористости величина λ будет тем больше, чем крупнее поры материала, так как с увеличением размера пор повышается коэффициент теплопроводности воздуха, заключенного в порах. Так, например, пенобетон с объемным весом 350 *кг/м*^{3} в зависимости от размера пор имеет следующие величины λ:

При 45 ячейках на 1 *см*^{2} . .	λ=0,13 *ккал/м·ч·град*
» 125 » » 1 » . .	λ=0,1 »

На коэффициент теплопроводности влияет также величина контактных площадок между отдельными частицами материала: чем эти площадки будут больше, тем выше будет и λ. Кроме того, имеет значение, будут ли поры замкнутыми или сообщаться между собой. При сообщающихся порах в материале могут возникать конвекционные токи воздуха, что приводит к увеличению его коэффициента теплопроводности.

На величину коэффициента теплопроводности оказывает влияние и теплопроводность основного вещества. Например, для ряда материалов с одинаковым объемным весом, равным 1800 *кг/м*^{3}, имеем следующие значения коэффициентов теплопроводности:

Цементно-песчаный раствор	λ=0,8 *ккал/м·ч·град*
Кирпич	λ=0,66 »
Асфальт	λ=0,62 »
Портландцементный камень	λ=0,4 »
Асбестоцементные кровельные плитки	λ=0,3 »

Таким образом, попытки дать единую для всех материалов зависимость между теплопроводностью материала и его объемным весом обречены на явную неудачу; такая зависимость может быть дана только для отдельных групп материалов.

Данные табл. 2 показывают, насколько лучшими теплотехническими показателями обладают легкие материалы. Если для получения удовлетворительных теплотехнических качеств наружных стен жилых зданий в условиях Москвы толщина стены из обычного кирпича должна быть в $2^1/_2$ кирпича, то при применении пористого кирпича с объемным весом 1200 *кг/м*^{3} и легкого шлакового раствора эта толщина снижается до $1^1/_2$ кирпича.

Для сыпучих материалов коэффициент теплопроводности уменьшается с уменьшением объемного веса и величины их зерен. Чем мельче частицы сыпучего материала, тем меньше воздушные полости, разделяющие частицы, а следовательно, и меньше теплопроводность содержащегося в них воздуха; кро-

где $e_{n,z+1}$ — упругость водяного пара в плоскости n в момент времени $Z+\Delta Z$.

Решая это уравнение относительно $e_{n,z+1}$, получим:

$$e_{n,z+1} = e_{n,z} + \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_{\text{п}} \frac{\Delta Z}{\Delta x^2} \left(e_{n+1,z} - 2e_{n,z} + e_{n-1,z}\right). \qquad (93)$$

Это есть общая формула для определения упругости водяного пара в любой плоскости через интервал времени ΔZ по упругостям в этой же плоскости и в двух соседних плоскостях в предыдущий момент времени Z. Таким образом, расчет изменения упругости водяного пара во времени сводится к последовательному вычислению упругостей во всех плоскостях стенки через равные интервалы времени ΔZ по формуле (93).

Изменение величины ξ_0 учитывается по изменению величины e в данной плоскости следующим образом[1]. Через каждый интервал времени ΔZ по полученной величине e вычисляется относительная упругость водяного пара по формуле

$$\varphi = \frac{e}{E} 100,$$

где E — максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре данной плоскости. По полученной величине φ и по графику зависимости ξ_0 от φ определяется величина ξ_0 в данной плоскости на данный момент времени. Полученные значения ξ_0 принимаются для расчета величин e в отдельных плоскостях в последующий момент времени через интервал ΔZ. Зная величину φ в данной плоскости, по изотерме сорбции легко определить весовую влажность материала в этой плоскости в любой момент времени.

При расчетах величина Δx может выбираться произвольно, но значение ΔZ при этом должно быть не более значения $\Delta Z_{\text{макс}}$, определяемого из условия[2]

$$\frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_n \frac{\Delta Z}{\Delta x^2} = 0{,}5,$$

откуда получим:

$$\Delta Z_{\text{макс}} = \frac{\Delta x^2}{2 \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_n}. \qquad (94)$$

Интервал времени $\Delta Z_{\text{макс}}$ соответствует установлению стационарных условий диффузии водяного пара между плоскостями $n-1$ и $n+1$. Величина $\Delta Z_{\text{макс}}$ определяется по той плоскости,

---

[1] Метод расчета последовательного изменения влажности материалов в ограждении во времени с учетом изменения величины относительной пароемкости ξ_0 разработан автором в 1953 г. (Подробно см. К. Ф. Фокин. Уточненный метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций. «Холодильная техника», 1955, № 3.)

[2] Аналогично условию для $\Delta Z_{\text{макс}}$ при расчетах теплопередачи в нестационарных условиях.

ме того, по мере измельчения частиц уменьшается и объемный вес материала, и количество проводящего тепло вещества.

Влияние крупности зерен на коэффициент теплопроводности засыпки видно из следующих данных для доменного шлака объемным весом 360 *кг/м*³:

При крупности зерен 2—5 *мм* . . .	λ=0,088 *ккал/м·ч·град*
» » » 30 » . . .	λ=0,12 »

Увеличение размера зерен с 5 до 30 *мм* повышает коэффициент теплопроводности шлаковой засыпки на 36% при одинаковом объемном весе. Таким образом, при оценке теплопроводности сыпучих материалов по их объемному весу необходимо учитывать также крупность зерен засыпки или лабораторным путем определять их коэффициент теплопроводности.

Следовательно, нельзя говорить о величине коэффициента теплопроводности материала, не указывая значения его объемного веса, так как с изменением объемного веса будет изменяться и коэффициент теплопроводности. Во всех справочниках и нормах параллельно со значениями λ материала приводятся и значения γ, что необходимо для правильного выбора коэффициента теплопроводности.

Зависимость коэффициента теплопроводности материала от его влажности. Влажность материала в значительной степени определяет его коэффициент теплопроводности. С повышением влажности материала резко повышается и его коэффициент теплопроводности. Изменение теплопроводности кладки из обыкновенного глиняного кирпича на тяжелом растворе в зависимости от весовой влажности характеризуется следующими данными:

При влажности кирпича 0,1% . . .	$\lambda_{кл}$=0,46 *ккал/м·ч·град*
» » » 0,7% . . .	$\lambda_{кл}$=0,62 »
» » » 2,4% . . .	$\lambda_{кл}$=0,7 »
» » » 4%	$\lambda_{кл}$=0,87 »
» » » 9%	$\lambda_{кл}$=1,18 »

На рис. 4 эта зависимость изображена графически. На рис. 5 приведена зависимость коэффициента теплопроводности от влажности для поризованного керамзитобетона на кварцевом песке, которая имеет такой же характер, как и на рис. 4.

Повышение коэффициента теплопроводности материала с увеличением его влажности объясняется тем, что вода, находящаяся в порах материала, имеет коэффициент теплопроводности λ=0,5, т. е. в 20 раз больший, чем λ воздуха в порах среднего размера. Кроме того, влага в порах материала увеличивает размеры контактных площадок между частицами материала, что также повышает его коэффициент теплопроводности.

Бóльшая интенсивность возрастания коэффициента теплопроводности материала при малой влажности объясняется тем, что при увлажнении материала сначала заполняются водой бо-

в которой величина максимальной упругости E_n является наибольшей.

Если ограждение состоит из нескольких слоев различных материалов, то каждый из слоев делим на равные слои Δx, причем в отдельных слоях различных материалов величины Δx могут быть различными. Для каждого слоя ограждения определяем соответствующее ему значение $\Delta Z_{\text{макс}}$, после чего в расчете принимаем для всего ограждения одно значение ΔZ, равное или меньшее наименьшего из значений $\Delta Z_{\text{макс}}$, полученных для различных слоев.

В плоскости n, разделяющей слои из различных материалов, упругость водяного пара определяем аналогично расчету температуры в плоскости раздела двух материалов при нестационарном тепловом потоке.

Количество пара, притекающего к этой плоскости от плоскости $n-1$:

$$P_1 = (e_{n-1,z} - e_{n,z}) \frac{\mu_1}{\Delta x_1} \Delta Z \ \text{г/м}^2,$$

где Δx_1 — толщина слоя материала с коэффициентом паропроницаемости μ_1.

Количество пара, уходящего от этой плоскости к плоскости $n+1$:

$$P_2 = (e_{n,z} - e_{n+1,z}) \frac{\mu_2}{\Delta x_2} \Delta Z \ \text{г/м}^2,$$

где Δx_2 — толщина слоя материала с коэффициентом паропроницаемости μ_2.

Количество влаги, необходимое для повышения упругости водяного пара в плоскости n на величину Δe_n за время ΔZ:

$$P_0 = \Delta e_n \left(\frac{\Delta x_1}{2} \gamma_1 \frac{\xi_{0,1}}{E_n} + \frac{\Delta x_2}{2} \gamma_2 \frac{\xi_{0,2}}{E_n} \right),$$

где $\xi_{0,1}$ и $\xi_{0,2}$ — относительные пароемкости материалов слоев; E_n — максимальная упругость водяного пара в плоскости n.

Из условия баланса влаги $P_0 = P_1 - P_2$, откуда, подставляя полученные для них выражения и решая полученное уравнение относительно Δe_n, будем иметь:

$$\Delta e_n = 2E_n \Delta Z \frac{(e_{n-1,z} - e_{n,z}) \frac{\mu_1}{\Delta x_1} - (e_{n,z} - e_{n+1,z}) \frac{\mu_2}{\Delta x_2}}{\Delta x_1 \gamma_1 \xi_{0,1} + \Delta x_2 \gamma_2 \xi_{0,2}}. \qquad (95)$$

Формула (95) дает величину изменения упругости водяного пара в плоскости соприкосновения двух материалов за интервал времени ΔZ.

Для определения упругости водяного пара на поверхности, граничащей с воздухом, воспользуемся формулой (95); приняв в ней вместо слоя 1 воздух, имеющий пароемкость $\xi_0 = 0$, и заменяя $\frac{\mu_1}{\Delta x_1}$ величиной, обратной сопротивлению влагообмену у поверхности, примем $\frac{\mu_1}{\Delta x_1} = \frac{1}{R_{\text{в.п}}}$.

лее мелкие поры и капилляры, влияние которых на теплопроводность материала больше, чем крупных пор. Еще более резко возрастает коэффициент теплопроводности в том случае, если влажный материал промерзнет, так как лед имеет коэффициент теплопроводности $\lambda=2$, т. е. в 4 раза больший, чем вода, и, следовательно, в 80 раз больший, чем воздух в порах материала. Однако необходимо учитывать, что замерзание влаги в порах материала происходит при температуре ниже 0°, причем чем меньше размер пор, тем при более низких температурах будет замерзать влага во влажном материале. Пленка влаги толщиной 3,2 μ не замерзает при температуре —4° С, а пленка толщиной 1,4 μ не замерзает и при —17° С. Замерзание влаги в стро-

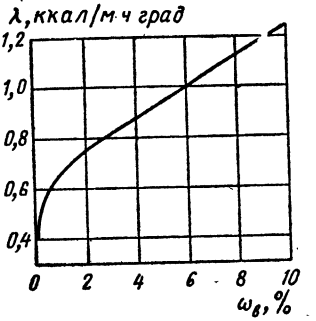


Рис. 4. Зависимость теплопроводности кирпичной кладки от влажности кирпича

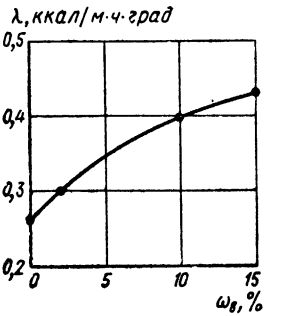


Рис. 5. Зависимость теплопроводности керамзитобетона объемного веса 1000 *кг/м*³ от его влажности (по данным НИИМосстроя)

ительных материалах происходит постепенно по мере понижения температуры.

Очевидно, какое большое влияние на теплотехнический режим ограждения оказывает его влажностное состояние. О причинах повышения влажности материала в наружных ограждениях, расчете влажностного режима, а также о мерах, обеспечивающих нормальный влажностный режим ограждений, сказано во второй части книги.

Установить общую математическую зависимость между теплопроводностью материала и его влажностью, одинаковую для всех строительных материалов, не представляется возможным, так как значительное влияние оказывают форма и расположение пор материала.

Приведенные данные показывают, насколько различно влияет увеличение влажности на изменение коэффициента теплопроводности. Так, в интервале влажностей 0—3% для кирпичной кладки из обожженного глиняного кирпича 1% увеличения влажности кирпича повышает коэффициент теплопроводности кладки на 34%, а такое же увеличение влажности для керамзи-

Кроме того, заменим e_{n-1} упругостью водяного пара воздуха, т. е. примем $e_{n-1,\,z}=e_{\text{в}}$; $\frac{\mu_2}{\Delta x_2}$ заменим величиной $\frac{1}{R_{\Delta.\text{п}}}$, где $R_{\Delta.\text{п}}=\frac{\Delta X}{\mu}$ — сопротивление паропроницанию элементарных слоев, на которые разбито ограждение. Тогда формула (95) примет вид:

$$\Delta e_0 = 2E_0\Delta Z\,\frac{(e_{\text{в}}-e_{0,\,z})\frac{1}{R_{\text{в.п}}}-(e_{0,\,z}-e_{1,\,z})\frac{1}{R_{\Delta\text{п}}}}{\Delta x\gamma\xi_0},$$

откуда окончательно получим:

$$\Delta e_0 = \frac{2\Delta Z}{\Delta x\gamma\xi_0}E_0\left(\frac{e_{\text{в}}-e_{0,\,z}}{R_{\text{в.п}}}-\frac{e_{0,z}-e_{1,z}}{R_{\Delta\text{п}}}\right), \qquad (96)$$

где Δe_0 — изменение упругости водяного пара на поверхности, граничащей с воздухом, за время ΔZ в *мм рт. ст.*; E_0 — максимальная упругость водяного пара на этой поверхности в *мм рт. ст.*

При значениях ΔZ, близких к $\Delta Z_{\text{макс}}$, а также в начальные моменты расчета, когда значения $e_{\text{в}}$—e_0 и e_0—e_1 резко различны по величине, расчет по формуле (96) может дать завышенное значение Δe_0. Поэтому величина Δe_0, получаемая по формуле (96), не должна превышать значения $e_{0.\,\text{макс}}$, получаемого из условия установления стационарного состояния диффузии водяного пара между воздухом и плоскостью *1*, определяемого по формуле

$$\Delta e_{0,\,\text{макс}} = \frac{R_{\Delta\text{п}}e_{\text{в}}+R_{\text{в.п}}e_{1,\,z}}{R_{\text{в.п}}+R_{\Delta\text{п}}}-e_{0,z}\,. \qquad (97)$$

Первый член правой части формулы (97) получается из условия баланса, т. е. из условия, что количество пара P_1, притекающего к поверхности от воздуха, должно быть равно количеству пара P_2, уходящему к плоскости *1*. Величины P_1 и P_2 будут:

$$P_1 = \frac{e_{\text{в}}-e_{0,z+1}}{R_{\text{в.п}}}\Delta Z;$$

$$P_2 = \frac{e_{0,z+1}-e_{1,z}}{R_{\Delta\text{п}}}\Delta Z.$$

Приравнивая P_1 и P_2 и решая полученное уравнение относительно $e_{0,\,z+1}$, будем иметь:

$$e_{0,\,z+1} = \frac{R_{\Delta\text{п}}e_{\text{в}}+R_{\text{в.п}}e_{1,z}}{R_{\text{в.п}}+R_{\Delta\text{п}}}\,. \qquad (98)$$

Формула (98) применима для определения $e_{0,\,z+1}$ в том случае, если $\Delta Z=\Delta Z_{\text{макс}}$, соответствующему максимальной упругости водяного пара E_0 на поверхности ограждения.

тобетона повышает коэффициент теплопроводности только на 8%. Для органических материалов эта зависимость будет иной, чем для материалов минерального происхождения.

Различные исследователи дают эмпирические формулы зависимости коэффициента теплопроводности от влажности для отдельных материалов, но эти формулы применимы только для данного материала. Зависимости величин коэффициентов теплопроводности строительных материалов от их влажности для различных материалов, обработанные в виде таблиц, даны проф. А. У. Франчуком [31].

В физических лабораториях коэффициенты теплопроводности строительных материалов определяются обычно на предварительно просушенных образцах, чтобы получить сравнимые коэффициенты теплопроводности для различных материалов, исключая влияние влажности на полученные результаты. В наружных ограждениях строительные материалы всегда имеют некоторую влажность, повышающую их теплопроводность. Вследствие этого пользоваться для теплотехнических расчетов ограждающих конструкций непосредственно коэффициентами теплопроводности, полученными для сухого материала, нельзя — эти коэффициенты необходимо увеличивать. Коэффициенты теплопроводности ряда строительных материалов приведены в приложении 1.

Зависимость коэффициента теплопроводности материала от его температуры. Коэффициент теплопроводности материала увеличивается с повышением его средней температуры, при которой происходит передача тепла. Для иллюстрации этого в табл. 3 приведены коэффициенты теплопроводности некоторых изоляционных материалов, определенные при различных температурах.

Таблица 3

Изменение λ изоляционных материалов в зависимости от их температуры

Материал	Объемный вес γ, *кг/м³*	λ, *ккал/м·ч·град* при температурах				Увеличение λ от 0 до 50° в, %
		0°	50°	100°	150°	
Асбест	576	0,13	0,153	0,167	0,175	17,7
Трепельный кирпич . .	200	0,064	0,071	0,078	0,085	10,9
Пробковая мелочь . . .	160	0,031	0,041	0,048	—	32,3

Увеличение теплопроводности материалов с повышением их температуры происходит в результате увеличения теплопроводности основной их массы из-за возрастания кинетической энергии молекул. Кроме того, с повышением температуры возрастает и теплопроводность воздуха в порах материала, а также интенсивность передачи в них тепла излучением.

Так, например, в порах размером около 0,1 *мм* воздух имеет $\lambda=0{,}021$ при 0° и $\lambda=0{,}027$ при 100° С, т. е. увеличение тепло-

Начальные величины упругостей водяного пара на границах слоев определяются по начальной влажности материала ограждения, распределению температуры в ограждении и соответствующим изотермам сорбции для данного материала. Вычисляя последовательно изменения величин упругостей водяного пара на границах слоев, получим распределение упругостей по толщине ограждения в любой момент времени.

Если при вычислении упругостей водяного пара в какой-либо из плоскостей, величина e получится больше значения E, соответствующего температуре в этой плоскости, то это будет указывать на конденсацию в ней водяного пара, и величина e принимается равной E. Влажность материала в этом случае определяется как соответствующая относительной упругости водяного пара $\varphi=100\%$ с добавлением количества конденсата, образовавшегося в этой плоскости[1].

Изложенный метод расчета нестационарного влажностного режима ограждения получил название метода последовательного увлажнения как дающий последовательное изменение влажности материала в ограждении во времени, но он же в полной мере применим и для расчетов высыхания ограждений.

Пример 46. Расчет влажностного режима экспериментального бесчердачного армопенобетонного покрытия[2].

Толщина армопенобетонной плиты 120 *мм*. Объемный вес пенобетона 775 *кг/м*^{3}. По плите наклеен рулонный ковер из слоя рубероида и двух слоев пергамина. Физические показатели пенобетона, определенные экспериментально, следующие: коэффициент теплопроводности $\lambda=0{,}24$ *ккал/м·ч·град*; коэффициент паропроницаемости $\mu=0{,}025$ *г/м·ч·мм рт. ст.*; изотерма сорбции приведена на рис. 70. Сопротивление паропроницанию рулонного ковра $R_п=18{,}6$ *мм·ч·м*^{2}*/г*.

Испытание проводилось в течение 49 суток при средних температурах: воздуха под покрытием 18,1° С и на поверхности кровельного ковра — 6,7° С. Относительная влажность воздуха под покрытием была 61% и упругость водяного пара $e_в=9{,}5$ *мм рт. ст.* Начальная влажность пенобетона $\omega_в=3{,}85\%$.

По изотерме сорбции (рис. 70) построен график зависимости ξ_0 от φ, приведенный на рис. 71. Для примера на рис. 70 приведено определение ξ_0 для $\varphi=70\%$. Касательная, проведенная к изотерме в этой точке, отсекает на оси ординат $\omega_в=6{,}9\%$ и на оси абсцисс $\varphi=27{,}5\%$. По этим данным на основании формулы (91а) получим:

$$\xi_0=\frac{6{,}9}{100-27{,}5}1000=95\ г/кг.$$

Аналогично получены значения ξ_0 для других точек, отмеченных кружками на графике рис. 71. График показывает, что относительная пароемкость имеет минимум ($\xi_0=25$ *г/кг*) при $\varphi=40\%$, что соответствует изменению знака кривизны изотермы. Максимальное значение относительной пароемкости равно 450 *г/кг*, т. е. оно в 18 раз более минимального значения.

Для расчета влажностного режима делим пенобетонную плиту на пять равных слоев толщиной каждый $\Delta x=0{,}024$ *м* (рис. 72). Плоскости раздела слоев нумеруем в направлении от внутренней поверхности плиты к наружной. При указанных выше температурах воздуха под покрытием и на поверхности

[1] Расчет увлажнения конденсационной влагой с учетом перемещения ее изложен ниже в главе XI.

[2] Эксперименты проведены А. Х. Бершидским.

проводности на 28,5%. В порах размером около 2 *мм* воздух имеет $\lambda=0{,}027$ при 0° и $\lambda=0{,}044$ при 100°, т. е. увеличение теплопроводности составляет уже 63%. Это видно и из табл. 3: наибольшее увеличение коэффициента теплопроводности имеет пробковая мелочь с более крупными полостями воздуха между отдельными кусочками, наименьшее — трепельный мелкопористый кирпич.

В строительной практике зависимость теплопроводности от температуры практического значения не имеет, так как изменения температуры материала в строительных ограждениях редко превышают 60° С. В практике теплоизоляции поверхностей с высокой температурой, где изменения температуры могут быть значительными, эту зависимость приходится учитывать.

Для пересчета значений коэффициентов теплопроводности материалов, полученных при температурах до 100° С, на значения их при 0° служит эмпирическая формула О. Е. Власова

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_t}{1+\beta t}, \qquad (13)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности материала при 0°; λ_t — коэффициент теплопроводности материала при t° С; t — температура материала, при которой коэффициент теплопроводности его равен λ_t; β — коэффициент для различных строительных материалов, равный примерно 0,0025.

В справочниках и руководствах параллельно с указанием величины коэффициента теплопроводности материалов приводятся также температуры, при которых получен этот коэффициент. То же указывается и в аттестатах испытания теплопроводности материалов, даваемых физическими лабораториями, чтобы можно было в случае необходимости сделать пересчет полученных коэффициентов на другие температуры.

Зависимость величины коэффициента теплопроводности от направления теплового потока наблюдается только у анизотропных материалов. Для иллюстрации этой зависимости в табл. 4 приводятся коэффициенты теплопроводности древесины в зависимости от направления теплового потока. Данные таблицы по-

Таблица 4

Изменение λ древесины в зависимости от направления теплового потока

Древесина	Объемный вес γ, *кг/м*³	λ древесины при направлении потока тепла		Увеличение λ при направлении потока тепла параллельно волокнам в %
		перпендикулярно волокнам	параллельно волокнам	
Сосна	550	0,15	0,3	100
Дуб	800	0,2	0,35	75

кровельного ковра температуры в плоскостях раздела будут соответствовать приведенным в расчетной таблице. Там же приведены и соответствующие им максимальные упругости водяного пара E.

Начальной влажности пенобетона $\omega_{нач}=3{,}85\%$ по изотерме сорбции (рис. 70) соответствует $\varphi=67\%$, для которой по графику рис. 71 получим

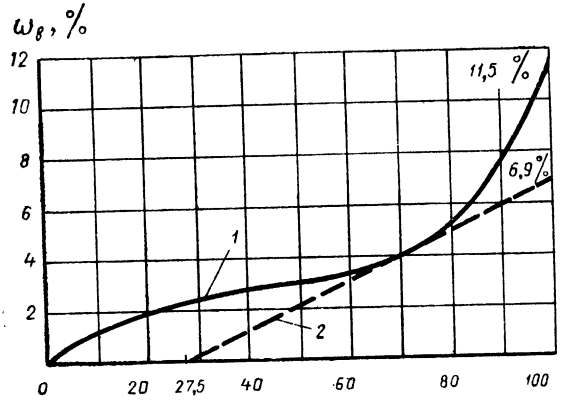


Рис. 70. К определению относительной пароемкости

1 — изотерма сорбции; *2*—касательная к изотерме сорбции в точке заданной влажности ($\varphi=70\%$)

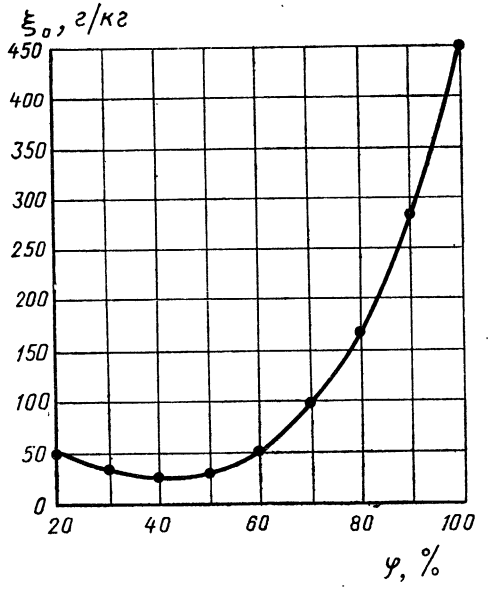


Рис. 71. Зависимость относительной пароемкости пенобетона от относительной упругости водяного пара

$\xi_0=78$ *г/кг*. По этим данным и по максимальной упругости в первой плоскости $E_1=9{,}09$ *мм* определяем по формуле (94) максимально допустимый интервал времени $\Delta Z_{макс}$:

$$\Delta Z_{макс}=\frac{0{,}024^2}{2\dfrac{0{,}025}{78\cdot 775}9{,}09}=77\ ч.$$

казывают, что коэффициент теплопроводности древесины значительно увеличивается при направлении теплового потока параллельно направлению волокон, например для сосны на 100%.

Различие в величинах коэффициентов теплопроводности дерева в зависимости от направления теплового потока объясняется тем, что при направлении, перпендикулярном волокнам, тепловому потоку приходится пересекать большое количество воздушных зазоров, находящихся внутри волокон древесины и между ними и оказывающих сопротивление прохождению тепла. При направлении теплового потока параллельно волокнам тепловой поток будет идти по стенкам волокон, и в этом случае сопротивление воздуха, заключенного в древесине, будет значительно меньше.

Направление теплового потока влияет на величину коэффициента теплопроводности также у прессованных материалов или материалов, имеющих волокнистую структуру, и у кристаллов. У изотропных материалов направление теплового потока не влияет на их коэффициент теплопроводности.

Увеличением коэффициента теплопроводности древесины при потоке тепла вдоль волокон объясняется резкое понижение температуры в наружных углах деревянных бревенчатых или брусковых стен.

При выборе значений коэффициента теплопроводности древесины необходимо учитывать расположение дерева в конструкции и направление теплового потока, например, для деревянного дощатого пола коэффициент теплопроводности древесины будет меньше, чем для пола из торцовых шашек, так как в первом случае поток тепла имеет направление, перпендикулярное волокнам древесины, а во втором — параллельное им.

Выбор расчетных значений коэффициентов теплопроводности строительных материалов. Самой трудной и ответственной частью теплотехнических расчетов является выбор расчетных величин коэффициентов теплопроводности материалов, входящих в конструкцию. Решающее значение в этом выборе имеет опыт лица, производящего теплотехнические расчеты. В СНиП II-А.7-71 для каждого материала даются три значения коэффициента теплопроводности — для сухого состояния, для нормальной влажности и для повышенной влажности. Выбор значений λ делается в зависимости от относительной влажности воздуха в помещении и от влажностно-климатической характеристики места строительства. Это значительно уточняет выбор расчетных величин коэффициентов теплопроводности. Если рассматриваемый материал по составу и по объемному весу совпадает с одним из материалов, приведенных в СНиП, то величина коэффициента теплопроводности материала берется непосредственно по нормам. Если объемный вес материала отличается от приведенного в СНиП, его расчетный коэффициент теплопроводности определяется по интерполяции между известными значениями

В расчете принимаем $\Delta Z=72$ *ч*, т. е. 3 суток.

Расчетные формулы для вычисления упругостей водяного пара в отдельных плоскостях будут следующими.

Плоскость *О* — нижняя поверхность плиты. Сопротивление влагообмену $R_{в.п}=0{,}2$ *мм·ч·м²/г*. Сопротивления паропроницанию отдельных слоев будут:

$$R_{\Delta n}=\frac{0{,}024}{0{,}025}=0{,}96.$$

Упругость водяного пара в плоскости *О* по формуле (98)

$$e_{0,z+1}=\frac{0{,}96\cdot 9{,}5+0{,}2e_{1,z}}{0{,}96+0{,}2}=0{,}17e_{1,z}+7{,}88.$$

Плоскости *1—4*. В этих плоскостях упругость водяного пара вычисляется по формуле (93):

$$e_{n,z+1}=e_{n,z}+a\left(e_{n-1,z}-2e_{n,z}+e_{n+1,z}\right),$$

где

$$a=\frac{0{,}025\cdot 72}{775\cdot 0{,}024^2}\cdot\frac{E_n}{\xi_0}=4{,}02\frac{E_n}{\xi_0}.$$

Значения a в отдельных плоскостях будут следующими:

$$a_1=4{,}02\frac{9{,}09}{\xi_0}=\frac{36{,}6}{\xi_0};\quad a_2=4{,}02\frac{7{,}16}{\xi_0}=\frac{28{,}8}{\xi_0};$$

$$a_3=4{,}02\frac{5{,}57}{\xi_0}=\frac{22{,}4}{\xi_0};\quad a_4=4{,}02\frac{4{,}3}{\xi_0}=\frac{17{,}3}{\xi_0}.$$

Плоскость *5* — под рулонным ковром. Упругость водяного пара наружного воздуха была $e_н=1{,}9$ *мм рт. ст.*

Изменение упругости водяного пара в этой плоскости за интервал времени ΔZ вычисляем по формуле (96):

$$\Delta e_5=\frac{2\cdot 72\cdot 3{,}2}{0{,}024\cdot 775\xi_0}\left(\frac{1{,}9-e_{5,z}}{18{,}6}-\frac{e_{5,z}-e_{4,z}}{0{,}96}\right)=\frac{1}{\xi_0}\left(25{,}8e_{4,z}+2{,}53-27{,}2_{5,z}\right).$$

Расчет увлажнения армопенобетонного покрытия приведен в расчетной таблице.

Начиная с девятых суток интервал времени ΔZ увеличен до 5 суток (120 *ч*), так как при $Z=9$ суток в плоскости *1* относительная пароемкость повысилась до $\xi_0=134$ *г/кг*, и при этом получим:

$$\Delta Z_{макс}=\frac{0{,}024^2}{2\dfrac{0{,}025}{134\cdot 775}9{,}09}=132\ ч.$$

Расчетные формулы изменяются следующим образом. В плоскости *О* — без изменения. Для плоскостей *1—4* получим следующие значения коэффициента a:

$$a_1=\frac{61}{\xi_0};\quad a_2=\frac{48}{\xi_0};\quad a_3=\frac{37{,}3}{\xi_0};\quad a_4=\frac{28{,}8}{\xi_0}.$$

В плоскости *5* изменение упругости водяного пара будет вычисляться по формуле

$$\Delta e_5=\frac{1}{\xi_0}\left(43\,e_{4z}+4{,}22-45{,}3e_{5,z}\right).$$

Расчетная таблица

Плоскости		0	1	2	3	4	5
Температуры τ		13,3	9,8	6,3	2,7	—0,8	—4,3
E		11,45	9,09	7,16	5,57	4,3	3,2
$Z=0$:	e	7,66	6,08	4,8	3,73	2,88	2,14
	φ	67	67	67	67	67	67
	ξ_0	78	78	78	78	78	78
$Z=3$ сут.:	e	8,91	6,22	4,88	3,79	2,9	2,38
	φ	—	68,5	68	68	67,5	74,5
	ξ_0	—	86	83	83	80	123
$Z=6$ » :	e	8,94	6,79	4,97	3,84	2,99	2,48
	φ	—	74,5	69,5	69	69,5	77,5
	ξ_0	—	123	92	89	92	146
$Z=9$ » :	e	9,03	6,89	5,19	3,91	3,05	2,56
	φ	—	76	72,5	70	71	80
	ξ_0	—	134	110	95	100	168
$Z=14$ » :	e	9,05	7,09	5,37	4,08	3,16	2,67
	φ	—	78	75	73,5	73,5	83,5
	ξ_0	—	150	126	115	115	202
$Z=19$ » :	e	9,08	7,19	5,53	4,2	3,27	2,77
	φ	—	79	77	75,5	76	86,5
	ξ_0	—	159	142	130	134	238
$Z=24$ » :	e	9,1	7,28	5,64	4,32	3,36	2,85
	φ	—	80	78,5	77,5	78	89
	ξ_0	—	168	154	146	150	271
$Z=29$ » :	e	9,12	7,35	5,74	4,41	3,45	2,92
	φ	—	81	80	79	80	91
	ξ_0	—	176	168	159	168	300
$Z=34$ » :	e	9,13	7,41	5,82	4,5	3,52	2,99
	φ	—	81,5	81,5	80,5	82	93,5
	ξ_0	—	181	181	172	186	335
$Z=39$ » :	e	9,14	7,45	5,89	4,57	3,59	3,05
	φ	—	82	82	82	83,5	95,5
	ξ_0	—	186	186	186	202	366

для других объемных весов или по экстраполяции за пределами крайних значений.

Пример 1. Сплошные шлакобетонные камни для кладки наружных стен имеют $\gamma=1650$ *кг/м*³. Определить их расчетный коэффициент теплопроводности.

По приложению 1 для шлакобетона:

при $\gamma=1200$ *кг/м*³ $\lambda=0{,}45$ *ккал/м·ч·град*;
» $\gamma=1500$ » $\lambda=0{,}6$ »

Камни для кладки стен имеют $\gamma=1650$ *кг/м*³, следовательно, их λ будет больше, чем для шлакобетона с $\gamma=1500$ *кг/м*³; принимая увеличение λ при объемном весе более 1500 *кг/м*³ пропорциональным его изменению в пределах γ от 1200 до 1500 *кг/м*³, получим расчетный коэффициент теплопроводности камней равным:

$$\lambda = 0{,}6 + \frac{0{,}6 - 0{,}45}{1500 - 1200}(1650 - 1500) = 0{,}675 \text{ ккал/м·ч·град}.$$

При лабораторном определении коэффициент теплопроводности для сухого материала сначала приводится к температуре 0° С, а затем полученное значение увеличивают с учетом влажности материала.

Пример 2. Теплопроводность органических плит определена в лабораторных условиях в сухом состоянии. Объемный вес плит 240 *кг/м*³, коэффициент теплопроводности $\lambda=0{,}052$ *ккал/м·ч·град* при температуре 35° С. Определить расчетную величину коэффициента теплопроводности.

Предварительно по формуле (13) определим при 0° С:

$$\lambda_0 = \frac{0{,}052}{1 + 0{,}0025 \cdot 35} = 0{,}048.$$

Нормальную объемную влажность торфоплит по табл. 1 принимаем равной 4,5%.

Для органических материалов с объемным весом 250 *кг/м*³ и пористостью 83% имеем в зависимости от объемной влажности ω_0 следующие значения коэффициентов теплопроводности при положительных λ_+ и отрицательных λ_- температурах [31]:

ω_0	0	2	5	При $\omega_0=4{,}5\%$	Увеличение λ при $\omega_0=4{,}5\%$ против $\omega=0$
λ_+	0,063	0,072	0,084	0,082	30%
λ_-	0,063	0,074	0,089	0,087	38%

Принимая для испытанных плит такое же увеличение коэффициента теплопроводности при $\omega_0=4{,}5\%$, получим следующие расчетные значения λ:

при положительных температурах $\lambda_+=0{,}048 \cdot 1{,}3=0{,}062$;
» отрицательных » $\lambda_-=0{,}048 \cdot 1{,}38=0{,}066$.

Так как в наружных ограждающих конструкциях плиты будут находиться частично в зоне положительных и частично в зоне отрицательных температур, в качестве расчетного значения λ принимаем среднее из полученных, т. е. $\lambda=0{,}064$ *ккал/м·ч·град*.

Продолжение

Плоскости	0	1	2	3	4	5
$Z=44$ » :						
e	9,15	7,49	5,95	4,64	3,65	3,11
φ	—	82,5	83	83,5	85	97
ξ_0	—	191	196	202	219	394
$Z=49$ » :						
e	9,15	7,53	6,01	4,7	3,71	3,16
φ	80	83	84	84,5	86,5	99
Влажность по расчету ω	5,3	5,9	6,2	6,3	6,8	11%
Влажность по данным испытаний ω'	4,8	5,9	6,5	6,8	7,3	11,2%

По значениям относительной упругости водяного пара φ, полученным при $Z=49$ суток по изотерме сорбции (рис. 70), определены влажности пенобетона в отдельных плоскостях покрытия. Эти влажности даны в предпоследней строке расчетной таблицы. Средняя влажность пенобетона получилась равной:

$$\omega_{\text{сред}} = \frac{5{,}3 + 2\,(5{,}9 + 6{,}2 + 6{,}3 + 6{,}8) + 11}{10} = 6{,}7\%.$$

В последней строке расчетной таблицы приведены влажности пенобетона, полученные по данным выемки проб пенобетона из покрытия. Сравнение этих влажностей с расчетными показывает близкое их совпадение; расхождение в отдельных плоскостях не превышает 0,5% весовой влажности. Средняя влажность пенобетона по испытаниям равна 6,9%, т. е. только на 0,2% выше расчетной.

На рис. 72 приведены линии распределения влажности пенобетона по толщине покрытия. Сплошной линией дано распределение влажности пенобетона, полученное по испытаниям. Пунктирная линия дает распределение влажности пенобетона, полученное по расчету. Обе линии имеют одинаковый характер и достаточно близкое совпадение, что указывает на хорошую сходимость расчета с результатами эксперимента.

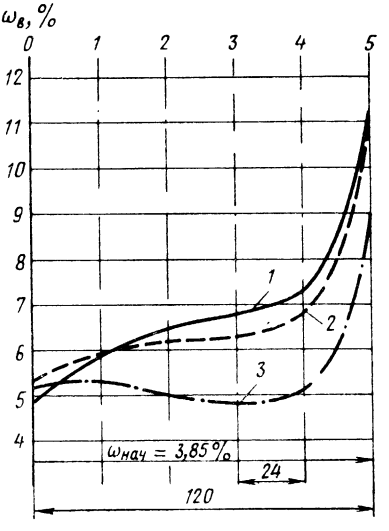


Рис. 72. Распределение влажности пенобетона в покрытии

1 — по данным испытаний; *2* — по расчету при переменной величине относительной пароемкости; *3* — то же, при осредненной постоянной

Из сказанного следует, что приводимые в различных справочниках и руководствах значения коэффициентов теплопроводности должны сопровождаться указанием объемного веса, температуры испытания и влажности материала.

В аттестатах испытаний материалов, полученных от физических лабораторий, также должны быть указаны объемный вес, влажность и температура, при которых было проведено испытание.

4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Теплоемкость — это свойство материалов поглощать тепло при повышении температуры. Показателем теплоемкости является удельная теплоемкость материала c. Удельная теплоемкость показывает количество тепла в *ккал*, которое необходимо сообщить 1 *кг* данного материала, чтобы повысить температуру всей его массы на 1°. Удельная теплоемкость имеет размерность *ккал/кг·град*.

Для строительных материалов удельная теплоемкость изменяется в пределах от $c=0{,}18$ (для минеральной ваты) до $c=0{,}6$ *ккал/кг·град* (для дерева). Наибольшей удельной теплоемкостью обладает вода ($c=1$), что следует из самого определения килограмм-калории. Сталь имеет $c=0{,}115$ *ккал/кг·град*.

Удельная теплоемкость материала зависит от его влажности. С повышением влажности материала повышается и его теплоемкость, что объясняется присутствием воды, имеющей теплоемкость, значительно превышающую теплоемкость строительных материалов.

Зависимость удельной теплоемкости материала от его влажности выражается формулой

$$c = \frac{c_0 + 0{,}01\omega_в}{1 + 0{,}01\omega_в}, \qquad (14)$$

где c — удельная теплоемкость материала при влажности $\omega_в$; c_0 — удельная теплоемкость этого же материала в сухом состоянии; $\omega_в$ — весовая влажность материала в %.

В приложении 1 теплоемкости строительных материалов даны для их нормальной влажности. Если по каким-либо причинам влажность материала в конструкции будет отличаться от нормальной, то его удельная теплоемкость подсчитывается по формуле (14); для этого вместо c_0 берется удельная теплоемкость при нормальной влажности и вместо $\omega_в$ — разность между этой влажностью и нормальной.

Если строительный материал состоит из нескольких различных материалов, то его удельная теплоемкость определяется по формуле

$$c = \frac{c_1P_1 + c_2P_2 + c_3P_3 + \ldots}{P_1 + P_2 + P_3 + \ldots}, \qquad (15)$$

где c_1, c_2, ... — удельные теплоемкости составляющих материалов; P_1, P_2, ... — весовые части составляющих материалов.

Пример 3. Определить удельную теплоемкость битумоперлитобетона объемным весом 350 *кг/м*^{3}, применяемого для утепления стыков крупнопанельных зданий. Состав битумоперлитобетона: битума 1 вес. ч., перлитового песка 1,2 вес. ч.

Удельные теплоемкости: битума $c_1=0{,}4$, перлита $c_2=0{,}2$ *ккал/кг·град*.

По формуле (15) получим удельную теплоемкость битумоперлитобетона:

$$c=\frac{0{,}4\cdot 1+0{,}2\cdot 1{,}2}{1+1{,}2}=0{,}29\ ккал/кг\cdot град.$$

Произведение удельной теплоемкости на величину объемного веса $C_{об}=c\gamma$ называется объемной теплоемкостью материала и имеет размерность *ккал/м*$^3\cdot$*град*.

5. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Излучение есть свойство материала отдавать тепло в окружающую среду в форме лучистой энергии. Интенсивность излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры излучающей поверхности. Способность материала излучать тепло характеризуется его коэффициентом излучения C. Коэффициент излучения выражается количеством калорий тепла, излучаемого 1 *м*^{2} поверхности материала в течение 1 *ч* в пустоту при абсолютной температуре излучающей поверхности, равной 100° К. Коэффициент излучения отнесен к 100° К, так как если относить его к 1°, получаются очень малые числовые значения. Коэффициент излучения имеет размерность *ккал/м*$^2\times$ $\times ч^\circ$ К^4.

Величина коэффициента излучения зависит от химического состава излучающего вещества, а также в значительной степени от характера обработки излучающей поверхности. Полированные поверхности имеют значительно меньший коэффициент излучения, чем шероховатые поверхности того же материала. Так, например, обычная кровельная сталь имеет $C=3{,}4$, полированная сталь $C=1{,}2$.

Для строительных материалов значения коэффициентов излучения при обычной обработке их поверхностей изменяются в пределах от $C=3{,}1$ (бетон) до $C=4{,}75$ (асбестовый картон). Полированная поверхность гранита имеет $C=2{,}1$. Малый коэффициент излучения имеет алюминий $C=0{,}22$. Это свойство используется в строительной практике.

Значения коэффициентов излучения некоторых строительных материалов приведены в приложении 2.

Третья линия, приведенная на рис. 72, дает распределение влажности, полученное при расчете с постоянным значением относительной пароемкости пенобетона. В этом расчете относительная пароемкость пенобетона взята средней в интервале относительных упругостей водяного пара 70—100% и равна:

$$\xi_0 = \frac{11{,}5 - 4{,}1}{100 - 70} 1000 = 247 \text{ г/кг}.$$

Рис. 72 показывает, что распределение влажности пенобетона, полученное при постоянном значении ξ_0, значительно отличается от фактического по характеру и по величинам влажности пенобетона. При этом средняя влажность пенобетона получилась равной только 5,4%.

Аналогичные расчеты, проведенные для покрытия в виде сплошной деревоплиты толщиной 100 *мм* с рулонным кровельным ковром, при температурах воздуха внутреннего 18° С и наружного —11° С и при влажности внутреннего воздуха 60% показали следующее. При начальной влажности дерева 20% конденсат в покрытии начинает образовываться через 50 суток от начала увлажнения. При начальной влажности дерева 12% образование конденсата начинается только через 210 суток, т. е. в этом случае продолжительности зимнего периода не хватает для образования конденсата в покрытии. Этот пример показывает, какое большое значение для нормального влажностного режима ограждения имеет применение материалов с минимальной начальной влажностью.

Изложенный метод расчета влажностного режима в нестационарных условиях диффузии водяного пара дает возможность учитывать также изменение во времени величины упругости водяного пара с одной и с другой стороны ограждения.

Трудоемкий процесс расчета влажностного режима в нестационарных условиях резко упрощается при применении ЭВМ.

4. МЕРЫ ПРОТИВ КОНДЕНСАЦИИ ВЛАГИ В ОГРАЖДЕНИИ

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

Глава III. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ

Стационарные условия теплопередачи характеризуются постоянством во времени величины теплового потока и температуры ограждения (см. главу I). При стационарном режиме теплопередачи все теплотехнические расчеты значительно упрощаются. Поэтому обычно при теплотехнических расчетах наружных ограждений зданий принимается, что теплопередача происходит при стационарном тепловом потоке. В некоторых случаях, когда расчеты для стационарных условий дают слишком резкие отклонения от действительных, учитывается изменение во времени величины теплового потока и температуры ограждения (глава V).

Большинство наружных ограждений зданий представляет собой плоские стены, т. е. параллельные плоскости, ограждающие здание с обеих сторон. Поэтому в дальнейшем все изложенное будет относиться к 1 $м^2$ плоских стен неограниченного протяжения, т. е. к участкам их, достаточно удаленным от проемов или мест примыкания к другим ограждающим конструкциям. Расчет теплопередачи ограждений, имеющих выступы или углы, или в местах примыкания их к другим ограждениям делается на основании построения их температурных полей, о чем сказано далее. Своды или стены, имеющие в плане круговое очертание, имеют обычно настолько большие радиусы кривизны, что их можно рассматривать как плоские стенки.

Количество тепла, проходящего через ограждение, пропорционально разности температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения, площади ограждения и времени, в течение которого происходит передача тепла, и, кроме того, зависит от теплотехнических свойств самого ограждения. Количество тепла, передаваемого ограждением, определяется по формуле

$$Q = k(t_в - t_н)\,Fz, \qquad (16)$$

где $t_в$ — температура воздуха с внутренней стороны ограждения; $t_н$ — температура воздуха с наружной стороны ограждения; F — площадь ограждения в $м^2$; z — продолжительность передачи тепла в часах; k — коэффициент, зависящий от теплотехнических свойств ограждения и называемый коэффициентом теплопередачи.

Для выяснения физического смысла коэффициента теплопередачи ограждения положим в формуле (16), что $t_в - t_н = 1°$, $F = 1$ $м^2$, $z = 1$ $ч$, тогда $k = Q$. Следовательно, коэффициент теплопередачи ограждения измеряется количеством тепла в *ккал*, которое будет проходить в течение 1 $ч$ через 1 $м^2$ ограждения при разности температур воздуха с одной и с другой его стороны, равной 1°. Размерность коэффициента теплопередачи — *ккал/м²·ч·град*. Формулой (16) пользуются при проектирова-

Если по техническим или конструктивным соображениям такое расположение материалов в ограждении невозможно, то для обеспечения его от внутренней конденсации применяют «пароизоляционные слои», т. е. слои, состоящие из паронепроницаемых материалов или обладающих очень малой проницаемостью. Из строительных материалов абсолютной паронепроницаемостью обладают только стекло и металлы, применение которых, однако, для этой цели нерационально — стекла вследствие его хрупкости, а металла вследствие подверженности коррозии. Очень небольшую паропроницаемость имеют битумные мастики, лаки, смолы, хорошо выполненная масляная покраска и разного рода изоляционные бумаги (рубероид, пергамин, толь и пр.). Слои из таких материалов, имея очень малую паропроницаемость, оказывают значительное сопротивление потоку водяного пара, проходящему через ограждение, уменьшают количество его и изменяют самый характер падения упругости водяного пара в ограждении.

В табл. 24 даны значения величин сопротивлений паропроницанию для некоторых пароизоляционных слоев и листовых материалов, применяемых в наружных ограждениях.

Таблица 24

Сопротивления паропроницанию $R_п$ пароизоляционных и листовых материалов

Материал	Толщина слоя в *мм*	$R_п$, *мм·ч·м²/г*	Материал	Толщина слоя в *мм*	$R_п$, *мм·ч·м²/г*
Кровельный ковер трехслойный (два слоя пергамина и слой рубероида на битумной мастике)	10	18,6	Покрытие битумно-кукерсольной мастикой за 2 раза . .	—	8,1
То же, двухслойный (пергамин и рубероид на битумной мастике)	6	12,8	Покрытие мастикой БЛК в два слоя .	—	19,2
Окраска горячим битумом тщательная за 1 раз	—	2	Покрытие хлоркаучуковым лаком за 2 раза . . .	—	26
Окраска масляной краской за 2 раза со шпаклевкой и грунтовкой . . .	—	4,8	Пергамин	0,4	2,5
Окраска эмалевой краской	—	3,6	Рубероид одинарный	1,5	8,3
			Толь кровельный . .	1,9	3
			Фанера клееная трехслойная	5	1,5
			Штукатурка сухая гипсовая листами .	8	0,9
			Штукатурка сухая древесноволокнистыми листами . .	10	1

Пароизоляционный слой должен располагаться первым в направлении потока водяного пара, т. е. в наружных ограждениях

нии отопления зданий для подсчета количества тепла, теряемого помещениями.

Если вместо температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения будут известны температуры на поверхностях ограждения, то формула (16) примет вид:

$$Q = \Lambda(\tau_в - \tau_н) Fz, \qquad (16а)$$

где $\tau_в$ — температура внутренней поверхности ограждения; $\tau_н$ — температура наружной поверхности ограждения; Λ — коэффициент, зависящий от теплотехнических свойств ограждения и называемый коэффициентом теплопроницания ограждения.

Размерность коэффициента теплопроницания (*ккал/м²·ч××град*) одинакова с размерностью коэффициента теплопередачи, разница между ними только в том, что k относится к 1° разности температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения, а Λ — к 1° разности температур на одной и другой поверхности ограждения.

Тепловой поток, проходящий через ограждение, встречает некоторое сопротивление, которое характеризуется величиной, обратной коэффициенту теплопередачи, носящей название сопротивления теплопередаче и обозначаемой R_0. Таким образом, $R_0 = 1/k$ и обратно $k = 1/R_0$; следовательно, R_0 имеет размерность *град·м²·ч/ккал*.

Сопротивление теплопередаче ограждения выражается разностью температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения, при которой тепловой поток через 1 *м²* ограждения равняется 1 *ккал/ч*.

Чем больше R_0, тем большей должна быть разность температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения, чтобы создать тепловой поток через него, равный 1 *ккал/м²·ч*. Следовательно, R_0 есть величина, оценивающая теплозащитные свойства ограждения.

Величина, обратная коэффициенту теплопроницания ограждения, называется его термическим сопротивлением R; таким образом, $R = 1/\Lambda$ и обратно $\Lambda = 1/R$. Размерность термического сопротивления *град·м²·ч/ккал* одинакова с размерностью сопротивления теплопередаче, разница лишь в том, что сопротивление теплопередаче R_0 выражается разностью температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения, а термическое сопротивление R — разностью температур на одной и другой поверхности ограждения.

При проектировании наружных ограждений зданий экономически целесообразно придавать им наибольшие (из возможных) значения R_0, а следовательно, и малые значения k, что уменьшает расходы на отопление здания и создает в нем лучшие санитарно-гигиенические условия.

При теплотехнических расчетах наружных ограждений удобнее определять не k, а величину R_0, так как соответствующие

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

Пример 47. Как изменится влажностный режим стены, рассмотренной в примере 44, если между внутренней штукатуркой и фибролитом расположить пароизоляцию в виде одного слоя рубероида, имеющего сопротивление паропроницанию $R_п = 8{,}3$ *мм·ч·м²/г*.

Влиянием слоя рубероида толщиной всего 1,5 *мм* на распределение температуры в стене можно пренебречь, т. е. принять, что линия τ, а следовательно, и линия E останутся без изменения, как на рис. 68. Останется без изменения и зона конденсации, только сопротивление паропроницанию от внутреннего воздуха до плоскости примыкания фибролита к кирпичной стенке увеличится на 8,3, т. е. будет $1{,}25+2{,}15+8{,}3=11{,}7$ *мм·ч·м²/г*. При этом количество водяного пара, поступающего к зоне конденсации:

$$P_1 = \frac{9{,}29 - 3{,}6}{11{,}7} = 0{,}49 \ г/м^2 \cdot ч.$$

Количество пара, уходящего из стены, останется без изменения, т. е. $P_2 = 0{,}13$ *г/м²·ч*.

Количество конденсата в стене будет: $P_ω = 0{,}49 - 0{,}13 = 0{,}36$ *г/м²·ч*.

Следовательно, расположение у внутренней поверхности стены пароизоляционного слоя хотя и не устранило совсем конденсацию пара в ней, но количество конденсата сократилось в 4,3 раза по сравнению со стеной без пароизоляционного слоя. Кроме того, положительное влияние пароизоляции состоит в том, что конденсация пара в стене при этом прекратится при более низких температурах наружного воздуха, т. е. сократится период, в течение которого в стене будет конденсироваться влага.

Если пароизоляционный слой расположить на наружной поверхности ограждения, то влажностный режим ограждения значительно ухудшится. При этом количество водяного пара P_1, поступающего в ограждение, останется тем же, что и без пароизоляционного слоя, а количество пара, уходящего из ограждения, резко сократится вследствие большого сопротивления пароизоляционного слоя, расположенного на наружной поверхности ограждения.

Например, если на наружной поверхности стены из легкого бетона, приведенной в примере 43, расположить слой рубероида ($R_п = 8{,}3$), то зона конденсации распространится до наружной поверхности стены и около нее под рубероидом будет конденсироваться большая часть всей конденсационной влаги. Если сделать соответствующий расчет для этого случая в условиях, данных в примере 43, то получим:

$$P_1 = 0{,}3; \quad P_2 = \frac{2{,}13 - 1{,}65}{8{,}3} = 0{,}06; \quad P_ω = 0{,}24 \ г/м^2 \cdot ч,$$

формулы при этом принимают более простой вид. Поэтому в дальнейшем будем пользоваться выражениями сопротивлений, оказываемых ограждением тепловому потоку.

1. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДЕНИЙ

При разности температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения температурная линия непрерывно понижается. Графически изменение температуры при прохождении теплового потока через плоскую однородную стенку показано на рис. 6. Воздух с внутренней стороны стены имеет температуру $t_в$, а с наружной стороны $t_н$, причем $t_в > t_н$. Температурная линия показывает, что падение температуры происходит не только в толще самой стены, но и у ее поверхностей, так как температура внутренней поверхности стены $\tau_в < t_в$ и температура наружной поверхности $\tau_н > t_н$. Так как падение температуры при прохождении теплового потока вызывается термическими сопротивлениями, то из температурной кривой видно, что сопротивление теплопередаче ограждения состоит из трех отдельных сопротивлений:

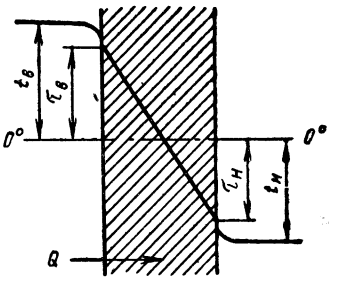


Рис. 6. Изменение температуры в однородной стене

1) сопротивления при переходе тепла от внутреннего воздуха к внутренней поверхности ограждения; это сопротивление называется сопротивлением тепловосприятию $R_в$ и вызывает температурный перепад $t_в - \tau_в$;

2) сопротивление при прохождении тепла через толщу самого ограждения; это сопротивление называется термическим сопротивлением ограждения R и вызывает температурный перепад $\tau_в - \tau_н$;

3) сопротивления при переходе тепла от наружной поверхности к наружному воздуху; это сопротивление называется сопротивлением теплоотдаче $R_н$ и вызывает температурный перепад $\tau_н - t_н$.

Таким образом, сопротивление теплопередаче ограждения может быть выражено как сумма этих сопротивлений:

$$R_0 = R_в + R + R_н. \qquad (17)$$

Сопротивления и коэффициенты тепловосприятия и теплоотдачи

Сопротивления тепловосприятию и теплоотдаче объединяют общим названием сопротивлений теплоотдаче у внутренней и наружной поверхностей, а иногда просто — сопротивлением теп-

т. е. количество конденсата увеличится в 3 раза по сравнению со стеной без пароизоляционного слоя.

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

Интересным примером[1] является реставрация храма Спаса-Нередицы (Новгородская обл.), произведенная в 1911 г. арх. П. П. Покрышкиным. Стены храма, построенного в 1198 г., были сложены из волховского известняка и имели снаружи обмазку известью. При реставрации храма наружная поверхность стен была оштукатурена толстым слоем цемента для предохранения кладки от атмосферных воздействий. Года через два стены стали сыреть и начали портиться уникальные фрески XII в., в результате чего пришлось цементную штукатурку срубить, причем была повреждена наружная часть кладки стен. Влажностный режим стен резко ухудшился, после того как на их наружную поверхность была нанесена малопаропроницаемая цементная штукатурка.

Выработанное практикой уплотнение внутренних переплетов окон на зимнее время основано также на этом. Уплотненный внутренний переплет окна является пароизолятором по сравнению с неуплотненным наружным переплетом, что гарантирует наружное остекление от конденсации влаги. В наружных стальных переплетах витрин магазинов специально для этой цели делаются отверстия, обеспечивающие вентиляцию витрин наружным воздухом.

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

Применение в ограждении двух пароизоляционных слоев, одного на внутренней, а другого на наружной поверхности ограждения, гарантируя его от конденсации влаги, будет в то же время препятствовать испарению строительной влаги. Следовательно, это мероприятие допустимо только в том случае, если

[1] По данным проф. С. А. Торопова.

лопереходу. Размерность этих сопротивлений та же, что и сопротивления теплопередаче, т. е. *град·м²·ч/ккал*. Они выражаются разностью температур, которую необходимо создать между воздухом и поверхностью ограждения, чтобы тепловой поток между воздухом и поверхностью был равен 1 *ккал/м²·ч*.

Величины, обратные сопротивлениям теплопереходу, называются коэффициентами теплоотдачи и обозначаются: коэффициент теплоотдачи у внутренней поверхности $\alpha_в$ и коэффициент теплоотдачи у наружной поверхности $\alpha_н$, причем $\alpha_в = 1/R_в$ и $\alpha_н = 1/R_н$. Размерность этих коэффициентов *ккал/м²·ч·град*; они выражаются количеством тепла в *ккал/м²·ч*, проходящего между воздухом и поверхностью ограждения при разности температур между ними, равной 1°.

Если известны значения коэффициентов теплоотдачи α и перепады температур между воздухом и поверхностью ограждения Δt, то количество тепла, проходящего через 1 *м²* ограждения в 1 *ч*, определится по формуле, аналогичной (16):

$$Q = \alpha \Delta t \quad ккал/м^2 \cdot ч. \tag{16б}$$

Передача тепла к поверхности ограждения или отдача ею тепла осуществляется излучением и конвекцией с прилегающим воздухом. Следовательно, коэффициенты теплоотдачи могут быть выражены как сумма двух коэффициентов: коэффициента отдачи тепла излучением $\alpha_л$ и коэффициента отдачи тепла конвекцией $\alpha_к$, т. е. $\alpha = \alpha_л + \alpha_к$.

Передача тепла излучением к внутренней поверхности ограждения происходит от поверхностей внутренних конструкций (перегородок, потолка, пола и пр.), имеющих температуру более высокую, чем температура внутренней поверхности ограждения. Наружная поверхность ограждения отдает тепло излучением в окружающую среду (атмосфера, соседние здания, деревья и пр.). Коэффициент теплоотдачи излучением определяется обычно по формуле, полученной из (8):

$$\alpha_л = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \cdot \frac{\left[\frac{t_1 + 273}{100}\right]^4 - \left[\frac{t_2 + 273}{100}\right]^4}{t_1 - t_2}, \tag{18}$$

где C_1 и C_2 — коэффициенты излучения поверхностей; C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; t_1 и t_2 — температуры поверхностей.

При определении коэффициента теплоотдачи $\alpha_в$ в формуле (18) принимается: t_1 — равной температуре внутреннего воздуха; t_2 — равной температуре внутренней поверхности ограждения. При определении коэффициента теплоотдачи $\alpha_н$ принимается: t_1 — равной температуре наружной поверхности ограждения; t_2 — равной температуре наружного воздуха.

будет гарантирована тщательная просушка ограждения перед нанесением этих слоев, в противном случае в таком ограждении окажется неблагоприятный влажностный режим вследствие оставшейся в нем строительной влаги.

В наружных ограждениях помещений, в которых поддерживается низкая температура воздуха, например в холодильниках, расположение пароизоляционного слоя у внутренней поверхности недопустимо, так как в летнее время это повлечет конденсацию пара из наружного воздуха. Расположение пароизоляционного слоя у наружной поверхности ограждений холодильников рационально только у низкотемпературных камер. У камер с температурами воздуха, близкими к 0°, такое расположение пароизоляционного слоя, гарантируя ограждения от конденсации в них влаги в летнее время, может вызвать конденсацию в них влаги в зимнее время из внутреннего воздуха камер, если температура его окажется выше температуры наружного воздуха. Поэтому в таких случаях для обеспечения нормального влажностного режима ограждений можно рекомендовать следующие способы.

1. Располагать в ограждении два надежных пароизоляционных слоя — один у внутренней, другой — у наружной поверхности, обеспечив достаточную сухость материалов ограждения перед нанесением этих слоев. В этом случае конденсация влаги в ограждении в летнее и в зимнее время будет отсутствовать.

2. Отказаться совсем от применения пароизоляционных слоев, подбирая материалы в ограждении таким образом, чтобы падение температуры в ограждении и упругости водяного пара в нем было равномерным. Лучше всего в этом случае делать наружные ограждения из однородного материала.

5. ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ БЕСЧЕРДАЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Большое влияние на влажностный режим бесчердачных покрытий оказывает гидроизоляционный ковер, назначение которого предохранять покрытие от увлажнения его дождевой или талой водой. Гидроизоляционный ковер является в то же время и хорошим пароизоляционным слоем (см. табл. 24), а расположение его на наружной поверхности покрытия является причиной конденсации влаги под ковром. Особенно опасной будет конденсация влаги в покрытиях деревянных или утепленных органическими материалами, так как она может привести к загниванию их.

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

Если известны размеры помещения, то вычисление $\alpha_л$ для определения коэффициента $\alpha_в$ точнее делать на основании формулы (9). В помещениях, в которых имеются только наружные стены (например, манежи, физкультурные залы и пр.), передача тепла наружным стенам излучением происходит только от потолка и пола (если температуры их поверхностей больше $\tau_в$ стены) и от внутреннего оборудования. Величина $\alpha_л$ при этом значительно уменьшается.

Характер передачи тепла конвекцией различен у внутренней и у наружной поверхностей ограждения. У внутренней поверхности ограждения — естественная конвекция, вызываемая разностью температур воздуха и поверхности; у наружной поверхности ограждения — вынужденная конвекция, вызываемая действием ветра. Поэтому и формулы для определения $\alpha_к$ будут разными для внутренней и для наружной поверхности ограждения.

Точное определение величины $\alpha_к$ при естественной конвекции является сложной задачей. Величина $\alpha_к$ зависит от разности температур воздуха и поверхности Δt, линейного размера поверхности в направлении движения воздуха l, коэффициента теплопроводности воздуха у поверхности ограждения λ, коэффициента кинематической вязкости воздуха ν, коэффициента температуропроводности воздуха. Величины λ, ν и a зависят от средних температур воздуха и поверхности ограждения. Все перечисленные величины объединяются в следующие безразмерные комплексы (критерии подобия): критерий Нуссельта $Nu = \frac{\alpha_к l}{\lambda}$; критерий Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a}$; критерий Грасгофа $Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu^2}$, в котором $\beta = 1/273$ — коэффициент температурного расширения воздуха, g — ускорение силы тяжести. Эти критерии объединяются в критериальное уравнение, которое для внутренних поверхностей ограждающих конструкций отапливаемых зданий имеет вид: $Nu = 0{,}135\ (Cr\ Pr)^{0{,}333}$. В этом уравнении $\alpha_к$ входит в критерий Нуссельта, из которого и определяется.

Для вертикальных поверхностей (внутренних поверхностей наружных стен) в отапливаемых помещениях В. Н. Богословским предложено определять $\alpha_к$ по формуле

$$\alpha_к = 1{,}43\sqrt[3]{\Delta t}, \qquad (19)$$

где $\Delta t = t_в - \tau_в$ — температурный перепад между температурой воздуха и поверхности в *град*.

Для горизонтальных поверхностей величину $\alpha_к$, полученную по формуле (19), рекомендуется: для потолков увеличивать на 30%, для полов уменьшать на 30%. Учитывая, что на поверхность пола воздействует общий конвективный поток воздуха

Единственной целесообразной мерой для устранения конденсации влаги в таких покрытиях является устройство в них воздушной прослойки или продухов, расположенных над теплоизоляционным слоем и вентилируемых наружным воздухом. Пример такого покрытия приведен на рис. 45. При такой конструкции покрытия наружный воздух, проникая в прослойку, имеющую более высокую температуру, будет нагреваться, отнимать влагу от материала покрытия и испарять ту влагу, которая может конденсироваться из внутреннего воздуха на верхней поверхности прослойки. Особенно большое значение имеет вентиляция воздушной прослойки в первое время эксплуатации покрытия, если материалы его имеют повышенную влажность.

Теплотехнический расчет покрытий с вентилируемой воздушной прослойкой изложен в главе VI. Расчет таких покрытий на конденсацию в них влаги сводится к определению величины упругости водяного пара e_x в вентилируемой прослойке.

Для расчета этой величины введем кроме принятых ранее в главе VI следующие обозначения:

$R'_{\text{п}}$ — сопротивление паропроницанию части покрытия, расположенной ниже воздушной прослойки, в *мм·ч·м²/г*;

$R''_{\text{п}}$ — сопротивление паропроницанию части покрытия, расположенной выше воздушной прослойки, в *мм·ч·м²/г*.

Выделим по длине прослойки бесконечно малый элемент dx шириной 1 *м*. Для этого элемента ограждения будем иметь: количество пара, поступающего в прослойку от внутреннего воздуха, при отсутствии конденсации пара в нижней части покрытия:

$$P_1 = \frac{e_{\text{в}} - e_x}{R'_{\text{п}}} dx \ г/ч$$

или, обозначив $\frac{1}{R'_{\text{п}}} = M_{\text{в}}$, получим: $P_1 = M_{\text{в}}(e_{\text{в}} - e_x)\,dx$; количество пара, уходящего из прослойки к наружному воздуху. Через верхнюю часть покрытия, при отсутствии в ней конденсации пара:

$$P_2 = \frac{e_x - e_{\text{н}}}{R''_{\text{п}}} dx \ г/ч,$$

или, обозначив $\frac{1}{R''_{\text{п}}} = M_{\text{н}}$, получим: $P_2 = M_{\text{н}}(e_x - e_{\text{н}})\,dx$; количество пара, идущего на изменение абсолютной влажности воздуха в прослойке на df *г/м³*, $P_3 = W'df$ *г/ч*, где $W' = 3600\ v\delta$ *м³/ч*; v — скорость движения воздуха в прослойке в *м/сек*; δ — толщина прослойки в *м*.

Заменяя f на e [по формуле (82)], получим: $df = Bde$, где

$$B = \frac{1{,}058}{1 + \frac{\tau_x}{273}},$$

всего помещения, для полов можно принимать величину $\alpha_к$ такую же, как и для вертикальных поверхностей.

Для наружных поверхностей ограждающих конструкций $\alpha_к$ определяется по формуле Франка:

$$\alpha_к = 6{,}31\, v^{0{,}656} + 3{,}25\, e^{-1{,}91v}, \qquad (20)$$

где v — скорость ветра в *м/сек*; e — основание натуральных логарифмов ($e=2{,}718$).

Второй член формулы (20) дает величину отдачи тепла естественной конвекцией. За расчетную скорость ветра для зимних условий принимается средняя скорость из тех румбов за январь, повторяемость ветра которых составляет 16% и более. Расчетные скорости ветра приведены в СНиП II-А.6-62.

Для чердачных перекрытий, наружная поверхность которых выходит на чердак, защищенный от ветра, можно принять $v=0{,}5$ *м/сек*. При этом по формуле (20) получим $\alpha_к=5{,}25$ *ккал/м²·ч·град*. Для наружных поверхностей, выходящих в замкнутое помещение, $\alpha_к$ определяется по формуле (19).

Пример 4. Определить величины коэффициентов теплоотдачи у внутренней и у наружной поверхностей наружной стены отапливаемого здания.

Примем температуры воздуха: внутреннего +18° С, наружного —25° С, а температуры поверхностей стены: внутренней +12° С, наружной —23° С. Скорость ветра 5 *м/сек*.

а) Внутренняя поверхность оштукатурена, имеет коэффициент излучения $C=4{,}5$.

Коэффициент теплоотдачи излучением по формуле (18)

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

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при $t_в - \tau_в = 6°$ С по формуле (19)

$$\alpha_к = 1{,}43\sqrt[3]{6} = 2{,}6.$$

Коэффициент теплоотдачи у внутренней поверхности

$$\alpha_в = \alpha_л + \alpha_к = 3{,}92 + 2{,}6 = 6{,}52\ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град,$$

а сопротивление тепловосприятию

$$R_в = \frac{1}{6{,}52} = 0{,}153\ град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

б) Наружная поверхность — кирпичная неоштукатуренная, имеет коэффициент излучения $C=4{,}6$.

Принимая в формуле (18) $C_2=C_0=4{,}96$, получим коэффициент теплоотдачи излучением, равный:

$$\alpha_л = 4{,}6\,\frac{2{,}5^4 - 2{,}48^4}{2} = 2{,}85.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией по формуле (20)

$$\alpha_к = 6{,}31 \cdot 5^{0{,}656} + 3{,}25e^{-1{,}91 \cdot 5} = 18{,}11.$$

Коэффициент теплоотдачи у наружной поверхности

$$\alpha_н = 2{,}85 + 18{,}11 = 20{,}96,$$

Из условия баланса влаги $P_3 = P_1 - P_2$, откуда имеем:

$$W'Bde = M_в(e_в - e_x)dx - M_н(e_x - e_н)dx.$$

Это уравнение аналогично уравнению, полученному для баланса тепла и приведенному на стр. 159. Поэтому аналогично формуле (76) для вычисления величины e_x окончательно получим следующую формулу:

$$e_x = \frac{A + [e_н(M_в + M_н) - A]\, e^{-\frac{M_в + M_н}{W'B}x}}{M_в + M_н}, \qquad (99)$$

где e_x — упругость водяного пара в прослойке на расстоянии x *м* от входа воздуха в прослойку в *мм рт. ст.*;

$A = M_в e_в + M_н e_н$;

e — основание натуральных логарифмов.

Определив по формуле (99) значение e_x в любом сечении покрытия, рассматриваем его состоящим из двух отдельных частей—нижней и верхней и делаем расчет на конденсацию отдельно для нижней части при разности упругостей водяного пара $e_в - e_x$ и отдельно для верхней части при разности упругостей $e_x - e_н$.

Формула (99) справедлива только при отсутствии конденсации пара в покрытии. При конденсации расчет усложняется, так как приходится учитывать и количество влаги, конденсирующейся в покрытии.

Пример 48. Рассчитать на конденсацию влаги покрытие с вентилируемой воздушной прослойкой, рассмотренное в примере 34 и изображенное на рис. 45. Температуры воздуха и скорость его движения в прослойке примем такими же, что и в примере 33.

Влажности воздуха примем следующими:
внутреннего — $\varphi_в = 75\%$, что при 15,5° С дает $e_в = 9{,}9$ *мм рт. ст.*;
наружного — $\varphi_н = 80\%$, что при —8,5° С дает $e_н = 1{,}8$ *мм рт. ст.*

При скорости воздуха в прослойке $v = 0{,}2$ *м/сек* получим:

$$W' = 3600 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}11 = 79{,}2 \ м^3/ч.$$

Без учета сопротивлений влагообмену $R_{в.н}$ и $R_{н.п}$ сопротивления паропроницанию покрытия будут:
нижней части:

железобетонная плита 100 *мм* $R_{п1} = 0{,}1 : 0{,}004 = 25$
керамзитовая засыпка 170 *мм* $R_{п2} = 0{,}17 : 0{,}05 = 3{,}4$
корка известковая 30 *мм* $R_{п3} = 0{,}03 : 0{,}016 = 1{,}9$

$R'_п = 30{,}3$ *мм·ч·м² г*

$$M_в = \frac{1}{30{,}3} = 0{,}033 \ г/м^2 \cdot ч \cdot мм;$$

верхней части: настил деревянный 40 *мм* $R_{п4} = 0{,}04 : 0{,}0082 = 4{,}9$
рулонный ковер двухслойный (по табл. 24) $R_{п5} = 12{,}8$

$R''_п = 17{,}7$ *мм·ч·м²/г*

а сопротивление теплоотдаче

$$R_н = \frac{1}{20{,}96} = 0{,}048.$$

Сравнение полученных значений $\alpha_в$ и $\alpha_н$ показывает:

1) доля участия излучения в коэффициенте $\alpha_в$ составляет 60%, а в коэффициенте теплоотдачи $\alpha_н$ только 14%;

2) величина коэффициента теплоотдачи $\alpha_н$ оказалась в 3,2 раза больше величины коэффициента $\alpha_в$, что является следствием воздействия ветра на наружную поверхность стены;

3) в коэффициенте теплоотдачи $\alpha_к$ естественная конвекция [второй член формулы (20)] даже при несильном ветре снижается практически до нуля;

4) на величину коэффициента теплоотдачи $\alpha_в$ главное влияние оказывают разность температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждения и коэффициенты излучения поверхностей;

5) на величину коэффициента теплоотдачи $\alpha_н$ главное влияние оказывает скорость ветра.

Формулы для вычисления коэффициентов $\alpha_л$ и $\alpha_к$, а также пример 4 показывают, что для определения значений коэффициентов теплоотдачи $\alpha_в$ и $\alpha_н$ необходимо знать температуру на поверхностях ограждения. Поэтому в некоторых расчетах приходится предварительно задаваться значениями этих температур, а потом проверять их по полученным значениям коэффициентов теплоотдачи и, если полученные значения температур не совпадут с заданными, повторить расчет снова, пока не получится совпадение температур.

СНиП II-А.7-71 устанавливает расчетные величины коэффициентов и сопротивлений теплоотдаче, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициенты и сопротивления теплоотдаче

Поверхности ограждений и их расположение	$\alpha_в$ или $R_н$, ккал/м²·ч·град	$R_в$ или $R_н$, град·м²·ч/ккал	Поверхности ограждений и их расположение	$\alpha_в$ или $\alpha_н$, ккал/м²·ч·град	$R_в$ или $R_н$, град·м²·ч/ккал
Внутренние поверхности стен и полов, а также потолков, имеющих гладкую поверхность . . .	7,5	0,133	Наружные поверхности, граничащие непосредственно с наружным воздухом	20	0,05
Потолки, имеющие кессоны или ребристую поверхность	6,5	0,154	Наружные поверхности, выходящие на чердак	10	0,1
			Наружные поверхности, выходящие в замкнутые помещения, кроме чердачных	5	0,2

$$M_н = \frac{1}{17,7} = 0,056\ г/м^2 \cdot ч \cdot мм;$$

$$A = 0,033 \cdot 9,9 + 0,056 \cdot 1,8 = 0,43.$$

Наибольшая вероятность конденсации пара в покрытии будет в конце воздушной прослойки, т. е. у выхода воздуха из прослойки, так как в этом месте воздух в прослойке будет иметь наибольшую упругость вследствие поступления пара через нижнюю часть покрытия. Поэтому расчет делаем для сечения, отстоящего на 0,5 *м* от выходного отверстия, т. е. для $x = 6,5$ *м*. По примеру 34 для этого сечения $t_x = -5,9°$ С, чему соответствует

$$B = \frac{1,058}{1 - \frac{5,9}{273}} = 1,08.$$

Температура под кровельным ковром в этом сечении будет:

$$\tau_5 = -5,9 - \frac{5,9 + 8,5}{0,45} 0,367 = -8° С,$$

чему соответствует $E_5 = 2,32$ *мм рт. ст.*

Показатель степени при e в формуле (99) будет:

$$-\frac{0,033 + 0,056}{79,2 \cdot 1,08} 6,5 = -0,0068.$$

По формуле (99) получим:

$$e_x = \frac{0,43 + (1,8 \cdot 0,089 - 0,43)\, e^{-0,0068}}{0,033 + 0,056} = 1,82\ мм\ рт.ст.$$

Так как E_5 оказалось больше e_x, то, даже не учитывая падения упругости водяного пара в настиле, получим, что конденсации пара в верхней части покрытия нет. В нижней части покрытия также конденсации пара не будет, так как в ней слои расположены в последовательности, обеспечивающей ее от конденсации.

При отсутствии вентиляции воздушной прослойки сопротивление паропроницанию прослойки с учетом конвекции воздуха будет: $R_п = \frac{0,11}{0,135} = 0,81$.

Температура воздуха в прослойке по примеру 34 будет —3,4°. Если произвести графический расчет влажностного режима покрытия, то зона конденсации окажется полностью занимающей деревянный настил, на нижней поверхности которого температура равна:

$$\tau_4 = -3,4 - \frac{-3,4 + 8,5}{0,45} 0,1 = -4,5° С \text{ и } E_4 = 3,14\ мм\ рт.ст.$$

Количество пара, поступающего к зоне конденсации, будет

$$P_1 = \frac{9,9 - 3,14}{30,3 + 0,81} = 0,22\ г/м^2 \cdot ч.$$

Температура под рулонным ковром:

$$\tau_5 = -3,4 - \frac{-3,4 + 8,5}{0,45} 0,367 = -7,6° С \text{ и } E_5 = 2,41\ мм\ рт.ст.;$$

$$P_2 = \frac{2,41 - 1,8}{12,8} = 0,05\ г/м^2 \cdot ч.$$

Количество конденсата $P_ω = 0,22 - 0,05 = 0,17\ г/м^2 \cdot ч$.

Этот пример показывает, что вентилирование покрытия наружным воздухом гарантирует от конденсации влаги. Если воздушная прослойка невентилируемая, в покрытии происходит конденсация влаги, несмотря на то, что у внутренней поверхности его уложена железобетонная плита, имеющая $R_п=25$. Конденсация влаги в покрытии будет значительно большей при вентилировании воздушной прослойки внутренним воздухом здания. Поэтому сообщение воздушной прослойки с внутренним воздухом недопустимо.

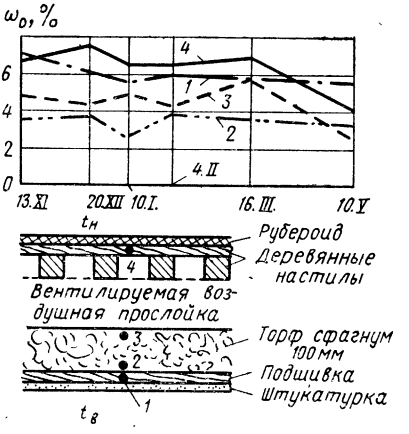


Рис. 73. Изменение объемной влажности торфа и дерева в бесчердачном покрытии

Расчеты показывают, что для устранения конденсации влаги в покрытиях, вентилируемых наружным воздухом, достаточны небольшие скорости воздуха в воздушной прослойке покрытия.

Отсутствие вентиляции наружным воздухом деревянных бесчердачных покрытий часто бывает единственной причиной резкого повышения их влажности; такие покрытия в течение 2—3 лет приходят в полную негодность. Практика обследования деревянных бесчердачных покрытий показала, что недостаточно ясное представление об их влажностном режиме приводило к конструктивным ошибкам при их проектировании, что в свою очередь вызывало разрушение этих покрытий.

Отверстия для вентиляции воздушной прослойки не должны покрываться инеем, так как, замерзая, иней образует ледяную пленку и вентилирование прослойки прекращается.

Насколько благоприятным является влажностный режим покрытий, вентилируемых наружным воздухом, видно из результатов обследования бесчердачного покрытия. На рис. 73 дан разрез этого покрытия, а также график изменения влажности его материалов за зимний период. Места выемки проб обозначены кружками с номерами их. Воздушная прослойка вентилировалась наружным воздухом через промежутки между брусками рабочего настила.

График показывает, что максимальная объемная влажность дерева не превышала 7,5% (около 15% весовых), а сфагнума была не более 5,8% (около 18% весовых), т. е. не превосходила предела сорбционного увлажнения, несмотря на сравнительно высокую влажность внутреннего воздуха (выше 60%) в помещении и отсутствие пароизоляционного слоя у внутренней по-

Уменьшение величины $\alpha_в$ для потолков с кессонами или имеющих ребристую поверхность вызвано тем, что при такой поверхности несколько уменьшается передача тепла конвекцией и излучением по сравнению с гладкими поверхностями.

Приведенными в табл. 5 величинами сопротивлений теплоотдаче можно пользоваться для практических теплотехнических расчетов наружных ограждающих конструкций отапливаемых зданий.

Термическое сопротивление ограждения

Если сопротивления теплоотдаче зависят главным образом от внешних факторов и лишь в незначительной степени от материала поверхности ограждения, то термическое сопротивление ограждения R зависит исключительно от теплопроводности материалов, составляющих ограждение, а также от структуры самого ограждения. Для определения R необходимо знать коэффициенты теплопроводности λ материалов, составляющих ограждение, их расположение, а также размеры отдельных элементов ограждения.

Если ограждение по толщине состоит из нескольких последовательно размещенных однородных слоев различных материалов, расположенных перпендикулярно направлению теплового потока, то термическое сопротивление ограждения будет равно сумме термических сопротивлений всех его слоев. Следовательно, для многослойного ограждения термическое сопротивление его определяется по формуле

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \ldots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}, \quad (21)$$

где R_1, R_2, ... — термические сопротивления отдельных слоев; δ_1, δ_2,... — толщины отдельных слоев в *м*; λ_1, λ_2,... — коэффициенты теплопроводности материалов отдельных слоев в *ккал/м × × ч·град*; n — число слоев, составляющих ограждение.

При пользовании этой формулой необходимо помнить, что толщины слоев δ должны быть взяты в метрах.

Формула (21) показывает, что термическое сопротивление слоя ограждения прямо пропорционально его толщине и обратно пропорционально коэффициенту теплопроводности его материала; термическое сопротивление ограждения не зависит от порядка расположения слоев. Однако другие теплотехнические показатели ограждения, как, например, теплоустойчивость, распределение температуры в ограждении и его влажностный режим, зависят от порядка расположения слоев. Поэтому для облегчения расчетов теплоустойчивости и влажностного режима ограждений нумерация слоев ведется последовательно от внутренней поверхности ограждения к наружной.

верхности покрытия. График наглядно показывает, что в период весеннего потепления (с 16 марта по 10 мая) влажность материалов покрытия, непосредственно прилегающих к воздушной прослойке (пробы № 3 и 4), резко снизилась, в то время как влажность проб, расположенных ближе к внутренней поверхности (пробы № 1 и 2), почти не изменилась. Это является результатом вентиляции воздушной прослойки при одновременном прогреве кровли солнцем.

Глава XI. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ В ОГРАЖДЕНИИ ЖИДКОЙ ВЛАГИ

Перемещение влаги в материале начинается с момента образования в нем конденсационной влаги, так как сорбированная влага, находящаяся в материале в связанном состоянии, перемещаться в жидком виде не может. Только свободная влага, образовавшаяся в материале или в результате конденсации в нем водяного пара, или в результате непосредственного впитывания материалом воды, может перемещаться. Так как капиллярная конденсация начинается в материале при относительных упругостях водяного пара ниже 100%, то в некоторых материалах передвижение жидкой влаги может начинаться раньше, чем материал достигнет предела сорбционного увлажнения. Так, например, в пенобетоне перемещение жидкой влаги начинается при влажности его, соответствующей 96% относительной упругости водяного пара.

В первой стадии увлажнения жидкая влага сосредоточивается в местах контактов отдельных частиц или в наиболее узких капиллярах и вследствие своей раздробленности перемещаться еще не может. Перемещение влаги начинается с момента, когда влага, сосредоточенная в отдельных местах, начинает сливаться воедино. При этом влага заполняет поры материала только частично, так как в них кроме влаги будут находиться воздух и водяной пар. Эта стадия передвижения влаги носит название капиллярной диффузии. При капиллярной диффузии кроме движения влаги в жидкой фазе может происходить и перемещение влаги в виде пара при градиенте температуры в материале. Парообразная влага может передвигаться в материале и в направлении, обратном движению жидкой влаги. В частности, в сплошных бесчердачных покрытиях с момента образования конденсата под кровельным ковром начинается перемещение жидкой влаги в направлении вниз от места образования конденсата, а парообразная влага продолжает перемещаться в обратном направлении вверх к месту образования конденсата.

При дальнейшем повышении влажности материала его поры или мелкие капилляры могут частично оказаться полностью за-

Пользуясь формулой (21), можно определять либо термическое сопротивление данного ограждения, либо толщину одного из его слоев (обычно из материала с наименьшим коэффициентом теплопроводности), при которой ограждение будет иметь заданную величину R или R_0. В последнем случае неизвестной величиной в формуле (21) будет толщина δ одного из слоев, который служит утепляющим слоем ограждения.

Многослойные конструкции представляют наиболее распространенный в строительстве тип ограждения.

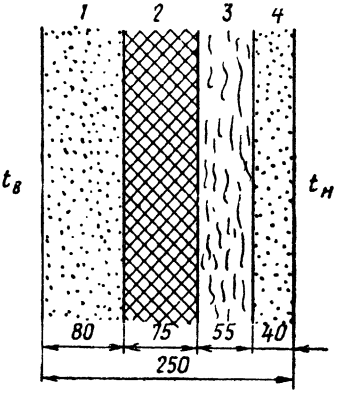


Рис. 7. Наружная стеновая панель дома серии 1605АМ

1 — внутренний фактурный слой; *2* — цементный фибролит; *3* — минераловатные плиты; *4* — наружный фактурный слой

Пример 5. На рис. 7 изображена наружная стеновая панель жилого дома серии 1605АМ. Панель состоит из четырех слоев:

бетонные фактурные слои (наружный и внутренний)	$\gamma=2500$ *кг/м³* и $\lambda=1{,}4$ *ккал/м·ч·град*
фибролит цементный	$\gamma=350$ » » $\lambda=0{,}13$ »
минераловатные плиты	$\gamma=200$ » » $\lambda=0{,}06$ »

Сопротивление теплопередаче стеновой панели равно:

сопротивление тепловосприятию	$R_в=0{,}133$ (см. табл. 5)
внутренний фактурный слой 80 *мм*	$R_1=\dfrac{0{,}08}{1{,}4}=0{,}057$
цементный фибролит 75 *мм*	$R_2=\dfrac{0{,}075}{0{,}13}=0{,}577$
минераловатные плиты 55 *мм*	$R_3=\dfrac{0{,}055}{0{,}06}=0{,}917$
наружный фактурный слой 40 *мм*	$R_4=\dfrac{0{,}04}{1{,}4}=0{,}029$
сопротивление теплоотдаче	$R_н=0{,}05$ (см. табл. 5)
Сопротивление теплопередаче панели	$R_0=1{,}763$ *град·м²·ч/ккал*

Полученное сопротивление теплопередаче панели относится к сечению по утеплителю, но в панели имеются железобетонные ребра, соединяющие фактурные слои и обрамляющие панели по контуру. Эти ребра имеют толщину 30—40 *мм*. По этим ребрам сопротивление теплопередаче панели

$$R_0=0{,}133+\frac{0{,}25}{1{,}4}+0{,}05=0{,}361\ \textit{град·м²·ч/ккал}.$$

Соответственно коэффициенты теплопередачи панели будут:
в сечении по утеплителю

$$k_1 = \frac{1}{1{,}763} = 0{,}57;$$

в сечении по ребрам

$$k_{II} = \frac{1}{0{,}361} = 2{,}77 \text{ ккал/м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{град}.$$

В панели без окна площадь ребер составляет 6,5% полной площади панели, следовательно, средний коэффициент теплопередачи панели

$$k_{ср} = 0{,}57\cdot 0{,}935 + 2{,}77\cdot 0{,}065 = 0{,}71 \text{ ккал/м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{град},$$

т. е. в панели с ребристой поверхностью коэффициент теплопередачи повысился на 25%. Среднее сопротивление теплопередаче панели

$$R_{о.ср} = \frac{1}{0{,}71} = 1{,}41 \text{ град}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч/ккал},$$

т. е. понизилось по сравнению с расчетным (в сечении по утеплителю) на 20%.

Пример 6. Чердачное перекрытие над административным зданием состоит из железобетонной плиты толщиной 100 *мм*, утепляющего слоя керамзита и известково-песчаной стяжки толщиной 25 *мм*. Определить толщину слоя керамзита, чтобы перекрытие имело сопротивление теплопередаче $R_0 = 1{,}3$ *град·м²·ч/ккал*.

Перекрытие без слоя керамзита при коэффициентах теплопроводности железобетона $\lambda = 1{,}4$ и стяжки $\lambda = 0{,}7$ *ккал/м·ч·град* имело бы сопротивление теплопередаче

$$R_0 = 0{,}133 + \frac{0{,}1}{1{,}4} + \frac{0{,}025}{0{,}7} + 0{,}1 = 0{,}34.$$

Следовательно, слой керамзитовой засыпки должен иметь термическое сопротивление, равное: $R_2 = 1{,}3 - 0{,}34 = 0{,}96$. Принимая для керамзита объемный вес 500 *кг/м³*, чему соответствует коэффициент теплопроводности $\lambda = 0{,}18$ *ккал/м·ч·град*, получим необходимую толщину засыпки $\delta_2 = R_2\lambda_2 = 0{,}96\cdot 0{,}18 = 0{,}173$ *м*, или 17 *см*. При этом сопротивление теплопередаче перекрытия будет:

$$R_0 = 0{,}34 + \frac{0{,}17}{0{,}18} = 1{,}29 \text{ град}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч/ккал},$$

что отличается от заданного менее чем на 1%.

Коэффициент теплопередачи перекрытия

$$k = \frac{1}{1{,}29} = 0{,}78 \text{ ккал/м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{град}.$$

В строительной практике встречаются ограждения, в которых однородность материала нарушена как в перпендикулярном, так и в параллельном тепловому потоку направлении. Такие ограждения можно рассматривать состоящими из нескольких слоев, расположенных перпендикулярно тепловому потоку, но с нарушением однородности материала в одном или в нескольких слоях. В этом случае расчет приходится производить следующим образом.

А. Разрезаем конструкцию плоскостями, параллельными направлению теплового потока, на элементы, состоящие из одно-

полненными жидкой влагой, в этом случае газовая фаза в порах материала окажется уже не сплошной, а раздробленной (диспергированной). Это будет началом стадии перемещения влаги, носящей название фильтрации.

Таким образом, стадия капиллярной диффузии характеризуется тем, что при ней влажность материала больше предела сорбционного увлажнения, но меньше той влажности, при которой газовая фаза в материале оказывается диспергированной. При капиллярной диффузии газовая фаза в материале сообщающаяся.

В дальнейшем будем рассматривать только стадию капиллярной диффузии, так как фильтрация влаги происходит при столь высоких влажностях материала, которые недопустимы в ограждениях.

1. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ВЛАГИ В СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Для возможности капиллярного передвижения влаги в материале необходим градиент влажности, т. е. изменение влажности материала по направлению движения в нем влаги. При этом влага в материале будет перемещаться в направлении от бóльшей влажности к меньшей.

С повышением температуры уменьшается поверхностное натяжение жидкости, а следовательно, увеличивается ее давление, поэтому при градиенте температуры влага в нем будет также перемещаться в направлении понижения температуры (термодиффузия). Изменение поверхностного натяжения воды при изменении температуры составляет только 0,002 на 1 *град*, поэтому интенсивность термодиффузии небольшая. Опытные данные показывают, что при чистой термодиффузии изменение влажности материала оказывается небольшим, что дает основание в дальнейшем в расчетах ограждающих конструкций ее не учитывать.

Для практических расчетов перемещения в материале влаги в жидкой фазе примем, что в стационарных условиях количество влаги, перемещающейся в материале, будет прямо пропорционально градиенту влажности, т. е.

$$G = -\frac{d\omega}{dx} Z\beta, \qquad (100)$$

где G — количество влаги, проходящей через единицу поверхности материала, в *г/м*^{2}; $\frac{d\omega}{dx}$ — градиент влажности в материале в %/*м*; Z — время в *ч*; β — коэффициент пропорциональности, характеризующий данный материал в отношении перемещения в нем влаги.

По аналогии с теплопроводностью коэффициент пропорцио-

го или нескольких слоев, перпендикулярных направлению теплового потока, однородность материала в которых не нарушена. Рассматривая теперь конструкцию как бы состоящей из элементов с различными термическими сопротивлениями, но имеющих одинаковую толщину, равную толщине конструкции, определим ее среднее термическое сопротивление по формуле

$$R_{\parallel} = \frac{F_{\mathrm{I}} + F_{\mathrm{II}} + F_{\mathrm{III}} + \cdots}{\frac{F_{\mathrm{I}}}{R_{\mathrm{I}}} + \frac{F_{\mathrm{II}}}{R_{\mathrm{II}}} + \frac{F_{\mathrm{III}}}{R_{\mathrm{III}}} + \cdots}, \qquad (22)$$

где R_I, R_{II}, ... — термические сопротивления отдельных элементов поверхности ограждения; F_I, F_{II}, ... — площади, занимаемые отдельными элементами поверхности ограждения.

Площади, занимаемые отдельными элементами, можно брать в любых мерах, так как в формуле (22) имеют значения не абсолютные величины площадей, а их соотношение между собой. Удобно площади выражать в процентах, принимая сумму их равной 100%. При определении площадей отдельных элементов нет необходимости брать в расчет всю поверхность ограждения, а необходимо выделить на ней только площадь, последовательно повторяющуюся и вполне выражающую соотношение площадей, занимаемых отдельными элементами.

Полученное термическое сопротивление $R_{\parallel}$ всегда оказывается больше действительного.

Б. Разрезаем конструкцию плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока, на отдельные слои, из которых одни могут состоять из одного материала, а в других однородность материала будет нарушена. Для слоя, в котором нарушена однородность материала, определяем его средний коэффициент теплопроводности по формуле

$$\lambda_{\mathrm{ср}} = \frac{\lambda_{\mathrm{I}} F_{\mathrm{I}} + \lambda_{\mathrm{II}} F_{\mathrm{II}} + \lambda_{\mathrm{III}} F_{\mathrm{III}} + \cdots}{F_{\mathrm{I}} + F_{\mathrm{II}} + F_{\mathrm{III}} + \cdots}, \qquad (23)$$

где λ_I, λ_{II}, ... — коэффициенты теплопроводности отдельных материалов слоя;

F_I, F_{II}, ... — площади, занимаемые отдельными материалами по поверхности слоя.

Термическое сопротивление конструкции определяем по формуле (21), рассматривая слои, в которых нарушена однородность материала, состоящими из материала с вычисленным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\mathrm{ср}}$.

Полученное термическое сопротивление $R_{\perp}$ всегда оказывается меньше действительного.

В примере 7 поясняются изложенный расчет и причины расхождения величин $R_{\parallel}$ и $R_{\perp}$.

Пример 7. Определить термическое сопротивление бетонного пустотелого камня (рис. 8), пустоты которого заполнены уплотненной минеральной ватой. Высота камня 250 *мм*.

нальности β назовем коэффициентом влагопроводности. Размерность его будет *г/м·ч* %*.

Простота уравнения (100) кажущаяся, так как коэффициент влагопроводности β не является постоянной величиной, а зависит от ряда факторов, которые необходимо учитывать при расчете.

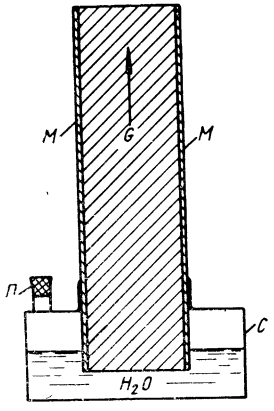


Рис. 74. Схема установки для определения коэффициента влагопроводности

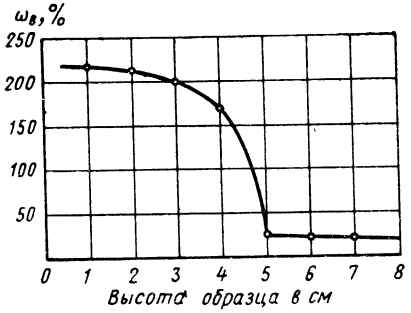


Рис. 75. Распределение влаги в картоне при капиллярной диффузии

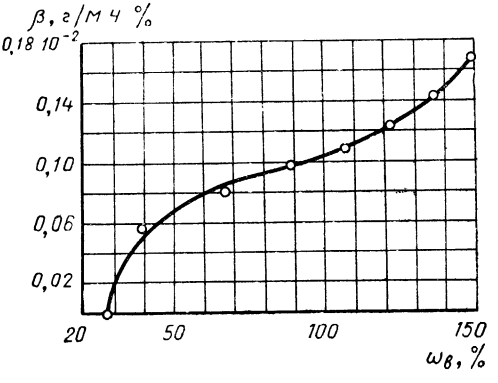


Рис. 76. Коэффициент влагопроводности торфоплиты с объемным весом 180 *кг/м*³ в зависимости от ее влажности

Факторы, влияющие на величину коэффициента влагопроводности, следующие: структура материала, характер связи влаги с материалом и его температура, влажность материала. Перечисленные факторы, за исключением температуры, учитываются при опытном определении коэффициента влагопроводности; влияние температуры может быть учтено теоретически.

Коэффициент влагопроводности материала определяется по методике, разработанной Р. Е. Брилингом и состоящей в следу-

* Не следует этот коэффициент смешивать с коэффициентом влагопроводности, принятым в теории сушки, где он является коэффициентом пропорциональности между плотностью потока жидкости и градиентом влажности и имеет размерность *м²/ч*.

Примем для бетона $\lambda=1$; для уплотненной минеральной ваты $\lambda=0{,}08$.

А. Плоскостями, параллельными направлению теплового потока, разрезаем камень на участки *I, II, III*.

Термические сопротивления R участков и площади их по поверхности камня F будут:

участки *I* и *III*

$$R_I = R_{III} = \frac{0{,}2}{1} = 0{,}2; \quad F_I \text{ и } F_{III} = 6 \cdot 25 = 150\,см^2;$$

участок *II*

$$R_{II} = \frac{0{,}06}{1} + \frac{0{,}08}{0{,}08} + \frac{0{,}06}{1} = 1{,}12; \quad F_{II} = 28 \cdot 25 = 700\,см^2;$$

по формуле (22) **получим**

$$R_{\parallel} = \frac{150 + 700 + 150}{\frac{150}{0{,}2} + \frac{700}{1{,}12} + \frac{150}{0{,}2}} = 0{,}47\,град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

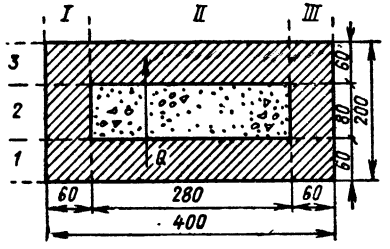


Рис. 8. Расчетная схема пустотелого камня

Б. Плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока, разрезаем камень на слои *1*, *2* и *3*.

Термические сопротивления слоев *1* и *3*:

$$R_1 = R_3 = \frac{0{,}06}{1} = 0{,}06.$$

В слое *2* однородность материала нарушена, поэтому сначала определяем средний коэффициент теплопроводности его материалов по формуле (23):

$$\lambda_{ср} = \frac{1 \cdot 300 + 0{,}08 \cdot 700}{1000} = 0{,}356.$$

Термическое сопротивление слоя *2*

$$R_2 = \frac{0{,}08}{0{,}356} = 0{,}225;$$

по формуле (21)

$$R_{\perp} = 0{,}06 + 0{,}225 + 0{,}06 = 0{,}345\,град \cdot м^2 \cdot ч/ккал.$$

Разница в величинах термических сопротивлений $R_{\parallel}$ и $R_{\perp}$ составляет около 36%.

В расчете по способу А при определении термического сопротивления отдельных участков камня не учитывалось их взаимное влияние на передачу тепла, т. е. принималось, что в пределах каждого участка тепловой поток имеет направление, нормальное к его поверхностям. Это могло бы быть лишь в случае,

ющем. Образец материала в виде призмы сечением 5×5 *см* и высотой 25 *см* обмазывают по боковым поверхностям водо- и паронепроницаемой замазкой *М* (рис. 74) и устанавливают в вертикальном положении в герметическом сосуде *С*. Если испытывается сыпучий материал, то его помещают в открытый с обоих концов цилиндр, который также устанавливают вертикально в сосуде *С*. В нижней части цилиндра укрепляют металлическую сетку, препятствующую высыпанию материала из цилиндра. В сосуд *С* через патрубок *П* наливают воду, уровень которой должен быть несколько выше нижней поверхности материала, патрубок закрывают резиновой пробкой. Сосуд с укрепленным на нем образцом помещают в атмосферу с постоянной температурой и влажностью воздуха. Периодически взвешивают сосуд с образцом до тех пор, пока потеря веса в единицу времени не станет постоянной. Это будет указывать на то, что в образце установилось стационарное состояние перемещения влаги. Количество влаги, теряемое образцом с сосудом в единицу времени, будет равно количеству влаги, проходящей в то же время через любое сечение образца материала.

После установления стационарных условий перемещения влаги в образце его разрезают на несколько равных частей по длине. Определяют влажность материала каждой из частей образца и строят график изменения влажности по длине образца. Пример такого графика, полученного при испытании картона, приведен на рис. 75. Образец картона имел высоту 8 *см*. Из графика видно, что на длине образца до 5 *см* происходило перемещение влаги в жидкой фазе, а на длине от 5 до 8 *см* — только парообразное перемещение влаги.

Из формулы (100) получим формулу для вычисления величины коэффициента влагопроводности по данным опыта:

$$\beta = G' : d\omega/dx, \qquad (101)$$

где $G' = G/Z$ — количество влаги, проходящей через единицу площади сечения образца в 1 *ч*, в $г/м^2 \cdot ч$.

Все величины, входящие в формулу (101), получаются из опытного определения коэффициента влагопроводности материала. Так как величина $\frac{d\omega}{dx}$ является переменной по длине образца (см. рис. 75), то и величина β будет переменной, зависящей от влажности материала. Результаты определения обрабатываются в виде кривых зависимости β от ω. На рис. 76 приведен график, полученный для торфоплиты. По горизонтальной оси графика отложены влажности материала $\omega_в$, а по вертикальной — величины коэффициента влагопроводности β. Кружки на графике соответствуют точкам, полученным опытным путем. Кривая зависимости β от ω показывает, что вначале величина β интенсивно возрастает с увеличением влажности материала, а затем интенсивность возрастания уменьшается, но при влажности плиты бо-

если между участками камня находились очень тонкие пластинки *ab* (рис. 9, *б*) из абсолютно нетеплопроводного материала ($\lambda=0$). В действительности тепловой поток искривляется (рис. 9, *а*), обтекая пустоту, заполненную малотеплопроводным материалом; это значительно увеличивает количество проходящего тепла. Вследствие этого расчет по способу А дает заведомо преувеличенные значения величины R.

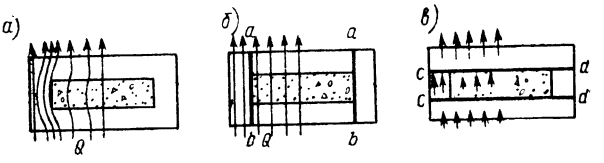


Рис. 9. Схемы тепловых потоков в камне

а — фактическая; *б* — для расчета по способу А; *в* — для расчета по способу Б

В расчете по способу Б при определении термического сопротивления слоя *2* были применены формулы (23) и (21), действительные только при условии, что температуры по всей поверхности слоя одинаковые. Это могло бы быть лишь в случае, если по границе слоев *1—2* и *2—3* находились очень тонкие пластинки *cd* (рис. 9, *в*) из абсолютно теплопроводного материала ($\lambda=\infty$), вследствие чего на всей поверхности пластинок температура была бы одинаковой. Очевидно, введение в камень та-

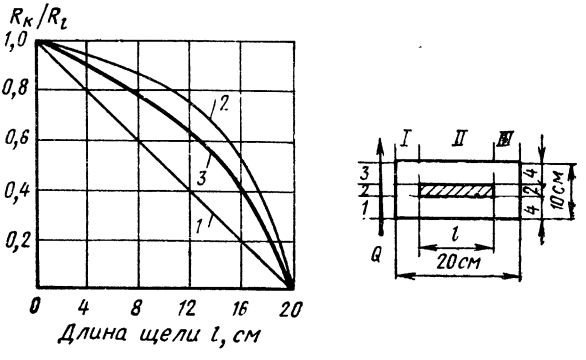


Рис. 10. Изменения относительного термического сопротивления щелевого камня, установленные аналитическими расчетами по способам А (прямая *1*) и Б (кривая *2*) и экспериментально при помощи электромодели (кривая *3*). $R_к$ — термическое сопротивление образца без щели; R_l — то же, со щелью

ких пластинок должно понизить его термическое сопротивление. Вследствие этого расчет по способу Б дает заведомо преуменьшенные значения R.

Подробное исследование, проведенное проф. О. Е. Власовым, показывает, что обе величины, полученные разными способами, дают крайние пределы, между которыми лежит истинная величина термического сопротивления конструкции [10].

Исследования проводились на модели пустотелого камня (рис. 10). При исследовании длина щели камня l изменялась

лее 100% интенсивность возрастания коэффициента β начинает увеличиваться. Для других строительных материалов кривые зависимости β от ω имеют примерно такой же характер.

График рис. 76 является расчетным и учитывает кроме влияния влажности также структуру материала и характер связи влаги с материалом, так как относится только к одному данному материалу. В приложении 5 даны значения коэффициентов влагопроводности для некоторых строительных материалов в зависимости от их влажности. По этим данным могут быть построены расчетные графики, аналогичные графику рис. 76.

Влияние температуры на величину коэффициента влагопроводности материала состоит в том, что с повышением температуры уменьшаются вязкость воды и ее поверхностное натяжение. Изменение величины коэффициента β будет обратно пропорциональным изменению вязкости (μ) и прямо пропорциональным изменению поверхностного натяжения (σ), т. е.

$$\beta_t = \beta_0 \frac{\mu_0 \sigma_t}{\mu_t \sigma_0}, \qquad (102)$$

где индексы 0 и t относятся к соответствующим температурам. Таким образом, если известна температура, при которой определен коэффициент влагопроводности материала, то легко определить его и для других температур.

Значения коэффициентов вязкости и поверхностного натяжения воды для температур от 0 до 30° С приведены в табл. 25.

Таблица 25

Величины коэффициентов вязкости μ и поверхностного натяжения σ воды

Температура, °С	0	5	10	15	20	25	30
$\mu \cdot 10^6$, *кг·сек/м²* . . .	182,5	155	133	115,5	102	91	81,7
σ, *эрг/см²*	75,7	74,95	74,19	73,43	72,67	71,91	71,16

Как видно из табл. 25, вязкость воды с повышением температуры уменьшается относительно быстрее, чем поверхностное натяжение, в связи с чем увеличивается коэффициент влагопроводности.

В приложении 5, а также на рис. 78 значения коэффициентов влагопроводности даны для температур около 15°. Для пересчета этих значений на другие температуры А. У. Франчуком для практических расчетов предложена следующая формула:

$$\beta_t = \beta_{15} \frac{1 + 0{,}04t}{1{,}6}, \qquad (102а)$$

где β_t — коэффициент влагопроводности материала при температуре t *град*; β_{15} — коэффициент влагопроводности того же материала при температуре 15° С.

в пределах от нуля до полной длины камня. На графике по горизонтальной оси отложена длина щели l, а по вертикальной оси — отношение термического сопротивления образца без щели $R_к$ к соответствующему термическому сопротивлению образца при различных длинах щели R_l. Щель в камне предполагалась заполненной абсолютно нетеплопроводным материалом $\lambda=0$.

Прямая *1* на графике дает отношения $R_к/R_l$, полученные при расчете камня разрезкой его плоскостями, параллельными тепловому потоку, на участки *I*, *II*, *III*. Кривая *2* дает те же отношения, но полученные расчетом при разрезке камня плоскостями, перпендикулярными тепловому потоку, на слои *1*, *2* и *3*. Кривая *3* дает истинную величину отношений $R_к/R_l$, полученных экспериментально наблюдениями над моделью камня.

Как видно из графика, кривая действительного значения отношений $R_к/R_l$ лежит ближе к кривой *2* (результатам при расчете камня разрезкой его плоскостями, перпендикулярными тепловому потоку), приблизительно на одной трети расстояния по вертикали между прямой *1* и кривой *2*.

Разность между обоими способами будет тем большей, чем больше будет различие значений коэффициентов теплопроводности материалов, входящих в ограждение. В качестве окончательного результата берется среднее значение между величинами $R_{\parallel}$ и $R_{\perp}$, но, учитывая, что истинное значение ближе к величине $R_{\perp}$, среднее значение берется по формуле

$$R = \frac{R_{\parallel} + 2R_{\perp}}{3}. \qquad (24)$$

В примере 7 по формуле (24) получим действительное термическое сопротивление камня

$$R = \frac{0{,}47 + 2 \cdot 0{,}345}{3} = 0{,}387 \ \textit{град} \cdot \textit{м}^2 \cdot \textit{ч}/\textit{ккал},$$

т. е. в этом примере расчет по способу А дал значение R, на 22% большее, а по способу Б на 11% меньшее действительной величины термического сопротивления камня.

Изложенный метод расчета является приближенным, и его точность будет тем меньше, чем больше разница в величинах R_{II} и $R_{\perp}$. Точное значение величины R сложного ограждения, отличающегося по форме от плоской стенки, может быть получено только на основании расчета его температурного поля (см. главу IV).

Любую конструкцию наружного ограждения, какой бы сложной она ни была, можно разрезкой плоскостями, перпендикулярными потоку тепла, представить в виде слоистого огражде-

В пределах от 0 до 30° С ошибка при расчете влияния температуры на величину β по формуле (102а) не превышает 5%, что допустимо для практических расчетов.

При отрицательных температурах влага в порах материала может частично замерзнуть, что повлечет за собой резкое снижение коэффициента влагопроводности. Вопрос о перемещении влаги в строительных материалах при отрицательных температурах изучен очень мало. Р. Е. Брилингом установлено, что полного замерзания влаги, находящейся в порах строительных материалов, обычно не происходит. Всегда имеется часть влаги, которая может перемещаться из одной части материала в другую под влиянием различных сил. Температура замерзания влаги в капиллярах зависит от их диаметра: чем меньше будет диаметр капилляра, тем ниже будет температура замерзания в нем воды. Так, например, в капиллярах диаметром 1,57 *мм* вода замерзает при температуре —6,4° С; в капиллярах диаметром около 0,24 *мм* — при —14,2° С, а в капиллярах диаметром 0,1 *мм* — при —18,6° С.

Для определения количества незамерзшей влаги в строительных материалах, в зависимости от температуры и влажности материала, канд. техн. наук Ю. Д. Ясиным предложена эмпирическая формула:

$$\omega' = a + b\omega_в + \frac{c\omega_в + d}{t}, \qquad (103)$$

где $\omega_в$ — весовая влажность материала в %; ω' — весовая влажность материала, отнесенная к незамерзшей в нем влаге, в %; t — температура материала в *град*; a, b, c, d — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 26.

Таблица 26

Эмпирические коэффициенты, входящие в формулу (103)

Материал	Объемный вес в *кг/м*³	Коэффициенты			
		a	*b*	*c*	*d*
Бетон тяжелый	2160	1,9	0,15	—1,72	5,28
Керамзитобетон	1430	3,83	0,22	—0,3	— 4,27
Кирпич красный . . .	1690	0,18	0	—0,93	— 2,64
Кирпич силикатный . .	1935	0,55	0,58	0,78	—18,15
Пенобетон	850	7,56	0	—1,82	6,12
Цементно-песчаный раствор 1 : 2	1725	0,55	0,8	—0,61	0,57
Цементно-песчаный раствор 1 : 4	1690	2,2	0,25	—1,2	1,92

Формула (103) дает возможность определить также температуру, при которой начинается замерзание влаги в материале при данной его влажности. Для этого в формуле (103) вместо ω' под-

ния, а разрезкой плоскостями, параллельными потоку тепла, — в виде ограждения, состоящего из отдельных участков по его поверхности, хотя и имеющих несколько слоев, но однородность материала в которых в пределах участка не нарушена. Если при этом в ограждении окажутся пустоты или отверстия круглой или овальной формы, заполненные или не заполненные другим материалом, то для расчета их заменяют равновеликими по площади квадратными или прямоугольными отверстиями.

Пример 8. Определить сопротивление теплопередаче стены комбинированной кладки, сложенной из силикатного кирпича на цементном растворе и с заполнением легким бетоном (рис. 11).

Для расчета принимаем следующие значения коэффициентов теплопроводности материалов стены:

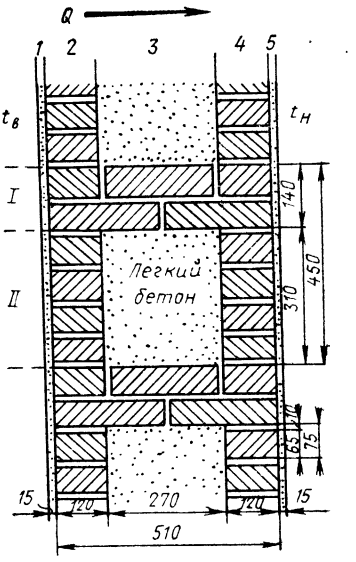


Рис. 11. Вертикальный разрез кирпичной стены комбинированной кладки

кладка из силикатного кирпича на цементном растворе . .	$\lambda=0{,}75$
легкий бетон объемного веса 800 *кг/м*³	$\lambda=0{,}25$
внутренняя штукатурка теплым раствором	$\lambda=0{,}6$
наружная штукатурка сложным раствором	$\lambda=0{,}75$

Однородность материала стены нарушена как в параллельном, так и в перпендикулярном тепловому потоку направлении, следовательно, расчет необходимо произвести дважды.

Так как структура стены в продольном направлении не меняется, в качестве расчетной площади по поверхности стены берем по высоте шесть рядов кладки длиной 1 *м*, тогда расчетная площадь $F=0{,}45\cdot 1=0{,}45$ *м*².

А. Расчет параллельно тепловому потоку

Плоскостями, параллельными направлению теплового потока, разрезаем стену на два участка *I* и *II* (рис. 11).

Участок I. Сплошная кирпичная кладка с наружной и внутренней штукатуркой. Термическое сопротивление этого участка

$$R_{\text{I}}=\frac{0{,}015}{0{,}60}+\frac{0{,}51}{0{,}75}+\frac{0{,}015}{0{,}75}=0{,}725.$$

Площадь первого участка $F_{\text{I}}=0{,}14$ *м*².

Участок *II*. Кирпичные стенки, легкий бетон и штукатурка (два слоя):

$$R_{\text{II}}=\frac{0{,}015}{0{,}6}+\frac{0{,}12}{0{,}75}2+\frac{0{,}27}{0{,}25}+\frac{0{,}015}{0{,}75}=1{,}445.$$

Площадь второго участка $F_{\text{II}}=0{,}31$ *м*².

ставляется величина $\omega_в$, и полученное уравнение решается относительно величины t, которая и даст значение температуры начала замерзания влаги в материале.

Пример 49. Пенобетон имеет влажность 15%, определить температуру начала замерзания в нем влаги $t_{н.з}$ и количество замерзшей в нем влаги при $t=-10°$ С.

По формуле (103) для определения температуры начала замерзания влаги $t_{н.з}$ получим уравнение

$$15 = 7{,}56 + \frac{-1{,}82 \cdot 15 + 6{,}12}{t_{н.з}}, \text{ откуда } t_{н.з} = -2{,}8° \text{ С}.$$

Количество незамерзшей влаги при температуре $-10°$ С будет

$$\omega' = 7{,}56 + \frac{-1{,}82 \cdot 15 + 6{,}12}{-10} = 7{,}56 + 2{,}12 = 9{,}68\%.$$

Количество замерзшей влаги: 15—9,68=5,32%, что составляет 35% всего содержания влаги в пенобетоне.

Если влажность пенобетона будет 25%, то получим $t_{н.з}=-2{,}3°$ С и $\omega'=11{,}5\%$; количество замерзшей влаги 13,5%, что составляет 54% всей влаги, содержащейся в пенобетоне.

Пример 49 показывает, что количество влаги, замерзающей в материале, увеличивается с повышением его влажности и понижением температуры. Оттаивание влаги, замерзшей в материале, происходит только при повышении его температуры до 0°. Если влага, содержащаяся в материале, имеет растворимые соли, то оттаивание ее может происходить и при температурах ниже 0°. При отрицательных температурах коэффициент влагопроводности изменяется пропорционально уменьшению относительного количества незамерзшей влаги и понижению температуры в связи с изменением вязкости и поверхностного натяжения.

2. РАСЧЕТ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ В НЕМ ЖИДКОЙ ВЛАГИ

В нестационарных условиях перемещения жидкой влаги на основании уравнения (100) и по аналогии с теплопроводностью при нестационарном тепловом потоке [уравнение (1) части I] для изменения влажности материала во времени в плоской однородной стенке получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \omega}{\partial Z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\beta_x}{10\gamma} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x}\right), \qquad (104)$$

где γ — объемный вес материала в $кг/м^3$; 10 — количество влаги в $г$, необходимой для повышения влажности 1 $кг$ материала на 1%; x — координата направления перемещения влаги в $м$.

Аналогично изложенному в части I для расчетов теплопередачи в нестационарных условиях решение этого уравнения проведем в конечных разностях. При этом оно примет вид:

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta Z} = \frac{\beta}{10\gamma} \cdot \frac{\Delta^2 \omega}{\Delta x^2}.$$

По формуле (22) термическое сопротивление стены

$$R_{\parallel} = \frac{0,45}{\frac{0,14}{0,725} + \frac{0,31}{1,445}} = 1,103.$$

Б. Расчет перпендикулярно тепловому потоку

Плоскостями, перпендикулярными тепловому потоку, разрезаем стену на пять слоев (рис. 11):

слой 1. Внутренняя штукатурка — $R_1 = 0,015 : 0,6 = 0,025$;

слой 2 и 4. Кирпичные стенки — $R_2 = R_4 = 0,12 : 0,75 = 0,16$;

слой 3. Легкий бетон с перевязывающими рядами кирпичной кладки.

Предварительно по формуле (23) определяем средний коэффициент теплопроводности материалов слоя:

$$\lambda_{ср} = \frac{0,25 \cdot 0,31 + 0,75 \cdot 0,14}{0,45} = 0,405,$$

тогда $R_3 = 0,27 : 0,405 = 0,667$.

Слой 5. Наружная штукатурка $R_5 = 0,015 : 0,75 = 0,02$.

Термическое сопротивление стены

$$R_{\perp} = 0,025 + 0,16 \cdot 2 + 0,667 + 0,02 = 1,032.$$

Величина $R_{\parallel}$ оказалась на 7% больше величины $R_{\perp}$.

Действительная величина термического сопротивления стены по формуле (24)

$$R = \frac{1,103 + 2 \cdot 1,032}{3} = 1,056.$$

Сопротивление теплопередаче стены

$$R_0 = R_в + R + R_н = 0,133 + 1,056 + 0,05 = 1,239$$

или, округляя, получим $R_0 = 1,24$ *град·м²·ч/ккал*.

При применении в наружных стенах различных пустотелых камней с большим количеством пустот (керамические камни, бетонные камни и пр.) разрезка стен плоскостями, параллельными и перпендикулярными направлению теплового потока, для расчета их термического сопротивления чрезвычайно усложнила бы расчет, так как при этом получилось бы очень большое количество участков по поверхности стены и слоев по ее толщине. Поэтому в таких случаях для обычных практических расчетов предварительно определяют средний коэффициент теплопроводности камня, а затем рассматривают стену, предполагая, что она сложена из сплошных камней с коэффициентом теплопроводности, равным полученному среднему коэффициенту теплопроводности камня.

Пример 9. Керамический камень (рис. 12) со сквозными щелевидными пустотами уложен в стене так, что направления его пустот параллельны плоскости стены. Определить средний коэффициент теплопроводности камня.

Коэффициент теплопроводности керамики $\lambda = 0,7$ *ккал/м·ч·град*.

Термические сопротивления воздушных прослоек по табл. 8 принимаем равными: при толщине 10 *мм* $R = 0,16$; при толщине 15 *мм* $R = 0,165$ *град·м²·ч/ккал*.

Разбив стенку на равные слои толщиной Δx и обозначив индексами $n-1$; n; $n+1$ ... порядковые номера плоскостей, разграничивающих слои, а индексами Z — моменты времени, получим:

$$\frac{\omega_{n,z+1} - \omega_{n,z}}{\Delta Z} = \frac{\beta_{n,z}}{10\gamma} \cdot \frac{\omega_{n+1,\,z} + \omega_{n-1,\,z} - 2\omega_{n,\,z}}{\Delta x^2}.$$

Решаем это уравнение относительно $\omega_{n,z+1}$:

$$\omega_{n,z+1} = \omega_{n,\,z} + \frac{\beta_{n,z}}{10\gamma} \cdot \frac{\Delta Z}{\Delta x^2} \left(\omega_{n+1,z} + \omega_{n-1,z} - 2\omega_{n,z}\right), \quad (105)$$

где $\omega_{n,z+1}$ — влажность материала в плоскости n в момент времени $Z+\Delta Z$ в %.

Величина коэффициента влагопроводности β, входящая в формулу (105), является переменной, зависящей от влажности материала, поэтому для каждого следующего момента времени значение β в этой формуле берется другим (по графику зависимости β от ω) по значению влажности материала в плоскости n на данный момент времени. При переменной величине β формула (105) является приближенной. Точной формулой для вычисления влажности материала будет в этом случае следующая:

$$\omega_{n,\,z+1} = \omega_{n,z} + \frac{\Delta Z}{10\gamma\Delta x^2} \left[\beta_{n+1,z}\left(\omega_{n+1,\,z} - \omega_{n,z}\right) + \beta_{n-1,z}\left(\omega_{n-1,z} - \omega_{n,z}\right)\right], \quad (105а)$$

где $\beta_{n+1,z}$ — величина коэффициента влагопроводности, соответствующая влажности материала $\frac{\omega_{n+1,z} + \omega_{n,z}}{2}$; $\beta_{n-1,z}$ — величина коэффициента влагопроводности, соответствующая влажности материала $\frac{\omega_{n-1,z} + \omega_{n,\,z}}{2}$.

Однако расчет по формуле (105а) сложнее, чем по формуле (105). Сравнение расчета по формуле (105), приведенного в примере 50, с расчетом по формуле (105а) дает через три месяца сушки стены расхождение средней влажности бетона только на 0,3% по сравнению с расчетом по формуле (105а). Максимальное расхождение влажностей в отдельных плоскостях стены не превышает 0,7%. Поэтому для практических расчетов можно пользоваться формулой (105) как более простой.

Максимальное допустимое значение интервала времени ΔZ, которое можно принять в расчете при принятой величине Δx, определяется по формуле

$$\Delta Z_{\text{макс}} = \frac{\Delta x^2 \cdot 10\gamma}{2\beta} = \frac{5\gamma\Delta x^2}{\beta}. \quad (106)$$

Так как камень симметричен относительно его средней оси, расчет выполняем для одной его половины; учитывая, что структура камня по высоте одинакова, в качестве расчетной площади принимаем половину длины камня, т. е. 95 *мм*.

А. Расчет параллельно тепловому потоку

Участок *I*. Сплошная керамика:

$$R_I = \frac{0{,}19}{0{,}7} = 0{,}272; \quad F_I = 18.$$

Участок *II*. Керамика с пятью пустотами:

$$R_{II} = \frac{0{,}12}{0{,}7} + 0{,}165 \cdot 4 + 0{,}16 = 0{,}992; \quad F_{II} = 56.$$

Участок *III*. Керамика с одной средней пустотой:

$$R_{III} = \frac{0{,}18}{0{,}7} + 0{,}16 = 0{,}417; \quad F_{III} = 14.$$

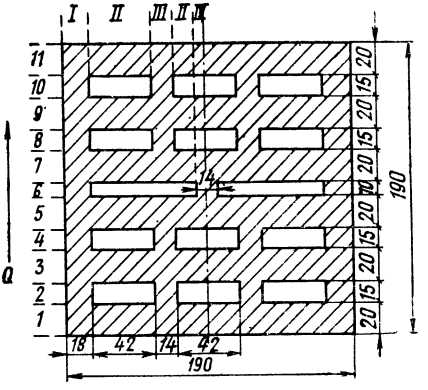


Рис. 12. Горизонтальный разрез пустотелого керамического камня

Участок *IV*. Керамика с четырьмя пустотами:

$$R_{IV} = \frac{0{,}13}{0{,}7} + 0{,}165 \cdot 4 = 0{,}846; \quad F_{IV} = 7.$$

Термическое сопротивление камня по формуле (22)

$$R_{\text{II}} = \frac{95}{\frac{18}{0{,}272} + \frac{56}{0{,}992} + \frac{14}{0{,}417} + \frac{7}{0{,}846}} = 0{,}578.$$

Б. Расчет перпендикулярно тепловому потоку

Слои *1*, *3*, *5*, *7*, *9* и *11*. Сплошная керамика. Сумма термических сопротивлений слоев

$$\Sigma R = \frac{0{,}02}{0{,}7} 6 = 0{,}172.$$

Слои *2*, *4*, *8* и *10*. Керамика с пустотами толщиной 15 *мм*.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха в пустоте камня: $\lambda_э = \delta : R = 0{,}015 : 0{,}165 = 0{,}091$, а средний коэффициент теплопроводности слоя по формуле (23)

$$\lambda_{ср} = \frac{0{,}7 \cdot 32 + 0{,}091 \cdot 63}{95} = 0{,}296,$$

откуда сумма термических сопротивлений этих слоев

$$\Sigma R = \frac{0{,}015}{0{,}296} 4 = 0{,}203.$$

В формуле (106) величина β берется по наибольшему значению ω, ожидаемому в ограждении.

Определение влажности материала на поверхности, граничащей с воздухом, при процессе сушки ограждения с влажностью материала, большей предела сорбционного увлажнения, делается на основании следующих соображений (рис. 77).

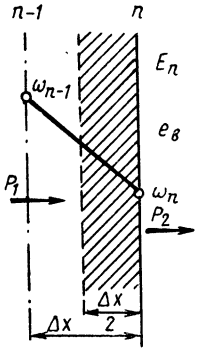


Рис. 77. К расчету граничных условий при испарении влаги с поверхности

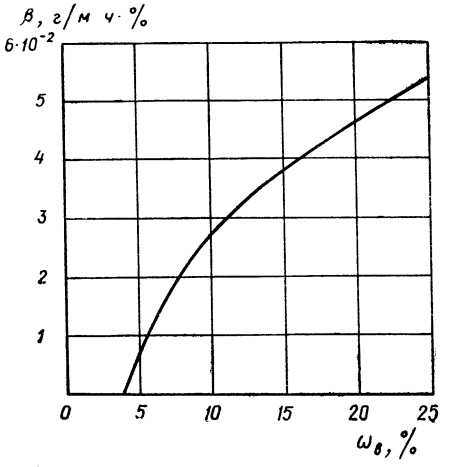


Рис. 78. Коэффициент влагопроводности бетона с объемным весом 1380 *кг/м*³ в зависимости от его влажности

Количество влаги, притекающей к поверхности (плоскости n) от плоскости n—1, по формуле (100):

$$P_{1,z} = \beta \frac{\omega_{n-1} - \omega_n}{\Delta x} \Delta Z \ г/м^2.$$

Количество влаги, испаряющейся с поверхности:

$$P_{2,z} = \frac{E_n - e_в}{R_{в.п}} \Delta Z \ г/м^2,$$

где E_n — максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре поверхности n, в *мм рт. ст.*; $e_в$ — упругость водяного пара воздуха в *мм рт. ст.*; $R_{в.п}$ — сопротивление влагообмену в $мм \cdot ч \cdot м^2/г$.

Количество влаги, необходимое для изменения влажности материала в слое $\frac{\Delta x}{2}$, прилегающем к поверхности, на величину $\Delta\omega_n$ будет:

$$P_{3,z} = \frac{\Delta x}{2} \gamma 10 \Delta\omega_n = 5\gamma \Delta x \Delta\omega_n.$$

Слой *6*. Керамика и воздушная прослойка толщиной 10 *мм*.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_э = 0{,}01 : 0{,}16 = 0{,}062$, а средний коэффициент теплопроводности слоя

$$\lambda_{ср} = \frac{0{,}7 \cdot 25 + 0{,}062 \cdot 70}{95} = 0{,}23, \quad R_6 = \frac{0{,}01}{0{,}23} = 0{,}043.$$

Термическое сопротивление камня

$$R_{\perp} = 0{,}172 + 0{,}203 + 0{,}043 = 0{,}418.$$

Вычисляем действительную величину термического сопротивления камня по формуле (24):

$$R = \frac{0{,}578 + 2 \cdot 0{,}418}{3} = 0{,}471 \; град \cdot м^2 \cdot ч / ккал.$$

Тогда средний коэффициент теплопроводности камня

$$\lambda_{камня} = \frac{\delta}{R} = \frac{0{,}19}{0{,}471} = 0{,}403 \; ккал / м \cdot ч \cdot град.$$

Материалы, составляющие ограждение, имеют неправильную форму. Примерами таких ограждений являются кладки из бутового камня на различных растворах. Из-за неправильности формы камня и раствора, заполняющего промежутки между камнями, предыдущий способ разрезки конструкции плоскостями, параллельными и перпендикулярными направлению теплового потока, оказывается неприменимым. В этом случае приходится предварительно определять средний коэффициент теплопроводности материалов ограждения, а затем рассматривать кладку как конструкцию, состоящую из однородного материала, имеющего найденный средний коэффициент теплопроводности. Этот коэффициент определяется по формуле

$$\lambda_{ср} = \frac{\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 + \ldots + \lambda_n v_n}{v_1 + v_2 + \ldots + v_n}, \qquad (25)$$

где $\lambda_{ср}$ — средний коэффициент теплопроводности ограждения в *ккал/м·ч·град*; λ_1, λ_2, ... — коэффициенты теплопроводности отдельных материалов, составляющих ограждение; v_1, v_2, ... — объемы, занимаемые в ограждении отдельными материалами; n — число материалов, входящих в ограждение.

Объемы отдельных материалов можно брать в любых мерах (соблюдая только однородность измерения для всех материалов), так как в формуле (25) имеют значения не абсолютные величины объемов, а их соотношение между собой. Обычно эти объемы выражают в процентах, принимая их сумму за 100%.

Пример 10. Определить коэффициент теплопроводности кладки из бутового камня неправильной формы, сложенной на известково-песчаном растворе. Коэффициент теплопроводности камня $\lambda_1 = 1{,}5$, коэффициент теплопроводности раствора $\lambda_2 = 0{,}7$. Объем, занимаемый раствором в кладке, $v_2 = 30\%$.

Объем, занимаемый камнем, будет $v_1 = 70\%$. По формуле (25) получим:

$$\lambda_{кл} = \frac{1{,}5 \cdot 70 + 0{,}7 \cdot 30}{100} = 1{,}26 \; ккал / м \cdot ч \cdot град.$$

Из условия баланса влаги имеем: $P_{3,z}=P_{1,z}-P_{2,z}$, откуда, подставляя значения P, получим:

$$5\gamma\Delta x\Delta\omega_n=\beta\frac{\omega_{n-1}-\omega_n}{\Delta x}\Delta Z-\frac{E_n-e_в}{R_{в.п}}\Delta Z.$$

Решая это уравнение относительно $\Delta\omega_n$, получим окончательно:

$$\Delta\omega_n=\frac{\beta\Delta Z}{5\gamma\Delta x^2}(\omega_{n-1}-\omega_n)-\frac{\Delta Z}{5\gamma\Delta xR_{в.п}}(E_n-e_в), \qquad (107)$$

где $\Delta\omega_n$ — изменение влажности материала в плоскости n за интервал времени ΔZ часов.

По граничным условиям (определению влажности на поверхности, граничащей с воздухом) максимальная величина интервала времени $\Delta Z'_{макс}$ определяется на основании следующих соображений. При $\Delta Z'_{макс}$ должно быть $P_1=P_2$ (рис. 77), откуда получим:

$$\beta\frac{\omega_{n-1,\,z}-\omega'_{n,\,z+1}}{\Delta x}\Delta Z=\frac{E_n-e_в}{R_{в.п}}\Delta Z.$$

Решая это уравнение относительно $\omega'_{n,\,z+1}$, получим:

$$\omega'_{n,z+1}=\omega_{n-1,z}-\frac{\Delta x}{\beta R_{в.п}}(E_n-e_в). \qquad (108)$$

Если $\omega_{n,z+1}$, определенное по формуле (107), получится меньше $\omega'_{n,\,z+1}$, определенного по формуле (108), то величина ΔZ взята завышенной и необходимо ее уменьшить, чтобы получилось значение $\omega_{n,z+1}\geqslant\omega'_{n,\,z+1}$.

При падении влажности материала на поверхности ограждения ниже предела сорбционного увлажнения приходится учитывать еще перемещение влаги в паровой фазе от плоскости $n-1$ к плоскости n (рис. 77) вследствие снижения упругости водяного пара в плоскости n ниже E_n, а следовательно, и ниже упругости в плоскости $n-1$ (см. пример 50).

Пример 50. Рассчитать скорость удаления строительной влаги в течение трех летних месяцев из сплошной легкобетонной стены толщиной 50 *см*. Начальная влажность бетона 25%. Объемный вес $\gamma=1400$ *кг/м*^{3}.

По приложению 6 построен расчетный график зависимости коэффициента влагопроводности β легкого бетона от влажности $\omega_в$, приведенный на рис. 78. Для летних месяцев примем: температуру воздуха 15° С и его влажность 70%, чему соответствует упругость водяного пара $e=12{,}79\cdot0{,}7=9$ *мм рт. ст.*

Эти же показатели примем и для внутреннего воздуха, считая, что оконные проемы еще не будут заполненными. Следовательно, будет симметричное удаление влаги из стены в обе стороны, поэтому расчет делаем для одной половины стены по ее толщине. Делим половину толщины стены на пять равных слоев толщиной $\Delta x=0{,}05$ *м* (рис. 79). Нумерацию плоскостей примем следующей: для плоскости симметрии $n=0$; для поверхности стены $n=5$. При начальной влажности бетона равной 25%, по графику рис. 78 получим $\beta=0{,}054$ *г/м·ч* %. При этом значении β по формуле (106) получим:

$$\Delta Z_{макс}=\frac{5\cdot1400\cdot0{,}05^2}{0{,}054}=324\ ч;$$

в расчете примем $\Delta Z=120$ *ч* (5 суток).

Обычная кирпичная кладка на сложном или известковом растворе представляет собой соединение двух материалов с различными коэффициентами теплопроводности. Обычно кладку рассматривают как однородный материал, так как для нее принимается средний коэффициент теплопроводности с учетом теплопроводности кирпича и раствора. Если швы кладки остаются нормальными или незначительно уширяются, то расчет таких кладок можно вести по формуле (25). Если же делается значительное уширение продольных вертикальных швов кладки с перевязью через несколько рядов, что нарушает равномерную структуру кладки, то для расчета термического сопротивления необходима разрезка кладки плоскостями — сначала параллельными, потом перпендикулярными направлению теплового потока.

Ни в коем случае нельзя пользоваться формулой (25) для определения коэффициента теплопроводности материалов по рецептуре их изготовления, например для бетонов, силикатгорганикoв и т. д., так как в этом случае: 1) объем получаемого материала всегда будет меньше суммы объемов составных частей; 2) заполнение пустот или пор одних материалов другими при смешивании составных частей изменяет коэффициент теплопроводности составляющих материалов; 3) присутствие воды и химические процессы при схватывании вяжущих веществ в свою очередь оказывают значительное влияние на коэффициент теплопроводности исходного материала. В этом случае определить коэффициент теплопроводности материала можно только лабораторным путем или на основании его объемного веса.

2. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОГРАЖДЕНИИ

Для оценки теплотехнических качеств ограждения необходимо знать не только величину его сопротивления теплопередаче, но также температуры в любой плоскости ограждения при заданных значениях температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения. Особенно большое значение для теплотехнической оценки ограждения имеет температура на его внутренней поверхности, так как она определяет возможность образования конденсата, что недопустимо с санитарно-гигиенической точки зрения. Кроме того, образование конденсата может быть причиной порчи отделки внутренней поверхности ограждения. Распределение температуры в ограждении необходимо также знать при расчетах влажностного режима ограждения.

Температура внутреннего воздуха $t_в$ для некоторых зданий и помещений принимается равной в° С:

Жилые помещения, комнаты для занятий в общественных зданиях и пр.	18
Жилые помещения при расчетной наружной температуре ниже —31°	20
Лечебные заведения, детские комнаты, процедурные и пр.	20

Расчетные формулы для вычисления влажности бетона в отдельных плоскостях стены будут следующие.

Плоскости *1—4*. По формуле (105) получим:

$$\frac{\beta\Delta Z}{10\gamma\Delta x^2}=\frac{120}{10\cdot 1400\cdot 0{,}05^2}\beta=3{,}4\beta,$$

откуда

$$\omega_{n,z+1}=\omega_{n,z}+3{,}4\beta\left(\omega_{n+1,z}+\omega_{n-1,z}-2\omega_{n,z}\right).$$

Плоскость *О*. Ввиду того что эта плоскость является плоскостью симметрии конструкции, будем иметь: $\omega_{n+1}=\omega_{n-1}=\omega_1$, и предыдущая формула примет вид:

$$\omega_{0,z+1}=\omega_0+6{,}8\beta\left(\omega_1-\omega_0\right).$$

Плоскость *5* (поверхность стены). До момента снижения влажности бетона в этой плоскости до 4%, т. е. до его предела сорбционного увлажнения (см. рис. 66), расчет проводится по формуле (107), из которой получим:

$$\frac{\beta\Delta Z}{5\gamma\Delta x^2}=\frac{120}{5\cdot 1400\cdot 0{,}05^2}\beta=6{,}85\beta.$$

Примем сопротивление влагообмену у поверхности стены $R_{в\,п}=0{,}2$ *мм·ч·м²/г*. Максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре 15° С, будет: $E_5=12{,}8$ *мм рт. ст.* При этом получим:

$$\frac{\Delta Z}{5\gamma\Delta x R_{в.п}}\left(E_5-e_в\right)=\frac{120}{5\cdot 1400\cdot 0{,}05\cdot 0{,}2}\left(12{,}8-9\right)=6{,}45,$$

откуда по формуле (107):

$$\Delta\omega_5=6{,}85\beta\left(\omega_4-\omega_5\right)-6{,}45.$$

Величина коэффициента β в этой формуле принимается соответствующей средней влажнести бетона между плоскостями *4* и *5*, т. е. для влажности, равной $\frac{\omega_4+\omega_5}{2}$.

Для контроля величины ΔZ по граничным условиям по формуле (108) получим следующую контрольную формулу:

$$\omega_5=\omega_4-\frac{0{,}05}{0{,}2\beta}\left(12{,}8-9\right)=\omega_4-\frac{0{,}95}{\beta}.$$

Так как температура бетона в стене равна 15° С, значения β берем непосредственно по графику рис. 78 без поправки на температуру.

Расчет изменения влажности бетона в стене располагаем в следующей расчетной таблице.

Для каждого момента времени после вычисления влажности бетона во всех плоскостях стены под ними в скобках выписываются соответствующие им значения коэффициента $\beta\cdot 10^2$, определяемые по рис. 78, которые и принимаются в расчете при определении влажностей бетона в следующий момент времени. В графе плоскости *4* записываются два значения $\beta\cdot 10^2$: первое, соответствующее влажности в плоскости *4*, второе, соответствующее средней влажности плоскостей *4* и *5*.

Для большей плавности расчета первый интервал времени принят равным двум суткам, при этом числовые коэффициенты при β в расчетных формулах изменены в отношении 2 : 5. Принятые в расчете интервалы времени указаны в графе 2 расчетной таблицы.

На 7-е сутки в плоскости *5* влажность бетона получилась равной 16,93%. По проверочной формуле (для проверки интервала времени) влажность равна:

$$\omega_5'=25-\frac{0{,}95}{0{,}054}=7{,}4\%,$$

Зрительные залы кино и театров, аудитории, лаборатории, буфеты и пр.	16
Физкультурные залы, универсальные магазины, производственные помещения и пр.	15
Магазины бакалейных товаров, кладовые, производственные помещения тяжелого физического труда	12
Перевязочные, раздевальни, врачебные кабинеты	22
Операционные, ванные, душевые и пр.	25
Мыльные отделения в банях	30
Парильные отделения в банях	40

Температуры воздуха с наружной стороны ограждения $t_н$ берутся равными расчетной температуре данной местности, определяемой по данным, изложенным в главе V.

Если наружная поверхность ограждения не имеет непосредственного соприкосновения с наружным воздухом, а выходит в неотапливаемое помещение (чердачные перекрытия, перекрытия над подвалами и т. д.), величина $t_н$ определяется расчетом из условий теплового баланса неотапливаемого помещения. Этот расчет делается на основании следующих соображений.

Обозначим температуру воздуха в неотапливаемом помещении через t_x, а температуры воздуха в прилегающих помещениях, включая наружный воздух, — соответственно через t_1, t_2,... Поверхности ограждений, ограничивающих неотапливаемое помещение, обозначим соответственно через F_1, F_2, ... и их коэффициенты теплопередачи — через k_1, k_2,... Тогда количество тепла, проходящего за 1 *ч* через любое из этих ограждений, будет соответственно равно: $Q_1=(t_1-t_x)k_1F_1$; $Q_2=(t_2-t_x)k_2F_2$ и т. д.

Кроме того, в помещение может поступать наружный или внутренний воздух с температурой $t_{воз}$ в количестве W *кг/ч*, на нагревание или охлаждение которого до температуры t_x потребуется тепло в количестве $Q_в=(t_{воз}-t_x)Wc$, где $c=0{,}24$ *ккал/кг*$\times$ $\times$*град* — удельная теплоемкость воздуха. В неотапливаемом помещении могут быть также источники тепла (трубы отопления, тепло, выделяемое животными, биологическое тепло при хранении овощей и пр.), выделяющие его в количестве Q_0 *ккал/ч*. По условиям теплового баланса сумма всех этих количеств тепла должна быть равна нулю, т. е. $(t_1-t_x)k_1F_1+(t_2-t_x)k_2F_2+\ldots+(t_{воз}-t_x)Wc+Q_0=0$.

Решая это уравнение относительно t_x, получим

$$t_x=\frac{t_1k_1F_1+t_2k_2F_2+t_3k_3F_3+\cdots+Wct_{воз}+Q_0}{k_1F_1+k_2F_2+k_3F_3+\cdots+Wc}. \qquad (26)$$

Эта формула и служит для определения температуры воздуха в неотапливаемых помещениях.

Пример 11. Определить температуру воздуха на чердаке над перекрытием, рассмотренным в примере 6.

Перекрытие имеет коэффициент теплопередачи $k_1=0{,}78$. Кровля стальная по обрешетке из досок сечением 4×10 *см* с промежутками между ними 10 *см*. Считая термическое сопротивление стали равным нулю, по формуле (17) получим:

в сечении по стали $R_0'=0{,}1+0{,}05=0{,}15$;

в сечении по деревянной обрешетке

$$R_0''=0{,}1+\frac{0{,}04}{0{,}15}+0{,}05=0{,}417.$$

По формуле (22) получим для кровли:

$$R_0=\frac{20}{\frac{10}{0{,}15}+\frac{10}{0{,}417}}=0{,}22 \text{ или } K_2=\frac{1}{0{,}22}=4{,}55.$$

Примем температуру воздуха под перекрытием $t_в=18°$ С и температуру наружного воздуха $t_н=-41°$ С.

На 1 *м* длины здания имеем площадь чердачного перекрытия $F_1=18$ *м*^{2}. Кровля имеет уклон около 30°, поэтому площадь кровли будет: $F_2=\frac{18}{\cos 30°}=$ $=21$ *м*^{2}. Объем чердака 36 *м*^{3}.

Принимая воздухообмен чердака с наружным воздухом однократным в час, получим объем воздуха, поступающего на чердак, равный 36 *м*^{3}. При $t_н=-41°$ С объемный вес воздуха будет $\gamma=1{,}52$ *кг/м*^{3} и количество его $W=1{,}52\times36=55$ *кг/ч*.

На чердаке проходят изолированные трубы верхней разводки системы отопления, выделяющие тепло $Q_0=80$ *ккал/ч*.

Подставляя найденные величины в формулу (26), получим:

$$t_x=\frac{18\cdot0{,}78\cdot18-41\cdot4{,}55\cdot21-41\cdot55\cdot0{,}24+80}{0{,}78\cdot18+4{,}55\cdot21+55\cdot0{,}24}=-33{,}6°\text{ С}.$$

При наличии снега на кровле температура t_x будет выше.

Расчет температуры в ограждении делается на основании следующих соображений.

Количество тепла, проходящего за 1 *ч* через 1 *м*^{2} ограждения,

$$Q=\frac{t_в-t_н}{R_0}, \qquad (а)$$

где $t_в-t_н$ — разность температур внутреннего и наружного воздуха.

Количество тепла, воспринимаемого 1 *м*^{2} внутренней поверхности ограждения за 1 *ч*,

$$Q_в=\alpha_в(t_в-\tau_в)=\frac{t_в-\tau_в}{R_в}, \qquad (б)$$

где $\tau_в$ — температура внутренней поверхности ограждения.

В условиях стационарного теплового потока величина Q должна быть равна величине $Q_в$, следовательно, из уравнений (а) и (б) получим:

$$\frac{t_в-t_н}{R_0}=\frac{t_в-\tau_в}{R_в},$$

Расчетная таблица

Z, сутки	ΔZ	Влажность бетона в % в плоскостях					
		0	1	2	3	4	5
0		25	25	25	25	25	25
	2						
2		25	25	25	25	25	22,24
	5					(5,4) (5,2)	
7		25	25	25	25	24,53	16,93
	5				(5,4)	(5,3) (4,7)	
12		25	25	25	24,91	23,25	12,91
	5			(5,4)	(5,35)	(5,1) (4,3)	
17		25	25	24,98	24,62	21,75	9,51
	5		(5,4)	(5,4)	(5,35)	(4,85) (3,9)	
22		25	25	24,92	24,16	20,2	6,32
	4		(5,4)	(5,4)	(5,25)	(4,65) (3,45)	
26		25	24,99	24,82	23,7	18,86	3,72
	1		(5,4)	(5,35)	(5,2)	(4,8) (3)	e=12,4
27		25	24,98	24,79	23,57	18,7	3,19
	1		(5,4)	(5,35)	(5,2)	(4,8) (2,9)	e=11,6
28		25	24,97	24,75	23,44	18,54	2,94
	2		(5,4)	(5,35)	(5,15)	(4,75) (2,85)	e=11,1
30		25	24,96	24,67	23,19	18,22	2,79
	2		(5,4)	(5,35)	(5,1)	(4,7) (2,8)	e=10,9
32		24,99	24,94	24,58	22,95	17,91	2,75
	3	(5,4)	(5,4)	(5,35)	(5,1)	(4,65) (2,75)	e=10,8
35		24,98	24,91	24,44	22,6	17,47	2,74
	3	(5,4)	(5,35)	(5,3)	(5)	(4,6) (2,7)	e=10,75
38		24,97	24,87	24,29	22,26	17,08	2,69
	5	(5,4)	(5,35)	(5,3)	(4,95)	(4,55) (2,65)	e=10,65
43		24,95	24,78	24,03	21,73	16,48	2,68
	5	(5,4)	(5,35)	(5,25)	(4,85)	(4,45) (2,6)	e=10,6
48		24,92	24,67	23,75	21,24	15,94	2,62
	5	(5,4)	(5,35)	(5,2)	(4,8)	(4,4) (2,5)	e=10,48
53		24,87	24,55	23,47	20,78	15,48	2,6
	5	(5,35)	(5,3)	(5,15)	(4,75)	(4,3) (2,4)	e=10,38
58		24,81	24,41	23,19	20,36	15,08	2,59
	5	(5,35)	(5,3)	(5,1)	(4,7)	(4,25) (2,35)	e=10,32
63		24,74	24,26	22,91	19,97	14,72	2,58
	5	(5,35)	(5,3)	(5,1)	(4,6)	(4,2) (2,3)	e=10,27
68		24,65	24,1	22,63	19,61	14,39	2,57
	5	(5,35)	(5,25)	(5)	(4,55)	(4,1) (2,25)	e=10,22
73		24,55	23,94	22,37	19,27	14,08	2,56
	5	(5,3)	(5,25)	(4,95)	(4,5)	(4,05) (2,2)	e=10,17
78		24,44	23,77	22,11	18,95	13,8	2,55
	5	(5,3)	(5,2)	(4,9)	(4,45)	(4) (2,15)	e=10,13
83		24,32	23,59	21,86	18,65	13,55	2,54
	5	(5,3)	(5,2)	(4,85)	(4,4)	(3,95) (2,1)	e=10,09
88		24,19	23,41	21,62	18,37	13,31	2,53
	5	(5,25)	(5,15)	(4,85)	(4,35)	(3,9) (2,05)	e=10,05
93		24,05	23,23	21,38	18,1	13,09	2,52

откуда

$$\tau_в = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0} R_в. \qquad (27)$$

Эта формула служит для определения температуры внутренней поверхности ограждения.

На основании рассуждений, аналогичных предыдущему, получим для температуры любого слоя ограждения следующую формулу:

$$\tau_n = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0} (R_в + \Sigma_{n-1} R), \qquad (28)$$

где τ_n — температура на внутренней поверхности n-го слоя ограждения, считая нумерацию слоев от внутренней поверхности ограждения; $\Sigma_{n-1} R$ — сумма термических сопротивлений n—1 первых слоев ограждения.

Пользуясь формулой (28), можно вычислить температуры на границах всех слоев ограждения. Внутри слоя, состоящего из одного материала, изменение температуры будет изображено прямой линией. В слоистом ограждении температурная линия будет представлять ломаную, причем падение температуры будет более интенсивным в слоях, у которых материал имеет меньший коэффициент теплопроводности, и менее интенсивным в слоях с большим коэффициентом теплопроводности.

Пример 12. Рассчитать распределение температуры в наружной стеновой панели, рассмотренной в примере 5.

Примем температуру внутреннего воздуха $t_в = 18°$ С и наружного воздуха $t_н = -31°$ С. Так как температурный перепад $\Delta\tau$ в каждом слое ограждения пропорционален его термическому сопротивлению R, разность температур внутреннего и наружного воздуха $t_в - t_н = 49°$ распределяем пропорционально термическим сопротивлениям слоев.

Расчет располагаем следующим образом:

$R_в = 0{,}133;$	$\Delta\tau_в = 3{,}6;$	
		$\tau_в = 18 - 3{,}6 = 14{,}4°$ С
$R_1 = 0{,}057;$	$\Delta\tau_1 = 1{,}6;$	
		$\tau_2 = 14{,}4 - 1{,}6 = 12{,}8°$ С
$R_2 = 0{,}577;$	$\Delta\tau_2 = 16{,}1;$	
		$\tau_3 = 12{,}8 - 16{,}1 = -3{,}3°$ С
$R_3 = 0{,}917;$	$\Delta\tau_3 = 25{,}5;$	
		$\tau_4 = -3{,}3 - 25{,}5 = -28{,}8°$ С
$R_4 = 0{,}029;$	$\Delta\tau_4 = 0{,}8;$	
		$\tau_н = -28{,}8 - 0{,}8 = -29{,}6°$ С
$R_н = 0{,}050;$	$\Delta\tau_н = 1{,}4$	
$R_0 = 1{,}763;$	$t_в - t_н = 49°$ С	

График изменения температуры в панели (рис. 13) показывает, что наиболее интенсивное падение температуры происходит в слое минераловатных плит ($\lambda = 0{,}06$), а наименее интенсивное в фактурных слоях ($\lambda = 1{,}4$). Плоскость с нулевой температурой находится в фибролите на расстоянии 15 *мм* от минераловатных плит.

т. е. меньше 16,93%, следовательно, выбранный интервал времени $\Delta Z = 120$ *ч* не превышает допустимого.

В момент времени $Z = 26$ суток в плоскости *5* влажность бетона становится меньше 4%, т. е. меньше предела сорбционного увлажнения. Следовательно, с этого момента кончается период постоянной скорости сушки стены, и у ее наружной поверхности образуется слой паропроницания, постепенно увеличивающийся и замедляющий скорость сушки, и начинается период падающей скорости сушки. С этого момента влажность бетона в плоскостях *4* и *5* вычисляется следующим образом.

Вычисляются следующие количества перемещающейся влаги за каждый интервал времени ΔZ:

1) в жидкой фазе от плоскости *3* к плоскости *4* по формуле (100):

$$G_{3-4} = \frac{120}{0{,}05}\beta(\omega_3 - \omega_4) = 2400\beta(\omega_3 - \omega_4),$$

причем β принимается соответствующей влажности

$$\frac{\omega_3 + \omega_4}{2};$$

2) в жидкой фазе от плоскости *4* к плоскости *5* по формуле

$$G_{4-5} = 2400\beta(\omega_4 - \omega_5)$$

β соответствует влажности

$$\frac{\omega_4 + \omega_5}{2};$$

3) в парообразной фазе от плоскости *4* к плоскости *5* по формуле (84), принимая для бетона $\mu = 0{,}0145$ *г/м·ч·мм*:

$$P_{4-5} = (12{,}8 - e_5)\frac{120}{0{,}05}0{,}0145 = 35(12{,}8 - e_5),$$

где e_5 — упругость водяного пара в плоскости *5*, определяемая по влажности бетона в этой плоскости следующим образом. По величине ω_5 и изотерме сорбции рис. 66 находим величину относительной упругости водяного пара φ, а затем величину e_5 по формуле $e_5 = 0{,}01 \cdot 12{,}79\ \varphi$, где 12,79 есть максимальная упругость водяного пара для температуры 15° С. Величины e_5 записываются в расчетной таблице под соответствующими значениями ω_5;

4) испаряющейся с поверхности *5* — по формуле

$$P_{\text{и}} = \frac{e_5 - e_{\text{в}}}{R_{\text{в.п}}}\Delta Z = \frac{120}{0{,}2}(e_5 - 9) = 600(e_5 - 9).$$

На основании этих количеств влаги вычисляем изменения влажности в плоскостях *4* и *5* за каждый интервал времени следующим образом.

Плоскость *4*. Количество влаги, притекающей к слою *4*, будет:

$$\Delta P_4 = G_{3-4} - G_{4-5} - P_{4-5}.$$

Вес слоя будет: $\gamma \Delta x\ 1000 = 1400 \cdot 0{,}05 \cdot 1000 = 70\,000$ *г/м²*. Изменение влажности слоя за интервал времени

$$\Delta\omega_4 = \frac{\Delta P_4}{70\,000}100 = \frac{\Delta P_4}{700}\%.$$

Плоскость *5*. Аналогично плоскости *4* получим:

$$\Delta P_5 = G_{4-5} + P_{4-5} - P_{\text{и}}.$$

По формуле (28) можно непосредственно определить температуру на границе любого слоя ограждения, например температура в плоскости примыкания фибролита к минераловатным плитам будет:

$$\tau_з = 18 - \frac{49}{1{,}763}(0{,}133 + 0{,}057 + 0{,}577) = -3{,}3^\circ\text{C}.$$

Формула (27) показывает, что при данной разности температур внутреннего и наружного воздуха температура внутренней поверхности будет зависеть от величины сопротивления теплопередаче ограждения R_0 и от величины сопротивления тепловосприятию $R_в$ у внутренней поверхности. Если на величину теплового потока через ограждение величина $R_в$ не оказывает существенного влияния, поскольку она мала сравнительно с R_0, то на температуру внутренней поверхности ограждения величина $R_в$ влияет значительно. При расчете сопротивления теплопередаче увеличение $R_в$ увеличивает и значение R_0; при определении $\tau_в$, наоборот, большое значение $R_в$ оказывается неблагоприятным как понижающее температуру внутренней поверхности ограждения. Поэтому при определении температуры внутренней поверхности ограждения следует брать более точные значения величины $R_в$.

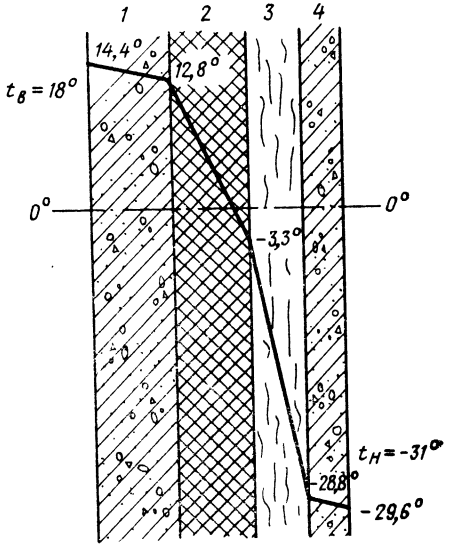


Рис. 13. Изменение температуры (в °С) в наружной стеновой панели

1 — внутренний фактурный слой; *2*—фибролит; *3* — минераловатные плиты; *4*—наружный фактурный слой

Для повышения температуры внутренней поверхности ограждения можно увеличивать значение R_0 или уменьшать значение $R_в$. Величина $R_в$ зависит от скорости движения воздуха около поверхности ограждения, уменьшаясь с увеличением этой скорости.

Поэтому расположение в нижней части наружных стен отопительных приборов (горячих труб) повышает температуру внутренней поверхности стены. Установка вентиляторов в витринах магазинов для того, чтобы стекла не замерзали или не отпотевали, основана также на значительном уменьшении величины $R_в$ из-за усиленного движения воздуха.

Расстановка мебели непосредственно около наружных стен затрудняет циркуляцию воздуха около их внутренних поверхно-

Так как прилегающий к плоскости *5* слой имеет толщину $\frac{\Delta x}{2}$ (см. рис. 77), то

$$\Delta\omega_5 = \frac{\Delta P_5}{350}\ \%.$$

Расчет изменения влажности в плоскостях *4* и *5* располагаем во вспомогательной расчетной таблице.

Вспомогательная расчетная таблица

Z, сутки	ΔZ	G_{3-4}	G_{4-5}	P_{4-5}	$P_и$	Плоскость *4*		Плоскость *5*	
						ΔP_4	$\Delta\omega_4$	ΔP_5	$\Delta\omega_5$
26	1	111	218	3	407	—110	—0,16	—185	—0,53
27	1	112	216	9	312	—113	—0,16	—87	—0,25
28	2	224	426	24	503	—226	—0,32	—53	—0,15
30	2	224	414	27	455	—217	—0,31	—14	—0,04
32	3	336	600	44	648	—308	—0,44	—4	—0,01
35	3	339	571	43	630	—275	—0,39	—16	—0,05
38	5	565	912	75	990	—422	—0,6	—3	—0,01
43	5	560	860	77	960	—377	—0,54	—23	—0,06
48	5	558	800	81	888	—323	—0,46	—7	—0,02
53	5	546	742	84	828	—280	—0,4	—2	—0,01
58	5	539	703	87	792	—251	—0,36	—2	—0,01
63	5	528	668	89	762	—229	—0,33	—5	—0,01
68	5	513	638	90	732	—215	—0,31	—4	—0,01
73	5	503	607	92	702	—196	—0,28	—3	—0,01
78	5	495	580	93	678	—178	—0,25	—5	—0,01
83	5	484	555	95	654	—166	—0,24	—4	—0,01
88	5	474	530	96	630	—152	—0,22	—4	—0,01
93									

Для получения плавного изменения влажности в плоскости *5* с момента окончания периода постоянной скорости сушки вначале берем интервалы времени ΔZ по 1 суткам и постепенно переходим к $\Delta Z=5$ суткам. В связи с этим при вычислении величин G и P во вспомогательной таблице уменьшаем их для этих интервалов времени соответственно уменьшению ΔZ против $\Delta Z=5$ суток.

Результаты расчета изображены графически на рис. 79. Кривые, приведенные на этом рисунке, соответствуют распределению влажности бетона в стене через каждый месяц от начала высыхания стены. Рис. 79 и расчетная таблица показывают, что процесс сушки стены протекает медленно.

Средние влажности бетона через каждый месяц от начала сушки стены получились следующими:

через 1 месяц $\omega_{ср}=21\%$, удалено влаги за месяц 25—21=4%;

через 2 месяца $\omega_{ср}=19{,}2\%$, удалено влаги за месяц 21—19,2=1,8%;

через 3 месяца $\omega_{ср}=17{,}8\%$, удалено влаги за месяц 19,2—17,8=1,4%.

Эти данные указывают на замедление процесса сушки стены. Наиболее интенсивно сушка шла в первые 25 дней, т. е. в период постоянной скорости сушки. В середине стены (в плоскости *О*) снижение влажности бетона начинается только через месяц от начала сушки, а за 3 месяца снижение влажности в этой плоскости равно только 1%.

Все это указывает на то, что к началу осеннего периода, а также в зимний период влажность бетона в стене будет высокой.

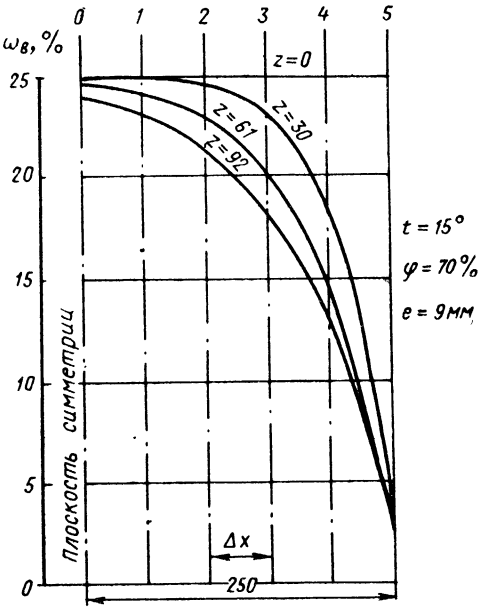


Рис. 79. Изменение влажности бетонной стены в течение летнего периода

3. РАСЧЕТ СОВМЕСТНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЛАГИ В ЖИДКОЙ И В ПАРООБРАЗНОЙ ФАЗАХ

При влажности материала выше предела сорбционного увлажнения и отсутствии изменения температуры по толщине слоя, т. е. при $\frac{dt}{dx} = 0$, влага в материале может перемещаться только в жидкой фазе. При градиенте температуры в материале к капиллярному перемещению влаги присоединяется перемещение ее в парообразной фазе вследствие градиента максимальных упругостей водяного пара $\frac{dE}{dx}$. В этом случае при постоянстве температуры во времени изменение влажности материала в каком-либо слое вследствие диффузии водяного пара будет постоянным $\Delta\omega_n'$ и определяется на основании следующих соображений. Количество пара, притекающего к плоскости n от плоскости $n-1$, будет:

$$P_1 = \frac{E_{n-1} - E_n}{\Delta x} \mu \Delta Z.$$

Количество пара, уходящего от плоскости n к плоскости $n+1$, будет:

$$P_2 = \frac{E_n - E_{n+1}}{\Delta x} \mu \Delta Z.$$

Разность этих количеств пара, идущая на изменение влажности материала в n-м слое, будет:

$$P_1 - P_2 = \mu \frac{\Delta Z}{\Delta x} (E_{n-1} + E_{n+1} - 2E_n).$$

Вес. слоя при толщине его Δx будет: $P_\Delta = 1000 \Delta x \gamma$ ($г/м^2$), а изменение его влажности за интервал времени ΔZ

стей, а также уменьшает излучение тепла на загороженные мебелью части стен, что является причиной понижения температуры на поверхности стены. Это в свою очередь вызывает появление сырости и плесени на стенах.

Источники интенсивного теплового излучения, облучающие внутреннюю поверхность ограждения, также повышают температуру этой поверхности. При значительной интенсивности этого

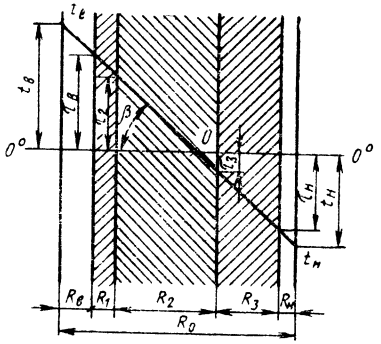


Рис. 14. Графический метод расчета температуры в ограждении

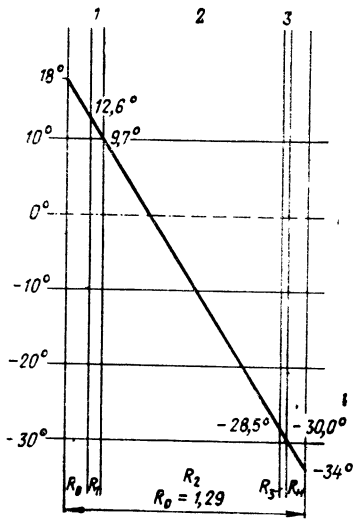


Рис. 15. Графический расчет распределения температуры (в °С) в чердачном перекрытии

1 — железобетонная плита; *2* — керамзитовая засыпка; *3* — известково-песчаная стяжка

излучения величина $\tau_в$ может оказаться даже выше температуры внутреннего воздуха. Расчет температуры внутренней поверхности ограждения с учетом излучения изложен ниже.

При многослойных ограждениях бывает удобно для определения температуры в ограждении пользоваться графическим методом. Метод заключается в следующем. По горизонтальной оси, соответствующей нулевой температуре, откладывают последовательно в некотором масштабе все термические сопротивления, начиная с $R_в$ и кончая $R_н$, так что сумма всех отрезков дает в том же масштабе величину сопротивления теплопередаче R_0 (рис. 14). Через полученные точки проводят вертикальные линии и на крайних вертикалях откладывают с одной стороны (у отрезка, соответствующего $R_в$) в некотором масштабе отрезок, соответствующий температуре внутреннего воздуха $t_в$, а с другой стороны (у отрезка, соответствующего $R_н$) в том же масштабе отрезок, соответствующий наружной температуре $t_н$.

Положительные температуры откладывают вверх от горизонтальной оси, а отрицательные — вниз. Полученные точки $t_в$ и $t_в$ соединяют прямой линией. Точки пересечения этой прямой с со-

$$\Delta\omega'_n = \frac{P_1 - P_2}{P_\Delta} 100 = 0{,}1 \frac{\mu\Delta Z}{\Delta x^2 \gamma} (E_{n-1} + E_{n+1} - 2E_n), \quad (109)$$

где $\Delta\omega'_n$ — дополнительное изменение влажности материала в слое вследствие диффузии водяного пара в %.

Формула (109) показывает, что изменение влажности слоя остается постоянным для каждого интервала времени, равного ΔZ, так как при постоянстве температуры во времени постоянными будут и значения максимальных упругостей водяного пара E, входящие в формулу (109). Величина $\Delta\omega'_n$ является постоянной поправкой к величине $\Delta\omega_n$, определяемой по формуле (105), для перемещения влаги в ограждении в жидкой фазе. Формулой (109) приходится пользоваться дополнительно к формуле (105) при температурном перепаде в ограждении.

Более общим будет случай, когда при температурном градиенте в ограждении в какой-либо из плоскостей (в плоскости n) в результате конденсации влаги влажность материала ω_n окажется выше предела сорбционного увлажнения. В этом случае между плоскостями n—1 и n+1, находящимися на расстоянии $2\Delta x$, будет перемещение влаги в парообразной и в жидкой фазе. В этом случае для определения изменения влажности материала в плоскости n за интервал времени ΔZ предварительно находим:

1) количество парообразной влаги, притекающей от плоскости n—1 к плоскости n:

$$P_1 = \frac{e_{n-1} - E_n}{\Delta x} \mu\Delta Z,$$

где e_{n-1} — упругость водяного пара в плоскости n—1; E_n — максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре в плоскости n;

2) количество парообразной влаги, уходящей от плоскости n к плоскости n+1:

$$P_2 = \frac{E_n - e_{n+1}}{\Delta x} \mu\Delta Z;$$

3) количество жидкой влаги, перемещающейся от плоскости n к плоскости n—1:

$$G_1 = \frac{\omega_n - \omega_{n-1}}{\Delta x} \beta\Delta Z,$$

где β — коэффициент влагопроводности материала в $г/м \cdot ч$ %.

Величина β берется соответствующей средней влажности материала между плоскостями n и n—1, т. е. $\frac{\omega_n + \omega_{n-1}}{2}$ с поправкой по формуле (102) на температуру, соответствующую средней между плоскостями n и n—1, т. е. $\frac{\tau_n + \tau_{n-1}}{2}$;

ответствующими вертикальными линиями дают границы отрезков, выражающих величины температур на границах слоев ограждения.

Графический метод основан на следующем. Количество тепла, проходящего через любой n-й слой ограждения, выражается формулой

$$Q = \frac{\tau_n - \tau_{n+1}}{R_n} = \operatorname{tg}\beta.$$

Так как тепловой поток, проходящий через ограждение, одинаков по величине в любом слое ограждения, отношение, стоящее в правой части полученного равенства, будет постоянным для любого слоя. Это отношение (см. рис. 14) представляет собой тангенс угла наклона температурной линии к горизонтали (угол β). Следовательно, в построении, показанном на рис. 14, уклон температурной линии должен быть одинаков в любой точке. При переносе температурной линии на чертеж конструкции уклон уже не будет одинаковым, так как горизонтальные размеры будут выражаться здесь не в масштабе термических сопротивлений слоев, а в масштабе их толщин. Здесь температурная линия будет представлять ломаную линию, наклон которой будет большим в слоях с материалом, имеющим меньшее значение λ, и наоборот.

На рис. 15 приведен графический расчет распределения температуры в чердачном перекрытии, рассмотренном в примере 6 при $t_в = 18°$ С и $t_н = -34°$ С.

Если в ограждении нарушена однородность материала в направлении, параллельном и перпендикулярном потоку тепла, то точное построение линии падения температуры в ней невозможно вследствие того, что в одной и той же плоскости стены температура оказывается не постоянной, а будет изменяться в различных ее точках. Поэтому при построении температурной линии в стене в этом случае ограничиваются вычислением некоторых средних температур на границах отдельных слоев стены по термическим сопротивлениям, полученным разрезкой ее плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока.

3. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИЗЛУЧЕНИИ

При определении температуры внутренней поверхности ограждения по формуле (27) величина ее получается всегда меньше температуры внутреннего воздуха. Это является следствием того, что при вычислении величины $R_в$, входящей в формулу (27), температура поверхностей, излучающих тепло, принимается равной температуре внутреннего воздуха. Если против внутренней поверхности ограждения находится поверхность, температура которой значительно выше температуры внутреннего воздуха,

4) количество жидкой влаги, перемещающейся от плоскости n к плоскости $n+1$:

$$G_2 = \frac{\omega_n - \omega_{n+1}}{\Delta x} \beta \Delta Z,$$

где β берется соответствующей влажности $\frac{\omega_n + \omega_{n+1}}{2}$ с поправкой на температуру $\frac{\tau_n + \tau_{n+1}}{2}$.

Из условия баланса влаги изменение влагосодержания n-го слоя ограждения за время ΔZ

$$\Delta P_n = P_1 - P_2 - G_1 - G_2.$$

Вес n-го слоя равен: $1000 \Delta x \gamma$ $г/м^2$, а изменение влажности материала в нем (плоскости n) за интервал времени ΔZ

$$\Delta \omega_n = \frac{\Delta P_n 100}{1000 \Delta x \gamma} = 0{,}1 \frac{\Delta P_n}{\Delta x \gamma}. \qquad (110)$$

В соседней плоскости $n-1$ изменение влажности материала определяется аналогично изложенному. При этом количество парообразной влаги, притекающей к ней от плоскости $n-2$,

$$P_0 = \frac{e_{n-2} - e_{n-1}}{\Delta x} \mu \Delta Z.$$

Изменение влагосодержания $(n-1)$-го слоя за время ΔZ будет: $\Delta P_{n-1} = P_0 - P_1 + G_1$, а изменение влажности материала в плоскости $n-1$ определяется по формуле (110).

Таким же образом определяется и изменение влажности материала в плоскости $n+1$.

Упругости водяного пара в плоскостях $n-1$ и $n+1$ (e_{n-1} и e_{n+1}) определяются при этом по значениям влажностей материала в этих плоскостях (ω_{n-1} и ω_{n+1}). Для этого по изотерме сорбции материала находим соответствующие этим влажностям относительные упругости водяного пара φ, а по ним и по максимальной упругости водяного пара, соответствующей температурам этих плоскостей, по формуле (83) определяем искомые упругости водяного пара в плоскостях $n-1$ и $n+1$. Эти упругости необходимы также для расчета изменения упругости водяного пара в плоскостях $n-2$ и $n+2$ по формуле (93) для перемещения влаги только в парообразной фазе.

При образовании конденсата в бесчердачных покрытиях в плоскости под кровельным ковром к перемещению влаги в парообразной фазе присоединяется перемещение влаги в жидкой фазе от этой плоскости вниз. Расчет изменения влажности материала в плоскости образования конденсата, а также в соседней с ней плоскости делается в этом случае аналогично изложенному выше. При этом количество водяного пара, уходящего че-

то температура поверхности ограждения может оказаться выше температуры воздуха в помещении в результате излучения тепла нагретой поверхностью. Это часто наблюдается в промышленных зданиях, имеющих агрегаты, выделяющие в помещение значительное количество лучистого тепла (печи, сушильные барабаны и т. д.). В качестве примера можно привести случай интенсивного нагрева деревянного свода-оболочки над стеклоплавильной печью одного из стекольных заводов БССР. Температура наружной поверхности свода стеклоплавильной печи была

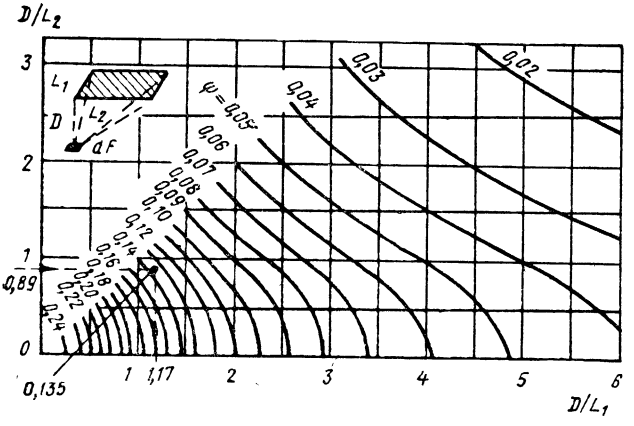


Рис. 16. Номограмма для определения углового коэффициента излучения ψ

около 250—300° С. В результате интенсивного излучения тепла этой поверхностью на внутренней поверхности свода-оболочки даже в зимнее время температура достигала 80° С. Такая высокая температура поверхности деревянного покрытия привела к чрезмерному высыханию дерева и была опасна в пожарном отношении. Если бы при проектировании свода-оболочки над печью была учтена температура его поверхности, то, вероятно, пришлось бы отказаться от применения дерева в такой конструкции или принять меры для понижения температуры свода печи путем нанесения на него тепловой изоляции [1].

Определение температуры внутренней поверхности ограждения с учетом теплового излучения позволяет принять следующие меры:

1) если применяются сгораемые ограждения и температура их поверхности может быть высокой, устраивается защита их от возгорания или производится замена несгораемыми конструкциями;

2) величина сопротивления теплопередаче ограждения R_0 при высокой температуре внутренней поверхности может быть значительно снижена.

[1] В настоящее время своды-оболочки, эксплуатируемые в таких условиях, обычно выполняются из железобетона.

рез кровлю, становится постоянным для каждого интервала времени ΔZ, так как упругость водяного пара под кровлей остается постоянной, равной максимальной соответствующей температуре в этой плоскости. Расчет этот приведен в примере 51.

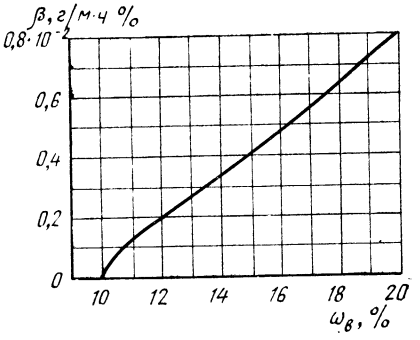


Рис. 80. Коэффициент влагопроводности бетона с объемным весом 810 *кг/м*³ в зависимости от его влажности

Пример 51. Продолжить расчет увлажнения армопенобетонного покрытия, рассмотренного в примере 46, с момента образования в нем конденсата.

График зависимости β от ω для пенобетона при температуре 15° С, построенный по данным приложения 5, приведен на рис. 80. Расчет приведен в расчетной таблице, являющейся продолжением расчетной таблицы примера 46, начиная с $Z=49$ суток.

При $Z=54$ в плоскости *5* получается $\varphi=100\%$ и далее в этой плоскости начинается образование конденсата. С этого момента для определения влажности пенобетона в плоскостях *4* и *5* вычисляем следующие количества влаги, перемещающейся за интервал времени $\Delta Z=120$ *ч*:

1) парообразной от плоскости *3* к плоскости *4*:

$$P_{3-4}=\frac{e_3-e_4}{\Delta x}\mu\Delta Z=\frac{e_3-e_4}{0{,}024}0{,}025\cdot 120=125\,(e_3-e_4);$$

2) парообразной от плоскости *4* к плоскости *5*:

$$P_{4-5}=125\,(e_4-3{,}2);$$

3) парообразной от плоскости *5* к наружному воздуху:

$$P_{\text{и}}=\frac{E_5-e_{\text{н}}}{R_{\text{н.п}}}\Delta Z=\frac{3{,}2-1{,}9}{18{,}6}120=8\ г/м^2;$$

4) жидкой от плоскости *5* к плоскости *4*: средняя температура этих плоскостей равна: $\frac{-0{,}8-4{,}3}{2}=-2{,}6°$, при которой по примеру 49 замерзания влаги в пенобетоне не будет. Поправка к величине β при этой температуре по формуле (102а):

$$\frac{1-0{,}04\cdot 2{,}6}{1{,}6}=0{,}56;$$

$$G_{5-4}=\frac{\omega_5-\omega_4}{\Delta x}0{,}56\beta\Delta Z=\frac{\omega_5-\omega_4}{0{,}024}0{,}56\cdot 120\beta=2800\beta\,(\omega_5-\omega_4)\cdot$$

Величина β определяется по графику рис. 80 соответственно средней влажности пенобетона, равной: $\frac{\omega_4+\omega_5}{2}$, следовательно, перемещение жидкой влаги начнется при этой влажности, когда она будет больше 10%.

Для двух произвольно расположенных поверхностей, имеющих конечные размеры, количество тепла Q, передаваемого излучением от одной поверхности к другой в течение 1 *ч*, определяется по формулам (7) и (7а). Расчет теплообмена излучением по этим формулам сводится к определению величин коэффициентов углового излучения ψ. Там же было дано описание графического способа определения величины ψ.

Задача определения величины углового коэффициента излучения значительно упрощается, если телесный угол, под которым элемент dF «видит» излучающую поверхность, в пересечении с поверхностью, параллельной элементу dF, образует фигуру, состоящую из прямоугольников. В этом случае величина углового коэффициента излучения легко определяется по номограмме (рис. 16), заимствованной из [19]. Номограмма дает величины ψ для излучения между элементом поверхности dF и параллельным ему прямоугольником, через одну из вершин которого проходит нормаль к поверхности элемента dF. По осям номограммы отложены отношения расстояния элемента dF от поверхности прямоугольника к его сторонам D/L_1 и D/L_2. Ряд кривых дает соответствующие величины ψ. По номограмме можно определить величины ψ для любого расположения прямоугольника по отношению к элементу dF, если пересечение телесного угла, под которым элемент dF видит этот прямоугольник, с плоскостью, параллельной ему, образует также прямоугольник. В этом случае полученным прямоугольником можно заменить излучающую поверхность и разбить его на отдельные прямоугольники таким образом, чтобы через одну из их вершин проходила нормаль к элементу dF. Иногда для этого приходится вводить дополнительные прямоугольники. Пример пользования номограммой рис. 16 приведен в примере 13. Применяя описанный метод к вычислению температуры внутренней поверхности ограждения, для облегчения расчетов делаем следующие допущения.

1. Так как большинство строительных материалов имеет достаточно высокие коэффициенты излучения (около 90% излучения абсолютно черного тела), можно пренебречь отражением ими лучистого тепла и рассматривать только первичное поглощение тепла каждой поверхностью.

2. Кроме излучения между поверхностью ограждения и поверхностью теплового агрегата существует также излучение между поверхностью ограждения и внутренними поверхностями других ограждений данного помещения. Для упрощения расчетов принимаем температуры этих поверхностей равными температуре воздуха в помещении.

На основании изложенного температуру внутренней поверхности наружного ограждения определяем из условия теплового баланса данного участка ограждения, относя все расчеты к эле-

Расчетная таблица

Плоскости		0	1	2	3	4	5
Температуры	τ	13,3	9,8	6,3	2,7	−0,8	−4,3
	E	11,45	9,09	7,16	5,57	4,3	3,2
Z=49	e	9,15	7,53	6,01	4,7	3,71	3,1ъ
	φ	80	83	84	84,5	86,5	99
	ξ_0	—	196	207	211	238	430
Z=54	e	9,16	7,56	6,06	4,76	3,76	3,2
	φ	—	83,5	84,5	85,5	87,5	100
	ξ_0	—	202	211	225	ω=7%	ω=11,5%
Z=59	e	9,17	7,59	6,11	4,81	ω=7,3	12,17
	φ	—	83,5	85,5	86,5	88,5	
	ξ_0	—	202	225	238	e=3,8	
Z=64	e	9,17	7,62	6,15	4,86	ω=7,57	12,89
	φ	—	84	86	87,5	89,5	
	ξ_0	—	207	231	250	e=3,85	
Z=69	e	9,18	7,64	6,19	4,9	ω=7,84	13,52
	φ	—	84	86,5	88	90,5	
	ξ_0	—	207	238	258	e=3,9	
Z=74	e	9,18	7,67	6,22	4,94	ω=8,13	14,2
	φ	—	84,5	87	88,5	91	
	ξ_0	—	211	244	266	e=3,92	
Z=79	e	9,18	7,69	6,25	4,98	ω=8,46	14,82
	φ	—	85	87,5	89,5	92	
	ξ_0	—	220	250	280	e=3,96	
Z=84	e	9,19	7,7	6,28	5,01	ω=8,8	15,43
	φ	—	85	87,5	90	93	
	ξ_0	—	220	250	286	e=4	
Z=89	e	9,19	7,72	6,31	5,04	ω=9,15	16
	φ	—	85	88	90,5	94	
	ξ_0	—	220	258	292	e=4,04	
Z=94	e	9,19	7,74	6,34	5,07	ω=9,51	16,55
	φ	80,5	85,5	88,5	91	—	
	$\omega_в$	5,4	6,5	7,3	8,5	9,5	16,55

Изменения влажности пенобетона в плоскостях *4* и *5* через интервал времени $\Delta Z = 120\ r$ будут:

плоскость *4* — изменение влагосодержания слоя *4*:

$\Delta P_4 = P_{3-4} - P_{4-5} + G_{5-4}$. Вес слоя $\Delta x\gamma = 0{,}024 \cdot 775 = 18{,}6\ кгс/м^2$.

Изменение влажности по формуле (110):

$$\Delta\omega_4 = 0{,}1\,\frac{\Delta P_4}{18{,}6} = \frac{\Delta P_4}{186}\,.$$

Плоскость *5* — $\Delta P_5 = P_{4-5} - P_и - G_{5-4}$. Так как толщина слоя *5* равна $0{,}5\,\Delta x$, то $\Delta\omega_5 = \dfrac{\Delta P_5}{93}$.

Определения величин ΔP_4 и ΔP_5 даны во вспомогательной таблице

менту dF поверхности ограждения, т. е. $T_x = \tau_в + 273$, где $\tau_в$ — температура внутренней поверхности в *град*.

Количество тепла, получаемого излучением внутренней поверхности ограждения от поверхностей агрегата, по формуле (7 а) будет:

$$Q_1 = \frac{C_1 C_2}{C_0}\left[\left(\frac{T_а}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_x}{100}\right)^4\right]\psi dF, \qquad (а)$$

где $T_а$ — абсолютная температура поверхности агрегата в °К; ψ — угловой коэффициент излучения элемента поверхности ограждения и агрегата.

Количество тепла, получаемого поверхностью ограждения излучением от других поверхностей данного помещения, по формуле (7 а) будет:

$$Q_2 = \frac{C_1 C_3}{C_0}\left[\left(\frac{T_в}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_x}{100}\right)^4\right](1 - \psi)\, dF, \qquad (б)$$

где $T_в = t_в + 273°$ — температура поверхностей помещения в °К, принятая равной абсолютной температуре внутреннего воздуха; $(1-\psi)$ — угловой коэффициент излучения элемента поверхности ограждения и поверхностей помещения[1]; C_3 — коэффициент излучения поверхностей помещения.

Количество тепла, получаемого поверхностью ограждения конвекцией от внутреннего воздуха, будет:

$$Q_3 = (T_в - T_x)\,\alpha_к\, dF, \qquad (в)$$

где $\alpha_к$ — коэффициент передачи тепла конвекцией, определяемой по формуле (19).

Количество тепла, получаемого (отдаваемого) внутренней поверхностью ограждения от наружного воздуха, будет:

$$Q_4 = \frac{T_н - T_x}{R + R_н}\, dF \text{ или } Q_4 = (T_н - T_x)\, k'\, dF, \qquad (г)$$

где $T_н = t_н + 273$ — температура наружного воздуха в °К;

$k' = \dfrac{1}{R + R_н}$ — коэффициент передачи тепла от внутренней поверхности ограждения к наружному воздуху.

Из условия теплового баланса сумма этих количеств тепла должна быть равна нулю, т. е. $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$.

Подставляя значения Q из уравнений (а), (б), (в) и (г) и сокращая на dF, получим:

$$\frac{C_1 C_2}{C_0}\left[\left(\frac{T_а}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_x}{100}\right)^4\right]\psi + \frac{C_1 C_3}{C_0}\left[\left(\frac{T_в}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_x}{100}\right)^4\right](1 - \psi) + (T_в - T_x)\,\alpha_к + (T_н - T_x)\,k' = 0;$$

[1] При отсутствии теплового агрегата этот коэффициент был бы равен единице.

Вспомогательная таблица

Z, сутки	P_{3-4}	P_{4-5}	$\frac{\omega_4+\omega_5}{2}$	$\beta \cdot 10^2$	G_{5-4}	Плоскость 4		Плоскость 5	
						ΔP_4	$\Delta \omega_4$	ΔP_5	$\Delta \omega_5$
54	125	70	9,2	0	0	55	0,3	62	0,67
59	126	75	9,8	0	0	51	0,27	67	0,72
64	126	81	10,2	0,03	5	50	0,27	68	0,73
69	125	87	10,7	0,1	16	54	0,29	63	0,68
74	127	90	11,2	0,14	24	61	0,33	58	0,62
79	128	95	11,6	0,17	30	63	0,34	57	0,61
84	126	100	12,1	0,21	39	65	0,35	53	0,57
89	125	105	12,6	0,24	46	66	0,36	51	0,55

В последних двух графах расчетной таблицы (плоскости *4* и *5*) с момента образования конденсата, т. е. с $Z=54$, записываются влажности пенобетона, кроме того, в плоскости *4* под величинами ω_4 подписываются соответствующие им значения φ, определяемые по изотерме сорбции и определенные по ним значения упругости водяного пара e_4.

Расчет показывает, что к концу зимнего периода средняя влажность пенобетона в покрытии повысилась до 8,55%, т. е. на 4,7% против его начальной влажности. Под кровельным ковром влажность пенобетона достигла 16,55% вследствие конденсации влаги в покрытии.

Из вспомогательной таблицы наглядно виден характер перемещения влаги в жидкой фазе от плоскости *5* к плоскости *4*. Количество этой влаги G_{5-4} возрастает по мере увеличения разности влажностей пенобетона между плоскостями *5* и *4*, а также в результате повышения коэффициента влагопроводности β с повышением влажности и достигает 46 $г/м^2$ за 5 суток. Также возрастает и количество парообразной влаги P_{4-5} вследствие повышения упругости водяного пара в плоскости *4* при постоянном значении упругости в плоскости *5*, соответствующем максимальной упругости при температуре —4,3° С.

У внутренней поверхности покрытия (в плоскости 0) влажность пенобетона за последние 45 суток (с $Z=49$ до $Z=94$) повысилась только на 0,1%, за это же время под кровельным ковром влажность пенобетона повысилась на 5,55%.

Приведенный в примере 51 расчет влажностного режима армопенобетонного покрытия может быть продолжен для весеннего периода. При этом переход от зимнего периода к весеннему делается следующим образом. В связи с повышением температуры наружного воздуха пересчитываются температуры в расчетных плоскостях покрытия и принимаются соответствующие им величины E. Начальные влажности материала в плоскостях и относительные упругости водяного пара φ в них берутся равными конечным зимнего периода. По значениям E и φ вычисляются начальные упругости водяного пара в плоскостях. В связи с изменением величин E несколько изменяются расчетные формулы и величина $\Delta Z_{макс}$. В остальном расчет остается таким же, как и для зимнего периода.

Таким же образом можно перейти к расчету влажностного режима покрытия в летний период. В этот период будет происходить удаление влаги из покрытия, т. е. его просыхание. Прочитав таким образом целый годовой цикл, можно проследить характер изменения влажности пенобетона в покрытии в течение

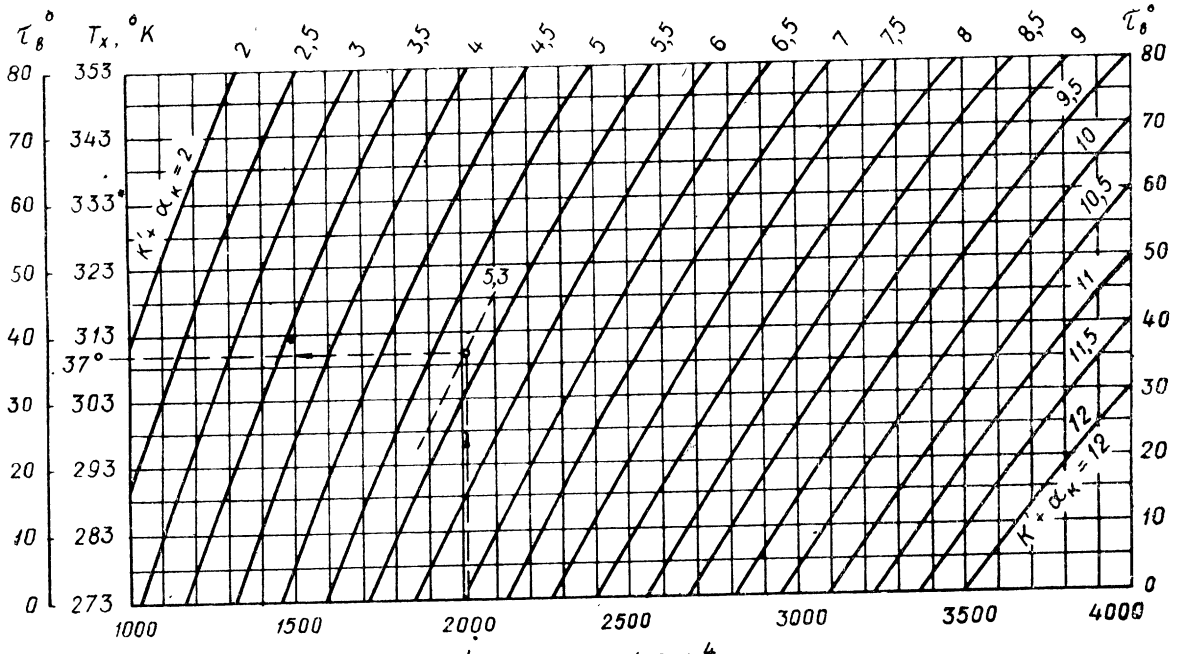


Рис. 17. Номограмма автора для расчета температуры поверхности ограждения с учетом излучения

всего года. Если к концу осеннего периода средняя влажность пенобетона в покрытии окажется выше его начальной влажности, принятой для зимнего периода, то в следующем году влажностный режим покрытия будет хуже, чем в первый год. В этом случае для выявления стабильного годового режима покрытия придется провести расчет еще одного годового цикла, чтобы получить к концу осеннего периода влажность, равную влажности пенобетона в начале зимнего периода.

Изложенный метод расчета является универсальным и дает возможность рассчитывать влажностный режим любого ограждения и при любых условиях внутреннего и наружного воздуха.

Расчет многослойных ограждений несколько сложнее и более трудоемок. В слоистом ограждении конденсат образуется обычно в плоскости соприкосновения двух материалов (см. пример 44). При этом для расчета влажностного режима таких ограждений в нестационарных условиях необходимо знать, как распределяется конденсационная влага между соприкасающимися материалами.

В пределах сорбционного увлажнения влажность материалов в плоскости их соприкосновения определяется по изотерме сорбции по величине относительной упругости водяного пара, одинаковой для обоих материалов. Сверхсорбционную влажность можно определять по величине потенциала влажности, предложенного проф. В. Н. Богословским.

Потенциалом влажности является общий для всех фаз влаги в материале показатель его влажностного состояния. В основу его определения положен следующий постулат, подтвержденный опытами. Если два влажных тела из разных материалов находятся во влажностном равновесии с третьим влажным телом из другого материала, то они находятся во влажностном равновесии друг с другом. Потенциал влажности можно измерить равновесной влажностью с одним из материалов, принятым за эталонный. В качестве эталонного материала принята фильтровальная бумага. За эталонную температуру принимается температура $+20°$ С. Потенциал влажности θ измеряется в градусах влажности °В. Шкала потенциала влажности равномерная и построена по двум следующим точкам. Для сухой фильтровальной бумаги $\theta = 0°$ В; при максимальной сорбционной влажности ее $\theta = 100°$ В. Изменение потенциала влажности на 1° соответствует изменению влажности фильтровальной бумаги на $^1/_{100}$ ее максимальной сорбционной влажности при температуре $+20°$ С. При максимальной сорбционной влажности все материалы имеют величину $\theta = 100°$ В.

Для определения потенциала влажности строительного материала при заданной влажности его приводят в соприкосновение с фильтровальной бумагой в условиях отсутствия влагообмена с окружающей средой. После установления влажностного равновесия определяют влажности материала и фильтровальной

после соответствующих преобразований получим уравнение для вычисления T_x:

$$\left[\frac{C_1C_2}{C_0}\psi+\frac{C_1C_3}{C_0}(1-\psi)\right]\left(\frac{T_x}{100}\right)^4+(k'+\alpha_к)T_x=$$

$$=\psi\frac{C_1C_2}{C_0}\left(\frac{T_а}{100}\right)^4+\frac{C_1C_3}{C_0}(1-\psi)\left(\frac{T_в}{100}\right)^4+\alpha_к T_в+k'T_н. \quad (29)$$

Уравнение (29) можно несколько упростить, если предположить коэффициенты излучения $C_1=C_2=C_3=4{,}45$, тогда

$$\frac{C_1C_2}{C_0}=\frac{C_1C_3}{C_0}=\frac{4{,}45\cdot4{,}45}{4{,}96}=4$$

и уравнение (29) примет вид:

$$4\left(\frac{T_x}{100}\right)^4+(k'+\alpha_к)T_x=4\psi\left(\frac{T_а}{100}\right)^4+$$

$$+4(1-\psi)\left(\frac{T_в}{100}\right)^4+\alpha_к T_в+k'T_н.$$

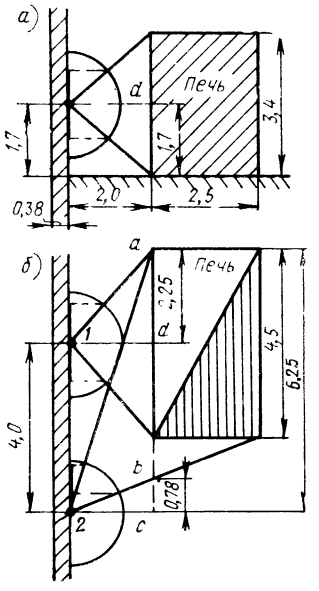


Рис. 18. Излучение от печи на поверхность наружной стены

а — вертикальный разрез; *б* — план

Величина $\alpha_к$, входящая в уравнения (29) и (29а), зависит от разности температур $\Delta T=T_в-T_x$ и определяется по формуле (19). Так как в начале расчета эта разность бывает неизвестна, то величину $\alpha_к$ берут ориентировочно, а после определения значения T_x проверяют правильность выбранной величины $\alpha_к$.

Уравнение (29а) является уравнением 4-й степени относительно неизвестной величины T_x. Для решения этого уравнения на рис. 17 дана номограмма. По горизонтальной оси номограммы отложены значения выражения, стоящего в правой части уравнения (29а), а по вертикальной — значения искомой температуры T_x и соответственно $\tau_в$. Ряд кривых, нанесенных на номограмме, соответствует различным значениям величин $k'+\alpha_к$. Пользование номограммой ясно из рис. 17, а также приведено в следующем числовом примере.

Пример 13. В цехе напротив наружной кирпичной стены толщиной в $^1/_2$ кирпича расположена печь для термической обработки металлических изделий. Размеры печи и ее расположение по отношению к стене показаны на рис. 18. Поверхность печи имеет температуру $t_а=90°$ С. Температура воздуха в рабочей зоне цеха $t_в=22°$ С, температура наружного воздуха $t_н=-20°$ С. Определить температуру внутренней поверхности стены на высоте 1,7 *м* от пола: 1) против середины печи и 2) на расстоянии 4 *м* от первой точки.

Для стены в $1^1/_2$ кирпича имеем:

$$R + R_н = \frac{0{,}38}{0{,}7} + 0{,}05 = 0{,}59 \text{ и } k' = \frac{1}{0{,}59} = 1{,}7 \; ккал/м^2 \cdot ч \cdot град;$$

для $t_а = 90°$ С:

$$T_а = 90 + 273 = 363° K; \quad \left(\frac{T_а}{100}\right)^4 = \left(\frac{90+273}{100}\right)^4 = 173{,}6;$$

для $t_в = 22°$ С:

$$T_в = 22 + 273 = 295° K; \quad \left(\frac{T_в}{100}\right)^4 = \left(\frac{22+273}{100}\right)^4 = 75{,}7;$$

$$T_н = 273 - 20 = 253° К.$$

Точка *1*. Примем ориентировочно величину $\alpha_к = 3{,}6$.

Для определения углового коэффициента излучения ψ проводим через точку *1* нормаль к поверхности стены (рис. 18), которая пересекается с поверхностью печи в точке *d*, являющейся центром этой поверхности. Вертикальной и горизонтальной линиями, проходящими через эту точку, разбиваем поверхность печи на четыре равных прямоугольника размером 2,25×1,7 *м*, причем нормаль проходит через их общую вершину. Вычисляем отношения:

$$\frac{D}{L_1} = \frac{2}{2{,}25} = 0{,}89 \text{ и } \frac{D}{L_2} = \frac{2}{1{,}7} = 1{,}17.$$

По номограмме рис. 16 находим для каждого прямоугольника $\psi = 0{,}135$, а для всей поверхности $\psi = 0{,}135 \cdot 4 = 0{,}54$.

По уравнению (29а) получим:

$$4\left(\frac{T_x}{100}\right)^4 + (1{,}7 + 3{,}6)\, T_x = 4 \cdot 0{,}54 \cdot 173{,}6 + 4\,(1 - 0{,}54)\, 75{,}7 + + 3{,}6 \cdot 295 + 1{,}7 \cdot 253,$$

откуда

$$4\left(\frac{T_x}{100}\right)^4 + 5{,}3T_x = 2006.$$

По номограмме рис. 17 на горизонтальной оси находим точку, соответствующую величине правой части уравнения, т. е. 2006; от этой точки двигаемся по вертикали до пересечения с кривой, соответствующей величине $k' + \alpha_к = 5{,}3$. Проводим из полученной точки пересечения горизонтальную линию, по которой на вертикальной оси номограммы находим непосредственно температуру внутренней поверхности стены $\tau_в = 37°$ С.

Следовательно, в точке *1* температура поверхности стены оказалась на 15° С выше температуры внутреннего воздуха. По формуле (19) при разности температур поверхность — воздух, равной 15° С, получим $\alpha_к = 1{,}43\sqrt[3]{15} = 3{,}53$, что расходится с принятой величиной $\alpha_к$ только на 2%.

Точка *2*. Ориентировочно примем $\alpha_к = 1{,}45$.

Для определения ψ продолжим поверхность печи до ее пересечения в точке *c* с нормалью к поверхности стены в точке *2*. Проведя через полученную точку *c* (рис. 18, *б*) на продолжении поверхности печи вертикальную и горизонтальную линии, получим два симметричных прямоугольника размером 6,25×1,7 *м*, через общую вершину которых проходит нормаль к поверхности стены. Определяем величину ψ_1 для прямоугольника со стороной *ac* и, вычитая из нее величину ψ_2 для прямоугольника со стороной *bc*, получим угловой коэффициент излучения прямоугольника со стороной *ab*, представляющего пересечение телесного угла, под которым точка *2* «видит» печь с условной

бумаги, по которым определяют величину θ в °В. Полученная величина θ и будет потенциалом влажности данного строительного материала при определенной его влажности. В табл. 27 приведены значения весовых влажностей некоторых строительных материалов, соответствующих определенным величинам потенциала влажности.

Таблица 27

Равновесные весовые влажности строительных материалов в % при температуре 20° С, соответствующие различным значениям потенциала влажности θ

Материал	Объемный вес в кг/м³	Влажность материалов при значениях θ в °В						
		100	200	300	400	500	600	800
Минераловатные маты .	80	2,6	2,7	3	3,2	5	13	38
Керамзитобетон	1260	11	17,2	22	25	27,2	29,2	33,2
Кирпич глиняный обыкновенный :	1700	0,5	5,7	11,5	13	—	—	—
Кирпич силикатный . .	1750	5,2	7,5	8,7	9,5	10,1	11,3	15,8
Пенобетон	700	7,5	38	—	—	—	—	—
Раствор сложный . . .	1490	1,5	2,15	2,7	3,2	3,75	4,4	10
Шлакобетон	1600	5,2	7	7,7	8,1	8,4	8,7	9,7

Табл. 27 показывает, что, например, влажности силикатного кирпича 9,5% (θ=400° В) соответствует равновесная влажность керамзитобетона 25%, а минераловатных матов 3,2%.

Следовательно, распределение влаги, образующейся в плоскости соприкосновения двух материалов, можно принимать, считая, что величины θ обоих материалов в этой плоскости одинаковы.

При образовании конденсата в плоскости соприкосновения слоев из различных материалов можно количество его распределять между материалами пропорционально их средним суточным скоростям капиллярного всасывания влаги, что и принято в примере 52 расчета многослойного ограждения.

Вопрос о скорости капиллярного всасывания влаги материалами изучался Р. Е. Брилингом, им были проведены опыты по определению скорости капиллярного всасывания для некоторых строительных материалов.

Для определения скорости капиллярного всасывания образец материала в виде призмы, изолированный с боков водо- и паронепроницаемой замазкой, приводят в соприкосновение с поверхностью воды. При этом вследствие капиллярных сил вода будет проникать в материал и увлажнять его. Скорость капиллярного всасывания определяется количеством воды в $см^3$, прошедшим через 1 $см^2$ сечения образца в течение 1 *мин*, и имеет размерность *см/мин*. Скорость капиллярного всасывания будет мак-

поверхностью *ab*, параллельной поверхности печи, т. е. этим мы учитываем влияние излучения на точку *2* и торцовой поверхности печи.

Для прямоугольника со стороной *ac*:

$$\frac{D}{L_1}=\frac{2}{6,25}=0,32;\ \frac{D}{L_2}=\frac{2}{1,7}=1,17.$$

По номограмме рис. 16 $\psi=0,159$, а для всей высоты печи $\psi_1=0,159\cdot 2=0,318$.

Для прямоугольника со стороной *bc*:

$$\frac{D}{L_1}=\frac{2}{0,78}=2,56;\ \frac{D}{L_2}=\frac{2}{1,7}=1,17.$$

По номограмме рис. 16 $\psi=0,069$, а для всей высоты печи $\psi_2=0,069\cdot 2=0,138$.

Полная величина ψ будет: $\psi=\psi_1-\psi_2=0,318-0,138=0,18$.

По уравнению (29а)

$$4\left(\frac{T_x}{100}\right)^4+(1,7+1,45)\,T_x=4\cdot 0,18\cdot 173,6+4\,(1-0,18)\,75,7+1,45\cdot 295+$$

$$+1,7\cdot 253=1231.$$

По номограмме рис. 17 при $k'+\alpha_к=3,15$ получим $\tau_в=23°$ С; $t_в-\tau_в=1°$ С; по формуле (19) получим $\alpha_к=1,43$, т. е. в расчете значение $\alpha_к=1,45$ выбрано верно.

В точке *2* влияние излучения от печи сказалось значительно в меньшей степени по сравнению с точкой *1*. При дальнейшем удалении от печи величина $\tau_в$ будет понижаться и влияние печи не будет сказываться вследствие приближения ψ к нулю.

При отсутствии излучения от печи температура внутренней поверхности стены по формуле (27) была бы:

$$\tau_в=22-\frac{22+20}{0,133+0,59}\,0,133+13,9°\text{ С}.$$

То же самое получим по уравнению (29а), если предположить $\psi=0$ и $\alpha_к=3,5$*:

$$4\left(\frac{T_x}{100}\right)^4+(1,7+3,5)\,T_x=4\cdot 75,7+3,5\cdot 295+1,7\cdot 253=1765.$$

По номограмме рис. 17 для $k'+\alpha_к=5,2$ и правой части уравнения (29а), равной 1765, получим $\tau_в=14°$ С.

Предлагаемый метод расчета температуры поверхности ограждения применим и для случая нескольких источников лучистой теплоты. При этом придется определить угловые коэффициенты излучения отдельно для каждого источника лучистого тепла и в правой части уравнения (29) добавить соответствующие члены, так же как и у множителя при $(T_x/100)^4$ в левой части этого уравнения. Множитель при $(T_в/100)^4$ в правой части уравнения придется при этом заменить выражением $(1-\Sigma\psi)$, где $\Sigma\psi$ — сумма угловых коэффициентов излучения каждого источника излучения. Этот способ расчета дает значительно более точные величины $\tau_в$, чем формула (27), поэтому в тех случаях,

* Принятое в нормах $R_в=0,133$ соответствует $\alpha_в=7,5$, при этом имеем $\alpha_л=4$ и $\alpha_к=3,5$ *ккал/м²·ч·град*.

симальной в начальный момент, а затем постепенно уменьшается, поэтому определяют среднюю скорость за какой-либо интервал времени, например за 1 сутки.

На величину скорости капиллярного всасывания большое влияние оказывает отношение материала к воде: гидрофильные материалы чрезвычайно активно всасывают воду; гидрофобные (олеофильные) материалы, наоборот, влагу не впитывают вследствие возникновения в них капиллярной депрессии. Начальная влажность материала также оказывает влияние на скорость всасывания им воды.

Показатели средней суточной скорости капиллярного всасывания воды для некоторых строительных материалов, полученные Р. Е. Брилингом, приведены в табл. 28. Данными этой таблицы можно пользоваться при расчетах влажностного режима слоистых ограждений для распределения конденсационной влаги между материалами по скорости их капиллярного всасывания.

Таблица 28

Скорости капиллярного всасывания строительных материалов

Материал	Объемный вес в *кг/м*³	Начальная влажность в %	Средняя суточная скорость всасывания в *см/мин*
Бутовый камень-известняк . .	1900	4,8	$0{,}56 \cdot 10^{-3}$
Гипс	1140	4,8	$5{,}8 \cdot 10^{-3}$
Кирпич глиняный	1650	3,2	$4{,}3 \cdot 10^{-3}$
Кирпич силикатный	1790	8,6	$1 \cdot 10^{-3}$
Пенобетон автоклавный . . .	840	6,8	$0{,}88 \cdot 10^{-3}$
Пеностекло	375	0,5	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$
Раствор сложный 1 : 1 : 9 . .	1680	2,5	$3{,}03 \cdot 10^{-3}$
Торфоплита	150	58	$0{,}18 \cdot 10^{-3}$
Фиброплита	380	82	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$
Шлакобетон	1385	19	$0{,}24 \cdot 10^{-3}$

Пример. 52. Рассчитать влажностный режим стены из легкого бетона, утепленной с внутренней стороны торфоплитами.

Конструкция стены схематически изображена на рис. 81.

Примем следующие температуры и влажности воздуха:

внутреннего — $t_в = 18°C$, $\varphi_в = 70\%$ и $e_в = 10{,}8$ *мм рт. ст*;

наружного — $t_н = -7°C$, $\varphi_н = 80\%$ и $e_н = 2$ *мм рт. ст.*

Показатели материалов будут следующие.

Торфоплиты. Объемный вес $\gamma = 200$ *кг/м*³. Коэффициент паропроницаемости $\mu_1 = 0{,}0256$ *г/м·ч·мм*. Изотерма сорбции приведена на рис. 82. Коэффициент влагопроводности в зависимости от влажности дан на рис. 76.

где требуется особенно точное определение величины $\tau_в$ (проверка на конденсат в зданиях, где появление его совершенно недопустимо), расчет ее нужно делать по уравнениям (29) или (29а).

4. ВОЗДУШНЫЕ ПРОСЛОЙКИ

Малый коэффициент теплопроводности воздуха в порах строительных материалов, достигающий 0,021 *ккал/м·ч·град*, привел к идее замены в наружных ограждающих конструкциях строительных материалов воздухом, т. е. созданию наружных ограждений из двух стенок с воздушной прослойкой между ними. Однако теплотехнические качества таких стен оказались чрезвычайно низкими. Чтобы исправить этот недостаток, воздушную прослойку пришлось заполнять древесной стружкой. Также неудачными оказались опыты применения бетонных пустотелых камней с большими пустотами (типа «Торонто») без засыпки. С другой стороны, применение в наружных ограждениях материалов с несколькими воздушными прослойками незначительной толщины (например, камни типа «Крестьянин», керамические многопустотные камни) заметно улучшает теплотехнические свойства таких стен по сравнению со сплошными стенами той же толщины. Все это говорит о том, что передача тепла воздушными прослойками происходит иначе, чем в телах твердых и сыпучих. Термическое сопротивление слоя, состоящего из твердого или сыпучего материала, прямо пропорционально его толщине, а следовательно, количество тепла, проходящего через слой, при постоянной разности температур на его поверхностях обратно пропорционально его толщине. Для воздушной прослойки такой пропорциональности не существует. В твердом материале передача тепла происходит только теплопроводностью, в воздушной прослойке к этому присоединяется еще передача тепла конвекцией и излучением. Таким образом, если полное количество тепла, проходящего через 1 $м^2$ вертикальной воздушной прослойки в течение 1 *ч*, обозначим Q, то на основании сказанного можно написать:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где Q_1 — количество тепла, передаваемого теплопроводностью, в *ккал/м²·ч*; Q_2 — количество тепла, передаваемого конвекцией, в *ккал/м²·ч*; Q_3 — количество тепла, передаваемого излучением, в *ккал/м²·ч*.

На рис. 19 показан вертикальный разрез воздушной прослойки, имеющей толщину δ, и температуры на ограничивающих поверхностях τ_1 и τ_2, причем $\tau_1 > \tau_2$. При такой разности температур через воздушную прослойку будет проходить тепловой поток Q.

Передача тепла теплопроводностью подчиняется закону передачи тепла в твердом теле. Следовательно, по формуле (12) можно написать:

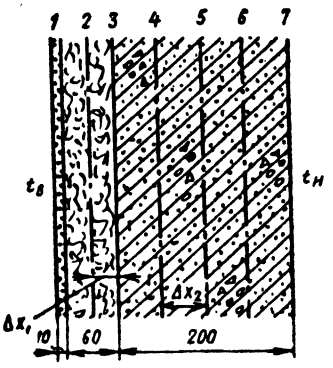


Рис. 81. Расчетная схема бетонной стены, утепленной с внутренней стороны

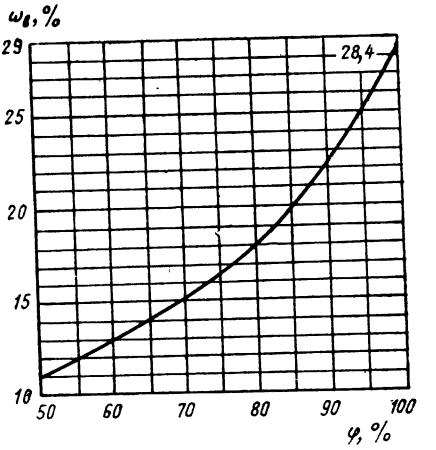


Рис. 82. Изотерма сорбции водяного пара торфоплитой с объемным весом 225 *кг/м*³

Начальная влажность торфоплиты 20%, что по изотерме сорбции соответствует относительной упругости $\varphi=86\%$.

Бетон. Объемный вес $\gamma=1400$ *кг/м*³, $\mu_2=0{,}0145$ *г/м·ч·мм*. Изотерма сорбции приведена на рис. 66. Коэффициент влагопроводности дан на рис. 78. Начальная влажность бетона 3%, что по изотерме сорбции соответствует $\varphi=87\%$.

Штукатурка. Коэффициент паропроницаемости $\mu=0{,}016$. Ввиду небольшой толщины слоя штукатурки и малого изменения ее влажности примем для нее $\xi_0=0$, т. е. будем учитывать только ее сопротивление паропроницанию

$$R_п = \frac{0{,}01}{0{,}016} = 0{,}62 \text{ мм·ч·м}^2/\text{г}.$$

Относительные пароемкости ξ_0 торфоплиты и бетона, определенные по изотермам сорбции рис. 82 и 66, приведены в следующей таблице:

Относительные упругости водяного пара, %	75	80	85	90	95	100
Торфоплита	$\xi_0=280$	335	410	495	595	710
Бетон	$\xi_0=38$	44	53	63	76	91

Для расчета разделим торфоплиты на два слоя толщиной $\Delta x_1=0{,}03$ *м* каждый, а бетонную стену на четыре слоя толщиной $\Delta x_2=0{,}05$ *м* каждый (см. рис. 81). Температуры τ и максимальные упругости водяного пара E в плоскостях, разделяющих слои, приведены в расчетной таблице.

Максимальные интервалы времени $\Delta Z_{макс}$ по формуле (94), принимая ξ_0 для $\varphi=85\%$, будут:

по торфоплите в плоскости *1*:

$$\Delta Z'_{макс}=\frac{0{,}03^2}{2\dfrac{0{,}0256}{410\cdot200}13{,}55}=107\ ч;$$

по бетону в плоскости *3*:

$$\Delta Z''_{макс}=\frac{0{,}05^2}{2\dfrac{0{,}0145}{53\cdot1400}4{,}61}=1390\ ч.$$

В расчете принимаем $\Delta Z=96\ ч$, т. е. 4 суток.

Расчетные формулы для вычисления упругостей водяного пара в отдельных плоскостях стены будут следующие:

Плоскость *1* (под штукатуркой). Сопротивление влагообмену будет $R_{в.п}=0{,}2$, а полное сопротивление паропроницанию от внутреннего воздуха до торфоплиты будет $R_п=0{,}2+0{,}62=0{,}82\ мм\cdot ч\cdot м^2/г$.

Сопротивление паропроницанию слоя торфоплиты будет:

$$R_{\Delta п}=\frac{0{,}03}{0{,}0256}=1{,}17.$$

Учитывая, что для торфоплиты принятое ΔZ близко к $\Delta Z'_{макс}$, e_1 вычисляем по формуле (98):

$$\Delta e_1=\frac{1{,}17\cdot10{,}8+0{,}82e_2}{0{,}82+1{,}17}-e_1=6{,}35+0{,}41e_2-e_1.$$

Плоскость *2* (в торфоплите). По формуле (93) получим:

$$\Delta e_2=\frac{0{,}0256}{\xi_0\cdot200}8{,}05\frac{96}{0{,}03^2}(e_1+e_3-2e_2)=\frac{110}{\xi_0}(e_1+e_3-2e_2).$$

Плоскость *3* (примыкания торфоплиты к бетону). По формуле (95) получим:

$$\Delta e_3=2\cdot4{,}61\cdot96\frac{\dfrac{0{,}0256}{0{,}03}(e_2-e_3)-\dfrac{0{,}0145}{0{,}05}(e_3-e_4)}{0{,}03\cdot200\xi_{0,1}+0{,}05\cdot1400\xi_{0,2}}=$$

$$=\frac{885}{6\xi_{0,1}+70\xi_{0,2}}[0{,}85(e_2-e_3)-0{,}29(e_3-e_4)].$$

Плоскости *4—6* (в бетоне). По формуле (93) для этих плоскостей получим: $\Delta e_n=a_n(e_{n-1}+e_{n+1}-2e_n)$,

где

$$a_n=\frac{0{,}0145\cdot96\cdot E_n}{\xi_{0,n}\cdot1400\cdot0{,}05^2}=0{,}4\frac{E_n}{\xi_{0,n}};$$

для плоскости *4*— $a_4=\dfrac{0{,}4\cdot4{,}04}{\xi_0}=\dfrac{1{,}62}{\xi_0}$;

для плоскости *5*— $a_5=\dfrac{0{,}4\cdot3{,}57}{\xi_0}=\dfrac{1{,}43}{\xi_0}$;

для плоскости *6*— $a_6=\dfrac{0{,}4\cdot3{,}11}{\xi_0}=\dfrac{1{,}24}{\xi_0}$;

$$Q_1 = (\tau_1 - \tau_2)\frac{\lambda_1}{\delta},$$

где λ_1 — коэффициент теплопроводности неподвижного воздуха (при температуре 0° С $\lambda_1 = 0{,}02$ *ккал/м·ч·град*); δ — толщина прослойки в *м*.

Конвекция воздуха в прослойке возникает вследствие разности температур на ее поверхностях и имеет характер естественной конвекции. При этом у поверхности с более высокой температурой воздух нагревается и движется в направлении снизу вверх, а у более холодной поверхности охлаждается и движется в направлении сверху вниз. Таким образом, в вертикальной воздушной прослойке создается постоянная циркуляция воздуха, показанная на рис. 19 стрелками. По аналогии с формулой (12) для количества тепла, передаваемого конвекцией, можно написать:

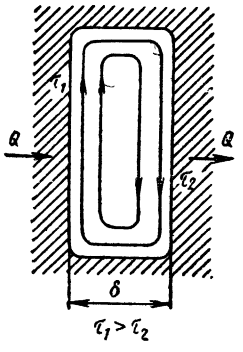


Рис. 19. Схема передачи тепла в воздушной прослойке

$$Q_2 = (\tau_1 - \tau_2)\frac{\lambda_2}{\delta_2},$$

где λ_2 — условный коэффициент, называемый коэффициентом передачи тепла конвекцией.

В отличие от обычного коэффициента теплопроводности этот коэффициент не является постоянной величиной, а зависит от толщины прослойки, температуры воздуха в ней, разности температур на поверхностях прослойки и расположения прослойки в ограждении.

Для вертикальных прослоек значения величин коэффициентов $\lambda_1+\lambda_2$ даны в табл. 6 в зависимости от толщины прослойки δ и разности температур на ее поверхностях $\tau_1-\tau_2$. Влияние температуры воздуха в пределах от +15 до —10° С на теплопередачу конвекцией не превышает 5%, а поэтому им можно пренебречь.

Табл. 6 показывает, что коэффициент передачи тепла конвекцией возрастает с увеличением толщины прослойки. Это возрастание объясняется тем, что в тонких прослойках восходящий и нисходящий токи воздуха взаимно тормозятся и в очень тонких прослойках (меньше 5 *мм*) величина λ_2 становится равной нулю. С увеличением толщины прослойки, наоборот, конвекционные токи воздуха становятся более интенсивными, увеличивая значение λ_2. С увеличением разности температур на поверхностях прослойки величина λ_2 возрастает вследствие повышения интенсивности конвекционных токов в прослойке.

Увеличение значений $\lambda_1+\lambda_2$ в горизонтальных прослойках

Плоскость 7 (наружная поверхность стены). Примем $R_{н.п}=0{,}1$. Сопротивление паропроницанию слоя бетона

$$R_{\Delta п}=\frac{0{,}05}{0{,}0145}=3{,}45.$$

Так как для бетона принятое ΔZ в несколько раз меньше $\Delta Z''_{макс}$, e_7 вычисляем по формуле (96):

$$\Delta e_7=\frac{2\cdot 96\cdot 2{,}72}{0{,}05\cdot 1400\xi_0}\left(\frac{2-e_7}{0{,}1}-\frac{e_7-e_6}{3{,}45}\right)=\frac{7{,}45}{\xi_0}(20-10{,}29e_7+0{,}29e_6).$$

Полученная величина Δe_7 не должна превышать величину $\Delta e_{7\,макс}$, определяемую по формуле (97), по которой получим

$$\Delta e_{7,\,макс}=\frac{3{,}45\cdot 2+0{,}1\,e_6}{3{,}45+0{,}1}-e_7=1{,}94+0{,}03e_6-e_7.$$

Расчет влажностного режима стены располагаем в расчетной таблице. Для большей плавности расчета первый и второй интервалы времени берем равными двум суткам.

С момента времени $Z=10$ суток в плоскости *3* начинается образование конденсата. С этого момента в графе плоскости *3* записываем два значения влажности: первое — для торфоплиты, второе — для бетона. В графе плоскости *2* записываем влажность торфоплиты, а в графе плоскости *4* — влажность бетона.

Для определения изменения влажности материалов в плоскостях *2—4* вычисляем следующие количества влаги:

парообразной:

от плоскости *1* к плоскости *2* — $P_{1-2}=\frac{0{,}0256}{0{,}03}96\,(e_1-e_2)=81{,}9\,(e_1-e_2)$;

от плоскости *2* к плоскости *3* — $P_{2-3}=81{,}9\,(e_2-E_3)$;

жидкой:

в торфоплите от плоскости *3* к плоскости *2*. Средняя температура плоскостей: $\frac{8+0{,}1}{2}=4°$ С, соответствующая ей поправка к коэффициенту β_1 по формуле (102а) будет:

$$\frac{1+0{,}04\cdot 4}{1{,}6}=0{,}72;$$

$$G_{3-2}=\frac{96}{0{,}03}0{,}72\beta_1(\omega_3-\omega_2)=2304\beta_1(\omega_3-\omega_2).$$

Величина β_1 берется по графику рис. 76 для влажности торфоплиты равной $\frac{\omega_2+\omega_3}{2}$.

В бетоне от плоскости *3* к плоскости *4*. Средняя температура плоскостей *3* и *4* будет: $\frac{0{,}1-1{,}5}{2}=-0{,}7°$С

и соответствующая ей поправка по коэффициенту β_2 равна:

$$\frac{1-0{,}04\cdot 0{,}7}{1{,}6}=0{,}61;$$

$$G_{3-4}=\frac{96}{0{,}05}0{,}61\beta_2(\omega_3-\omega_4)=1171\beta_2(\omega_3-\omega_4).$$

Таблица 6

Значения величин $\lambda_1+\lambda_2$ при температуре воздуха 0° С для вертикальных воздушных прослоек в зависимости от толщины прослойки δ и разности температур на ее поверхностях $\tau_1-\tau_2$*

$\tau_1-\tau_2$	Значения $\lambda_1+\lambda_2$ при δ в *см*									
	1	2	3	5	7	10	12	15	20	25
1°	0,02	0,021	0,029	0,042	0,054	0,07	0,08	0,096	0,12	0,14
2,5°	0,02	0,027	0,036	0,053	0,068	0,089	0,101	0,12	0,15	0,177
5°	0,021	0,032	0,043	0,063	0,081	0,106	0,121	0,143	0,178	0,207
10°	0,022	0,038	0,051	0,075	0,096	0,125	0,142	0,17	0,213	0,255
15°	0,024	0,042	0,056	0,083	0,106	0,138	0,158	0,188	0,236	0,276
20°	0,026	0,045	0,061	0,089	0,114	0,149	0,17	0,202	0,253	0,297
25°	0,028	0,048	0,064	0,094	0,121	0,157	0,18	0,214	0,268	0,314
30°	0,029	0,05	0,067	0,099	0,126	0,164	0,19	0,224	0,28	0,329
Для горизонтальных прослоек при потоке тепла снизу вверх приведенные значения $\lambda_1+\lambda_2$ увеличивать на:	20%	40%	42%	43%	38%	26%	20%	13%	6%	3%

* Таблица составлена по данным проф. М. А. Михеева, обработавшего результаты ряда экспериментов по теплопередаче через воздушные прослойки в форме зависимости $\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_1}$ от критериев Грасгофа и Прандтля.

Процентные надбавки для горизонтальных прослоек при потоке тепла в них снизу вверх взяты на основании данных Мюля и Рейхера.

при потоке тепла снизу вверх объясняется непосредственным направлением конвекционных токов по вертикали от нижней поверхности, имеющей более высокую температуру, к верхней поверхности, имеющей более низкую температуру. В горизонтальных прослойках при потоке тепла сверху вниз конвекция воздуха отсутствует, поскольку поверхность с более высокой температурой расположена над поверхностью с более низкой температурой. В этом случае принимается $\lambda_2=0$.

Кроме передачи тепла теплопроводностью и конвекцией в воздушной прослойке происходит еще непосредственное излучение между поверхностями, ограничивающими воздушную прослойку. Количество тепла Q_3, передаваемого в воздушной прослойке излучением от поверхности с более высокой температурой τ_1 к поверхности с более низкой температурой τ_2, можно выразить по аналогии с предыдущими выражениями в виде:

$$Q_3 = (\tau_1 - \tau_2)\,\alpha_л,$$

где $\alpha_л$ — коэффициент теплоотдачи излучением.

В этом равенстве отсутствует множитель δ, так как количество тепла, передаваемого излучением, в воздушных прослойках, ограниченных параллельными плоскостями, не зависит от расстояния между ними.

Расчетная таблица

Плоскости	1	2	3	4	5	6	7
$\tau=$	15,9	8	0,1	—1,5	—3	—4,6	—6,2
$E=$	13,55	8,05	4,61	4,04	3,57	3,11	2,72
$\varphi_{нач}=$	86	86	86—87	87	87	87	87
$Z=0$ $e=$	11,65	6,92	3,99	3,52	3,1	2,71	2,37
$\xi_0=$	—	425	425—55	55	55	55	55
$Z=2$ $e=$	10,42	7,15	4,15	3,52	3,1	2,71	2,2
$\varphi=$	—	89	90				81
$\xi_0=$	—	480	495—63	55	55	55	46
$Z=4$ $e=$	9,86	7,18	4,29	3,52	3,1	2,71	2,06
$\varphi=$	—	89	93				76
$\xi_0=$	—	480	550—71	55	55	55	39
$Z=8$ $e=$	9,3	7,13	4,53	3,53	3,1	2,7	2,02
$\varphi=$	—	88,5	98	87,5			74
$\xi_0=$	—	470	660—85	58	55	55	37
$Z=10$ $e=$	9,27	7,08	4,61	3,54	3,1	2,7	2,02
$\varphi=$	—	88	100	88			
			$\omega_в$				
		21	28,4—4	3,06			
$Z=14$ $e=$	9,25	20,6	30,86—4,28	3,09	3,1	2,69	2,02
$\xi_0=$		$e=7,01$		$e=3,57$	55	55	37
$Z=18$ $e=$	9,22	20,37	33,26—4,55	3,11	3,1	2,69	2,02
$\xi_0=$		$e=6,97$		$e=3,59$	55	55	37
$Z=22$ $e=$	9,2	20,22	35,62—4,82	3,13	3,1	2,68	2,02
$\xi_0=$		$e=6,94$		$e=3,6$	55	55	37
$Z=26$ $e=$	9,19	20,12	37,96—5,1	3,15	3,1	2,68	2,02
$\xi_0=$		$e=6,92$		$e=3,62$	55	55	37
$Z=30$ $e=$	9,19	20,12	40,19—5,35	3,17	3,11	2,67	2,02
$\xi_0=$		$e=6,92$		$e=3,63$	56	55	37
$Z=34$ $e=$	9,19	20,2	42,32—5,59	3,2	3,11	2,67	2,02
$\xi_0=$		$e=6,94$		$e=3,64$	56	55	37
$Z=38$ $e=$	9,19	20,28	44,38—5,82	3,23	3,11	2,66	2,02
$\xi_0=$		$e=6,96$		$e=3,65$	56	54	37
$Z=42$ $e=$	9,2	20,38	46,36—6,04	3,26	3,11	2,66	2,02
$\xi_0=$		$e=6,98$		$e=3,68$	56	54	37
$Z=46$ $e=$	9,21	20,53	48,26—6,24	3,3	3,12	2,65	2,02
$\xi_0=$		$e=7$		$e=3,7$	57	53	37
$Z=50$ $e=$	9,22	20,65	50,08—6,45	3,34	3,12	2,65	2,02
$\xi_0=$		$e=7,01$		$e=3,71$	57	53	37
$Z=54$ $e=$	9,23	20,8	51,83—6,65	3,39	3,12	2,65	2,02
$\xi_0=$		$e=7,03$		$e=3,73$	57	53	37
$Z=58$ $e=$	9,24	20,95	53,51—6,84	3,44	3,13	2,64	2,02
$\xi_0=$		$e=7,06$		$e=3,76$	58	52	37
$Z=62$ $e=$	9,25	21,08	55,14—7,04	3,49	3,13	2,64	2,02
$\varphi=$	68,5	—	—	—	87,5	85	74,5
$\omega=$	14,7	21,1	55,1 7	3,5	3	2,9	2,4
		$\omega_{ср}=28\%$		$\omega_{ср}=3,5\%$			

Коэффициент $\alpha_л$ определяется по формуле (18). Формула (18) показывает, что коэффициент $\alpha_л$ также не является постоянной величиной, а зависит от коэффициентов излучения поверхностей, ограничивающих воздушную прослойку и, кроме того, от разности четвертых степеней абсолютных температур этих поверхностей.

Для определения величины $\frac{\left(\frac{\tau_1+273}{100}\right)^4-\left(\frac{\tau_2+273}{100}\right)^4}{\tau_1-\tau_2}$, входящей в правую часть формулы (18) и называемой «температурным коэффициентом», достаточно знать среднюю температуру воздушной прослойки $\frac{\tau_1+\tau_2}{2}$, так как для температур наружных ограждений величина температурного коэффициента может быть принята не зависящей от значений τ_1 и τ_2, а зависящей только от их средней величины. Значения температурного коэффициента формулы (18) для средних температур воздушной прослойки от +25 и до —25° С приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения температурного коэффициента в зависимости от средней температуры воздушной прослойки

Средняя температура воздушной прослойки $\frac{\tau_1+\tau_2}{2}$	+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

Данные табл. 7 показывают, что значения температурного коэффициента растут с увеличением средней температуры воздушной прослойки. При температуре, равной 25° С, значение температурного коэффициента увеличилось на 74% по сравнению с его значением при температуре —25° С. Следовательно, теплозащитные свойства воздушной прослойки будут улучшаться по мере понижения ее средней температуры. В теплотехническом отношении лучше располагать воздушные прослойки ближе к наружной поверхности ограждения, где температуры в зимнее время будут более низкими.

Если сложить значения $Q_1+Q_2+Q_3=Q$, получим:

$$Q=(\tau_1-\tau_2)\frac{\lambda_1+\lambda_2+\alpha_л\delta}{\delta}.$$

Выражение $\lambda_1+\lambda_2+\alpha_л\delta$ можно рассматривать как коэффициент теплопроводности воздуха в прослойке, подчиняющийся законам передачи тепла через твердые тела. Этот суммарный

коэффициент носит название «эквивалентного коэффициента теплопроводности воздушной прослойки» $\lambda_э$. Таким образом, имеем:

$$\lambda_э = \lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_л \delta. \qquad (30)$$

Зная эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха в прослойке, термическое сопротивление его определяют по формуле (21) так же, как и для слоев из твердых или сыпучих материалов, т. е. $R = \delta/\lambda_э$.

Формула (30) применима только для замкнутых воздушных прослоек, т. е. не имеющих сообщения с наружным или внутренним воздухом. Если прослойка имеет сообщение с наружным воздухом, то в результате проникания холодного воздуха термическое сопротивление ее может не только стать равным нулю, но и послужить причиной уменьшения сопротивления теплопередаче ограждения [1].

Для определения величины $\lambda_1 + \lambda_2$, входящей в формулу (30), необходимо знать температуры на поверхностях прослойки, которые в свою очередь зависят от термического сопротивления прослойки, определяемого по величине $\lambda_э$. Поэтому при точных расчетах предварительно задаются значениями температур на поверхностях прослойки, по ним определяют $\lambda_э$ и термическое сопротивление прослойки R. Определив на основании полученного значения R и величины сопротивления теплопередаче R_0 ограждения значения температур на поверхностях прослойки, пересчитывают по ним величину $\lambda_э$. Если вновь полученная величина $\lambda_э$ окажется близкой к принятой, расчет считают законченным, в противном случае пересчет делается еще раз.

Пример 14. Определить сопротивление теплопередаче стеклопакета, установленного в оконном проеме. Стеклопакет состоит из двух стекол толщиной по 4 *мм* с воздушной прослойкой толщиной 20 *мм*. Температура внутреннего воздуха $t_в = 18°$ С, температура наружного воздуха $t_н = -15°$ С.

Задаемся температурами: на внутренней поверхности стеклопакета $\tau_в = 6°$ С; на поверхностях воздушной прослойки $\tau_2 = 5{,}5°$ С и $\tau_3 = -10{,}1°$ С.

Определяем коэффициент теплоотдачи $\alpha_в$ у внутренней поверхности стеклопакета. Принимаем коэффициенты излучения: стекла $C_1 = 4{,}65$; внутренних поверхностей помещения $C_2 = 4{,}5$, тогда приведенный коэффициент излучения поверхностей будет:

$$\frac{1}{\frac{1}{4{,}65} + \frac{1}{4{,}5} - \frac{1}{4{,}96}} = 4{,}25.$$

Температурный коэффициент при средней температуре воздух — поверхность стеклопакета, равной $\frac{18 + 6}{2} = 12°$ С, по табл. 7 будет 0,93. По формуле (18) получим $\alpha_л = 4{,}25 \cdot 0{,}93 = 3{,}96$. По формуле (19) получим $\alpha_к = 1{,}43\sqrt[3]{18-6} = 3{,}28$. Коэффициент теплоотдачи будет: $\alpha_в = 3{,}96 + 3{,}28 = 7{,}24$.

[1] Расчет ограждений с вентилируемыми прослойками изложен в гл. VI.

Величина β_2 берется по графику рис. 78 для влажности бетона, равной $\frac{\omega_3 + \omega_4}{2}$.

Плоскость *2*. Изменение влагосодержания слоя *2* за интервал времени ΔZ будет: $\Delta P_2 = P_{1-2} - P_{2-3} + G_{3-2}$.

Вес слоя торфоплиты $\Delta x_1\ \gamma = 0{,}03 \cdot 200 = 6$ *кгс/м²*, а изменение влажности торфоплиты в плоскости *2* — по формуле (110):

$$\Delta\omega_2 = 0{,}1\,\frac{\Delta P_2}{6} = \frac{\Delta P_2}{60}\ \%.$$

Плоскость *3*. Изменение влагосодержания полуслоев, прилегающих к плоскости *3*:

$$\Delta P_3 = P_{2-3} - P_{3-4} - G_{3-2} - G_{3-4}.$$

Распределение этой влаги между торфоплитой и бетоном берем пропорционально скорости капиллярного всасывания воды этими материалами. По табл. 28 средние суточные скорости капиллярного всасывания для этих материалов будут:

для торфоплиты	$0{,}18 \cdot 10^{-3}$ *см/мин*,	или 43%
» бетона	$0{,}24 \cdot 10^{-3}$ »	» 57%

Изменение влажности торфоплиты в плоскости *3* будет:

$$\Delta\omega_3' = 0{,}43\,\frac{\Delta P_3}{30} = \frac{\Delta P_3}{69{,}8}\ \%.$$

Изменение влажности бетона в плоскости *3* будет: вес полуслоя бетона $\frac{\Delta x_2}{2}\ \gamma = 0{,}025 \cdot 1400 = 35$ *кгс/м²*,

$$\Delta\omega_3'' = 0{,}57\,\frac{\Delta P_3}{350} = \frac{\Delta P_3}{615}\ \%.$$

Плоскость *4*. Изменение влагосодержания слоя *4*:

$$\Delta P_4 = P_{3-4} - P_{4-5} + G_{3-4}.$$

Вес слоя бетона 70 *кгс/м²*, а изменение влажности бетона в плоскости *4*:

$$\Delta\omega_4 = 0{,}1\,\frac{\Delta P_4}{70} = \frac{\Delta P_4}{700}\ \%.$$

Расчет величин изменения влажности материалов $\Delta\omega$ приведен во вспомогательной таблице.

Проведенный расчет показывает, что только через два зимних месяца со сравнительно высокими температурами наружного воздуха влажность торфоплиты в плоскости *3* достигает 55%, а бетона в этой плоскости — 7%. Средняя влажность торфоплиты оказалась равной 28%, т. е. повысилась на 8% по сравнению с начальной влажностью. Средняя влажность бетона стала равной 3,5%, т. е. повысилась только на 0,5%, причем в плоскостях *6* и *7*, расположенных к наружной поверхности стены, влажность бетона несколько понизилась по сравнению с начальной. Влажность торфоплиты в плоскости *2* вначале несколько понижалась вследствие перемещения парообразной влаги к плоскости *3*, вызванного градиентом температуры в слое *2—3*. После 26 суток влажность торфоплиты в этой плоскости стала повы-

Вспомогательная таблица

Z, сутки	Парообразная влага				Жидкая влага				Плоскость 2		Плоскость 3			Плоскость 4	
					Торфоплита		Бетон								
	P_{1-2}	P_{2-3}	P_{3-4}	P_{4-5}	$\beta_1 \cdot 10^2$	G_{3-2}	$\beta_2 \cdot 10^2$	G_{3-4}	ΔP_2	$\Delta\omega_2$	ΔP_3	Торфоплита $\Delta\omega_3$	бетон $\Delta\omega_3''$	ΔP_4	$\Delta\omega_4$
10	178	202	30	12	0	—	0	—	—24	—0,4	172	2,46	0,28	18	0,03
14	183	197	29	13	0	—	0	—	—14	—0,23	168	2,4	0,27	16	0,02
18	184	193	28	14	0	—	0	—	—19	—0,15	165	2,36	0,27	14	0,02
22	186	191	28	14	0	—	0	—	—6	—0,1	163	2,34	0,27	14	0,02
26	186	189	28	14	0,008	3	0,1	2	0	0	156	2,23	0,25	16	0,02
30	186	189	27	14	0,018	8	0,25	5	5	0,08	149	2,13	0,24	18	0,03
34	184	191	27	15	0,023	12	0,35	8	5	0,08	144	2,06	0,23	20	0,03
38	183	192	27	15	0,027	15	0,4	12	6	0,1	138	1,98	0,22	24	0,03
42	183	193	26	16	0,031	19	0,5	16	9	0,15	132	1,89	0,21	26	0,04
46	180	196	25	16	0,036	23	0,6	21	7	0,12	127	1,82	0,21	30	0,04
50	180	197	25	16	0,038	26	0,65	24	9	0,15	122	1,75	0,2	33	0,05
54	179	199	24	17	0,04	29	0,75	29	9	0,15	117	1,68	0,19	36	0,06
58	178	201	24	17	0,042	31	0,8	32	8	0,13	114	1,63	0,19	39	0,06

Таблица 8

Термические сопротивления воздушных прослоек

Толщина прослойки в *см*	*R*, *град·м²·ч/ккал*	
	для вертикальных и горизонтальных прослоек при потоке тепла снизу вверх	для горизонтальных прослоек при потоке тепла сверху вниз
1	0,16	0,17
2	0,17	0,2
3	0,175	0,21
5	0,18	0,23
10	0,19	0,24
15 и более	0,2	0,25

При разности температур на поверхностях воздушной прослойки $\tau_2-\tau_3=5{,}5+10{,}1=15{,}6°$ С по табл. 6 получим: $\lambda_1+\lambda_2=0{,}042$. Приведенный коэффициент излучения поверхностей прослойки будет: $\dfrac{1}{\frac{2}{4{,}65}-\frac{1}{4{,}96}}=4{,}4$.

Температурный коэффициент при средней температуре поверхностей $\dfrac{5{,}5-10{,}1}{2}=-2{,}3°$ С по табл. 7 будет 0,79, откуда $\alpha_л=4{,}4\cdot0{,}79=3{,}48$. Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха в прослойке по формуле (30): $\lambda_э=0{,}042+3{,}48\times0{,}02=0{,}112$ *ккал/м·ч·град*. Термическое сопротивление прослойки будет:

$$R=\frac{0{,}02}{0{,}112}=0{,}179.$$

Сопротивление теплопередаче стеклопакета

$$R_0=\frac{1}{7{,}24}+\frac{0{,}004}{0{,}7}+0{,}179+\frac{0{,}004}{0{,}7}+0{,}05=0{,}138+0{,}006+0{,}179+$$
$$+0{,}006+0{,}05=0{,}379.$$

Проверяем заданные температуры по формуле (28):

$$\tau_в=18-\frac{18+15}{0{,}379}0{,}138=18-12=6°\text{ C};$$

$$\tau_2=18-\frac{33}{0{,}379}(0{,}138+0{,}006)=18-12{,}5=5{,}5°\text{ C};$$

$$\tau_3=18-87\,(0{,}138+0{,}006+0{,}179)=18-28{,}1=-10{,}1°\text{ C}.$$

Полученные температуры полностью совпали с заданными, следовательно, расчет верен.

Коэффициент теплопередачи стеклопакета

$$K=\frac{1}{0{,}379}=2{,}64\ \textit{ккал/м²·ч·град}.$$

Для практических расчетов, не требующих большой точности, можно пользоваться величинами термических сопротивлений воздушных прослоек, приведенными в табл. 8.

шаться вследствие перемещения влаги в жидкой фазе к этой плоскости от плоскости *3*. Слишком высокая влажность торфоплиты в плоскости ее примыкания к бетонной стене указывает на неблагоприятный влажностный режим стены, что явилось следствием расположения торфоплиты у внутренней поверхности стены и отсутствия пароизоляционного слоя под внутренней штукатуркой. Для того чтобы торфоплита не увлажнялась, ее следует отделить от поверхности бетонной стены воздушной прослойкой. При этом влага, конденсирующаяся на внутренней поверхности бетонной стены, не сможет увлажнять торфоплиту, а несколько большее увлажнение бетона неопасно. Воздушная прослойка в ограждении создает в нем барьер против перемещения влаги в жидкой фазе.

Таблица 9

Количество тепла, проходящего через вертикальные воздушные прослойки, при разности температур на их поверхностях 5°

Толщина прослойки δ, *см*	Количество тепла Q, *ккал/м²·ч*	Количество тепла в % передаваемого			Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_э$, *ккал/м·ч·град*
		теплопроводностью	конвекцией	излучением	
1	26,5	38	2	60	0,053
5	22,3	9	19	72	0,223
10	21,3	5	20	75	0,426
20	20,5	2	19	79	0,818

Примечание. Приведенные в таблице величины соответствуют температуре воздуха в прослойке, равной 0° С, и коэффициентам излучения ее поверхностей C=4,4.

Табл. 8 показывает нерациональность воздушных прослоек большой толщины: так, например, увеличение толщины прослойки в 5 раз (с 1 до 5 *см*) повысило термическое сопротивление вертикальной прослойки только на 12,5%, а при дальнейшем увеличении толщины прослойки ее термическое сопротивление возрастает совсем незначительно.

Для выяснения доли участия в передаче тепла через воздушные прослойки теплопроводности, конвекции и излучения в табл. 9 приведены их значения в процентах от общего количества тепла, проходящего через 1 $м^2$ вертикальной прослойки в 1 *ч* при разности температур на ее поверхностях, равной 5°.

Данные табл. 9 показывают следующее:

1) увеличение толщины воздушной прослойки мало влияет на уменьшение количества тепла, проходящего через прослойку;

2) главная доля тепла (79%), проходящего через прослойку, передается излучением;

3) максимальная доля передачи тепла конвекцией составляет только 20% полного количества тепла, проходящего через прослойку;

4) толстые прослойки следует заполнять малотеплопроводными материалами; так, например, заполнение вертикальных прослоек материалом с коэффициентом теплопроводности λ=0,2 оказывается выгоднее начиная с толщины 5 *см* и больше; чем толще прослойка, тем целесообразнее ее засыпка для увеличения термического сопротивления ограждения. Прослойки большой толщины нерациональны. Так, для прослойки толщиной 20 *см* $\lambda_э$=0,818, что выше коэффициента теплопроводности кирпичной кладки (λ=0,7).

Для уменьшения количества тепла, проходящего через воздушную прослойку, необходимо уменьшить одну из составляющих полного количества тепла, передаваемого прослойкой. Эта задача прекрасно решена в стенках сосудов, предназначенных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ОБЩАЯ

1. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. «Высшая школа», 1970.
2. Власов О. Е. Основы строительной теплотехники. ВИА РККА, 1938.
3. Ильинский В. М. Проектирование ограждающих конструкций зданий (с учетом физико-климатических воздействий). Стройиздат, 1964.
4. Мачинский В. Д. Теплотехнические основы строительства. Стройиздат, 1949.
5. НИИСФ. Пособие по проектированию ограждающих конструкций зданий. Стройиздат, 1967.
6. СНиП II-А.6-62. «Строительная климатология и геофизика, основные положения проектирования». Стройиздат, 1963.
7. СНиП II-А.7-71. «Строительная теплотехника, нормы проектирования». Стройиздат, 1973.
8. Шкловер А. М., Васильев Б. Ф., Ушков Ф. В. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. Стройиздат, 1956.

К I ЧАСТИ

9. Брилинг Р. Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. Стройиздат, 1948.
10. Власов О. Е. Приложение теории потенциала к исследованию теплопроводности. «Известия Теплотехнического института» № 5 (38), 1928.
11. Власов О. Е. Плоские тепловые волны. «Известия Теплотехнического института» № 3 (26), 1927.
12. Васильев Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий. Госстройиздат, 1957.
13. Гребер Г., Эрк С., Григулль У. Основы учения о теплообмене, ИЛ, 1958.
14. Гутенмахер Л. И. Электрические модели. Изд. АН СССР, 1949.
15. Дашкевич Л. Л. Методы расчета инсоляции при проектировании промышленных зданий. Стройиздат, 1939.
16. Каммерер И. С. Теплоизоляция в промышленности и строительстве. Стройиздат, 1965.
17. Кондратьев Г. М. Испытания на теплопроводность по методам регулярного режима. Стандартгиз, 1936.
18. Лукьянов В. С., Головко М. Д. Расчет глубины промерзания грунтов. Желдориздат, 1957.
19. Мак-Адамс. Теплопередача. Металлургиздат, 1961.
20. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Энергоиздат, 1956.
21. Муромов С. И. Расчетные температуры наружного воздуха и теплоустойчивость ограждений. Стройиздат, 1939.
22. Панов Ю. Д. Справочник по численному решению дифференциальных уравнений в частных производных. Гостехтеоретиздат, 1950.
23. Реттер Э. И., Стриженов С. И. Аэродинамика зданий. Стройиздат, 1968.

для хранения жидкого воздуха. Стенки этих сосудов состоят из двух стеклянных оболочек, между которыми выкачивается воздух; поверхности стекла, обращенные внутрь прослойки, покрываются тонким слоем серебра. При этом количество тепла, передаваемого конвекцией, сводится к нулю вследствие значительного разрежения воздуха в прослойке.

В строительных конструкциях с воздушными прослойками передача тепла излучением значительно сокращается при покрытии излучающих поверхностей алюминием, имеющим малый коэффициент излучения $C=0{,}22$. Передача тепла теплопроводностью при обычных разрежениях воздуха не зависит от его давления, и только при разрежении ниже 1,5 *мм рт. ст.* коэффициент теплопроводности воздуха начинает уменьшаться.

В порах строительных материалов передача тепла происходит так же, как и в воздушных прослойках. Вот почему коэффициент теплопроводности воздуха в порах материала имеет различные значения в зависимости от размеров пор. Повышение теплопроводности воздуха в порах материала при повышении температуры происходит главным образом вследствие увеличения теплопередачи излучением.

При проектировании наружных ограждений с воздушными прослойками необходимо учитывать следующее:

1) эффективными в теплотехническом отношении являются прослойки небольшой толщины;

2) при выборе толщины воздушных прослоек желательно учитывать, чтобы $\lambda_э$ воздуха в них не был больше коэффициента теплопроводности материала, которым можно было бы заполнить прослойку; обратный случай может быть, если это оправдывается экономическими соображениями;

3) рациональнее делать в ограждающей конструкции несколько прослоек малой толщины, чем одну большой толщины;

4) воздушные прослойки желательно располагать ближе к наружной стороне ограждения, так как при этом в зимнее время уменьшается количество тепла, передаваемого излучением;

5) воздушная прослойка должна быть замкнутой и не сообщаться с воздухом; если необходимость сообщения прослойки с наружным воздухом вызывается другими соображениями, как, например, обеспечением бесчердачных покрытий от конденсации в них влаги, то это необходимо учитывать при расчете;

6) вертикальные прослойки в наружных стенах необходимо перегораживать горизонтальными диафрагмами на уровне междуэтажных перекрытий; более частое перегораживание прослоек по высоте практического значения не имеет;

7) для сокращения количества тепла, передаваемого излучением, можно рекомендовать одну из поверхностей прослойки покрывать алюминиевой фольгой, имеющей коэффициент излучения $C=0{,}96$. Покрытие фольгой обеих поверхностей практически не уменьшает передачу тепла.

24. Семенов Л. А. Теплоустойчивость и печное отопление жилых и общественных зданий. Машстройиздат, 1950.
25. Семенова Е. И. Воздухопроницаемость окон жилых и общественных зданий. Стройиздат, 1969.
26. Ушков Ф. В. Теплотехнические свойства крупнопанельных зданий и расчет стыков. Стройиздат, 1967.
27. Ушков Ф. В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. Стройиздат, 1969.
28. Фокин К. Ф. Прибор для определения коэффициента теплопроводности строительных материалов, Сборник ЦНИПС «Исследования по строительной физике», Стройиздат, 1949.
29. Фокин К. Ф. Расчетные температуры наружного воздуха. Стандартгиз, 1946.
30. Фокин К. Ф. Определение коэффициентов теплопроводности ячеистых бетонов на различных приборах. НИИМосстрой. Научные труды, вып. VI. Изд. «Советская Россия», 1969.
31. Франчук А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. Стройиздат, 1949.
32. Шкловер А. М. Теплоустойчивость зданий. Стройиздат, 1952.
33. Шкловер А. М. Теплотехнический расчет зданий, расположенных на юге СССР. Стройиздат, 1952.
34. Шкловер А. М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. Энергоиздат, 1961.

КО II ЧАСТИ

35. Брилинг Р. Е. Миграция влаги в строительных ограждениях ЦНИПС. В сб.: «Исследования по строительной физике», Стройиздат, 1949.
36. Брунауэр. Адсорбция газов и паров. ИЛ, 1948.
37. Горомосов М. С. Микроклимат жилищ и его гигиеническое нормирование. Медгиз, 1963.
38. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. Гостехтеоретиздат, 1954.
39. Мак Бэн. Сорбция газов и паров твердыми телами, 1943.
40. Ребиндер П. А. Сушка и увлажнение строительных материалов и конструкций. Профиздат, 1958.
41. Фокин К. Ф. Сорбция водяного пара строительными материалами, ЦНИПС. В сб.: «Вопросы строительной физики», Стройиздат, 1939.
42. Фокин К. Ф. Режим сушки полносборных домов в осенне-зимний период. Главмосстрой, «Реферативный сборник научно-технической информации», вып. 4, 1970.
43. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло- и маслообмена. Госэнергоиздат, 1961.

5. НОРМИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

При проектировании наружных ограждений зданий необходимо знать минимальные значения R_0, при которых ограждения оказываются удовлетворительными в теплотехническом отношении. Эти значения называются нормативными. Нормативные значения R_0 будут зависеть от назначения здания, его внутреннего режима, климатических условий места строительства и разновидности ограждения.

Нормирование R_0 наружных ограждений построено на принципах ограничения количества тепла, теряемого ограждением в отопительный период года и поддержания на внутренней поверхности ограждения температуры, при которой на ней не образовывался бы конденсат. Опасность появления конденсата на внутренней поверхности тем больше, чем выше влажность внутреннего воздуха. Поэтому влажность внутреннего воздуха имеет большое значение при установлении R_0. Температура внутренней поверхности ограждения должна быть не ниже точки росы $\tau_р$, т. е. температуры, при которой воздух определенной влажности становится насыщенным водяным паром, а для большей надежности — несколько выше ее. Для удовлетворения перечисленных требований необходимо ограничить температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой на внутренней поверхности ограждения $\Delta t = t_в - \tau_в$. На ограничении этого температурного перепада и построено нормирование R_0, принятое в нормах строительной теплотехники СНиП II-А.7-71. Значения нормируемых температурных перепадов $\Delta t^н$, принятых в СНиП, приведены в табл. 10.

Для ограждений цехов с избыточными тепловыделениями и интенсивным излучением на поверхность ограждения (котельные, стеклоплавильные и пр.) величина Δt не нормируется и размеры ограждения назначаются только по конструктивным соображениям.

Снижение $\Delta t^н$ для чердачных перекрытий и бесчердачных покрытий вызывается следующими соображениями: 1) верхние перекрытия более интенсивно теряют тепло вследствие более высокой температуры внутреннего воздуха под потолком; 2) конденсация влаги на потолке более опасна, чем на стенах, из-за возможного падения капель с потолка в помещение; 3) более высокая температура на поверхности потолка обеспечивает помещению равномерное распределение температуры воздуха в нем благодаря излучению тепла на пол и на наружные стены.

По температурным перепадам $\Delta t^н$, приведенным в табл. 10, нормативная величина сопротивления теплопередаче ограждения $R_0^{тр}$ на основании (27) должна вычисляться по формуле

$$R_0^{тр} = \frac{(t_в - t_н)\, n}{\Delta t^н} R_в, \qquad (31)$$

Приложение 1

РАСЧЕТНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Приведенные в таблице расчетные величины физических показателей строительных материалов соответствуют нормальной их влажности в наружных ограждениях. Если объемный вес материала отличается от приведенного в таблице, то расчетные физические показатели следует определять по интерполяции (см. пример 1).

2. Величины коэффициента теплопроводности приведены для температуры материалов 0°.

3. Более подробные и полные данные о расчетных теплофизических показателях строительных материалов содержатся в СНиП II-А.7-71.

Материал	Объемный вес γ в сухом состоянии в $кг/м^3$	Коэффициент теплопроводности λ, *ккал/м·ч·град*	Удельная теплоемкость c, *ккал/кг·град*	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^3$, $м^2/ч$	Коэффициент теплоусвоения s (при $Z=24$ ч), *ккал/м²·ч·град*	Коэффициент паропроницаемости $\mu \cdot 10^3$, *г/м·ч·мм рт. ст.*
Асбест						
Асбестоцементные плитки и листы . .	1900	0,3	0,2	0,79	5,45	0,35
Асбестоцементные теплоизоляционные плиты	500	0,11	0,2	1,1	1,69	5,2
То же	300	0,08	0,2	1,33	1,12	5,2
Асфальтовые материалы						
Асфальт	1800	0,65	0,4	0,9	11,05	0,1
Асфальтобетон . . .	2100	0,9	0,4	1,07	14	0,1
Бетоны						
Железобетон . . .	2500	1,4	0,2	2,8	13,5	0,4
Бетон с каменным щебнем или гравием	2300	1,25	0,2	2,72	12,25	0,6
Бетон с кирпичным щебнем	2000	0,9	0,2	2,25	9,65	0,9
Шлакобетон на котельных шлаках .	1500	0,6	0,19	2,1	6,65	1,2
То же	1200	0,45	0,18	2,08	5,05	1,6
Шлакопемзобетон . .	1600	0,5	0,2	1,56	6,45	1,2
» .	1200	0,4	0,2	1,67	5	1,4
Перлитобетон . . .	800	0,22	0,2	1,37	3,02	3,5
»	600	0,15	0,2	1,25	2,16	4
Керамзитобетон . .	1200	0,4	0,2	1,67	5	1,4
» . .	1000	0,3	0,2	1,5	3,95	1,8
» . .	600	0,2	0,2	1,67	2,5	3,5

Таблица 10

Нормируемые температурные перепады

Здания и помещения	$\Delta t^{н}=t_{в}-\tau_{в}$ *град*	
	Наружные стены	Чердачные перекрытия и бесчердачные покрытия
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 влажностью внутреннего воздуха менее 50%	10	8
То же, с расчетной влажностью внутреннего воздуха 50—60%	8	7
Производственные помещения с расчетной влажностью воздуха выше 60%, в которых не допускается конденсация влаги на поверхностях ограждений	$t_{в}-\tau_{р}$	$t_{в}-\tau_{р}-1°$
Производственные помещения с расчетной влажностью воздуха более 60%, в которых допускается конденсация влаги на поверхностях наружных стен	7	$t_{в}-\tau_{р}$
Для полов во всех случаях принимается $\Delta t^{н}=2{,}5°$ С.		

где $t_{в}$ и $t_{н}$ — расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха; $R_{в}$ — сопротивление тепловосприятию; n — коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждения по отношению к наружному воздуху и имеющий следующие значения:

Для наружных стен, бесчердачных покрытий и перекрытий над проездами	$n=1$
Для чердачных перекрытий и бесчердачных покрытий с вентилируемыми продухами (при этом в расчет величины $R_{о}$ принимается только часть покрытия, расположенная ниже продуха)	$n=0{,}9$
Для перекрытий над неотапливаемыми подвалами .	$n=0{,}6$
Для перекрытий над холодными подпольями . . .	$n=0{,}75$

Материал	Объемный вес γ в сухом состоянии в *кг/м³*	Коэффициент теплопроводности λ, *ккал/м·ч·град*	Удельная теплоемкость c, *ккал/кг·град*	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$, *м²/ч*	Коэффициент теплоусвоения s (при $Z=24$ ч), *ккал/м²·ч·град*	Коэффициент паропроницаемости $\mu \cdot 10^3$, *г/м·ч·мм рт. ст.*
Бетоны ячеистые (газобетон, пенобетон)	1000	0,34	0,2	1,7	4,2	1,5
То же	800	0,25	0,2	1,56	3,22	1,8
»	600	0,18	0,2	1,5	2,37	2,3
»	400	0,12	0,2	1,5	1,58	3,5
Газозолобетон . . .	800	0,3	0,2	1,88	3,51	1,6
Вата минеральная и изделия из нее						
Вата минеральная .	150	0,06	0,18	2,23	0,65	6,5
Войлок минераловатный	150	0,055	0,18	2,04	0,62	6,5
Плиты минераловатные на битумной связке	400	0,1	0,18	1,39	1,37	4,5
То же	300	0,08	0,18	1,48	1,06	5,5
Плиты минераловатные на синтетической связке . . .	200	0,06	0,18	1,67	0,75	6,5
Гипсовые изделия						
Плиты из чистого гипса	1100	0,35	0,2	1,59	4,45	1,4
Плиты гипсовые с органическими наполнителями	700	0,2	0,25	1,14	3	2,5
Гипсобетон на котельном шлаке . .	1300	0,48	0,19	1,94	5,55	1,4
Гипсобетон на доменном гранулированном шлаке	1000	0,32	0,19	1,68	4	2
Пеногипс и газогипс	500	0,16	0,2	1,6	2,05	5
Листы гипсовые обшивочные (сухая штукатурка) . . .	1000	0,2	0,24	0,83	3,5	См. табл. 24
Грунтовые материалы						
Глинобитные или сырцовые	2000	0,8	0,2	2	9,1	1,3

Пример 15. Какое сопротивление теплопередаче должны иметь: 1) наружная стена жилого дома в Москве, рассмотренная в примере 5; 2) чердачное перекрытие административного здания в Омске, рассмотренное в примере 6.

Обе конструкции в теплотехническом отношении относятся к категории «легких ограждений», для которых расчетная температура наружного воздуха принимается равной средней температуре наиболее холодных суток.

1. Для жилых помещений $t_в = 18°$ С. Для Москвы по СНиП II-А.6-62 средняя температура наиболее холодных суток $t_н = -31°$ С.

Для наружных стен жилых зданий по табл. 10 $\Delta t^н = 6°$ С. По формуле (31) получим:

$$R_o^{тр} = \frac{18 + 31}{6} 0{,}133 = 1{,}09.$$

По расчету, приведенному в примере 5, стена имеет по утеплителю $R_o = 1{,}763$, а среднее ее сопротивление теплопередаче по всей поверхности панели $R_{o.ср} = 1{,}41$. Оба сопротивления больше $R_o^{тр}$, следовательно, данная стена вполне удовлетворяет теплотехническим требованиям.

2. Для Омска по СНиП II-А.6-62 средняя температура наиболее холодных суток $t_н = -41°$ С; $t_в = 18°$ С. Для чердачных перекрытий административных зданий по табл. 10 $\Delta t^н = 5{,}5°$ С и $n = 0{,}9$. По формуле (31)

$$R_o^{тр} = \frac{(18 + 41)\,0{,}9}{5{,}5} 0{,}133 = 1{,}29.$$

При толщине керамзитовой засыпки 17 *см* (см. пример 6) перекрытие имеет $R_o = 1{,}29$, т. е. равное $R_o^{тр}$. Следовательно, принятая толщина керамзитовой засыпки выбрана правильно.

Глава IV. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ИХ РАСЧЕТ

Расчет температуры в ограждении, приведенный в главе III, относится только к случаю плоской стены неограниченного протяжения, в которой изменение температуры происходит в одном направлении, т. е. к случаю одномерного температурного поля.

В ограждениях, имеющих углы, выступы, проемы, а также в ограждениях с теплопроводными включениями изменение температуры происходит в двух или в трех направлениях. В этих случаях приходится иметь дело с двухмерным (плоским) или трехмерным (пространственным) температурным полем.

Расчет температурного поля имеет значение не только для решения вопросов строительной теплотехники, но также и для определения температурных напряжений в элементах каркаса. В частности, при разработке проектов высотных зданий, возводимых в Москве, со стальным или железобетонным каркасом с жесткой арматурой расчет температурного поля элементов каркаса дал возможность конструкторам более точно рассчитать напряжения в материале каркаса.

Ниже даются практические методы расчета температурных полей.

1. ПЛОСКОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ

Плоским температурным полем называется такое поле, в котором температура изменяется только в направлении осей x и y, а в направлении оси z остается постоянной. В ограждающих конструкциях зданий плоское температурное поле характерно при наличии в них элементов каркаса, прокладных рядов, перемычек и пр., когда их протяженность значительно превышает толщину ограждения. В этом случае, принимая длину элементов каркаса бесконечно большой, будем иметь плоское температурное поле, в котором распределение температуры во всех плоскостях, параллельных плоскости поперечного сечения рассматриваемого элемента, будет одинаково.

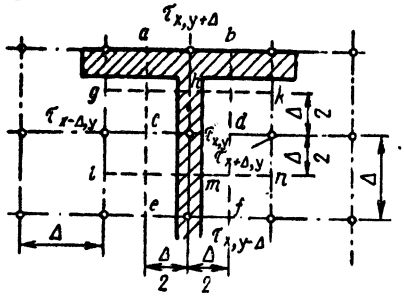


Рис. 21. Схема наложения квадратной сетки при расчете температурного поля колонны двутаврового сечения

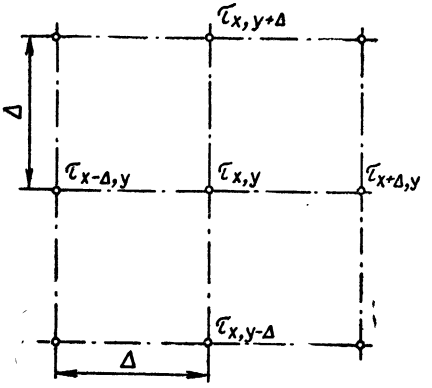


Рис. 20. Схема для расчета плоского температурного поля при наложении квадратной сетки

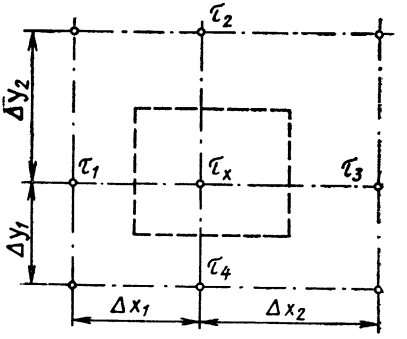


Рис. 22. Схема для расчета плоского температурного поля при наложении прямоугольной неравномерной сетки

Дифференциальное уравнение плоского температурного поля приведено в главе I [уравнение (4)]. Интегрирование этого уравнения в общем виде представляет весьма сложную задачу, которая еще более усложняется наличием в пределах поля материалов с различными коэффициентами теплопроводности. Задача значительно упрощается при решении уравнения (4) в конечных разностях. При этом дифференциальное уравнение заменяется системой обыкновенных линейных уравнений, неизвестными в которых будут значения искомой функции в точках

Материал	Объемный вес γ в сухом состоянии в $кг/м^3$	Коэффициент теплопроводности λ, $ккал/м \cdot ч \cdot град$	Удельная теплоемкость c, $ккал/кг \cdot град$	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$, $м^2/ч$	Коэффициент теплоусвоения s (при $Z=24$ ч), $ккал/м^2 \cdot ч \cdot град$	Коэффициент паропроницаемости $\mu \cdot 10^6$, $г/м \cdot ч \cdot мм\ рт.\ ст.$
Саманные	1600	0,6	0,25	1,5	7,9	2,3
Смазка глино-песчаная	1800	0,6	0,2	1,67	7,5	1,3
Смазка глино-шлаковая	1300	0,45	0,19	1,82	5,4	2
Смазка глино-соломенная	1000	0,3	0,25	1,2	4,4	2,5
Смазка глино-опилочная	800	0,25	0,3	1,04	3,95	2,5
Грунт растительный под зданием	1800	1	0,2	2,78	9,7	—
Сухой песок (в засыпке)	1600	0,5	0,2	1,56	6,45	2,2
Засыпки теплоизоляционные						
Шлак топливный	1000	0,25	0,18	1,39	3,4	2,6
То же	700	0,19	0,18	1,51	2,5	2,9
Шлак доменный гранулированный	500	0,14	0,18	1,56	1,81	3
Керамзит	500	0,18	0,21	1,8	2,16	4
»	300	0,13	0,21	2,06	1,46	5
Трепел, диатомит	600	0,15	0,2	1,25	1,84	4
Дерево						
Сосна и ель поперек волокон	550	0,15	0,6	0,45	3,6	0,82
Сосна и ель вдоль волокон	550	0,3	0,6	0,91	5,05	4,3
Дуб поперек волокон	800	0,2	0,6	0,42	5	0,75
» вдоль волокон	800	0,35	0,6	0,73	6,6	4
Опилки древесные	250	0,08	0,6	0,53	1,75	3,5
Фибролит цементный	600	0,2	0,55	0,61	4,15	1,4
То же	350	0,13	0,5	0,74	2,44	3,5
Фанера клееная	600	0,15	0,6	0,42	3,75	0,3
Листы древесноволокнистые (сухая штукатурка)	700	0,18	0,6	0,43	4,45	1

поля, лежащих в узлах сетки, составленной из квадратиков со стороной принятого размера Δ.

В конечных разностях уравнение (4) имеет вид:

$$\tau_{\overline{xx}} + \tau_{\overline{yy}} = 0,$$

где $\tau_{\overline{xx}}$ и $\tau_{\overline{yy}}$ — вторые конечные разности функции τ соответственно по x и по y.

Выписывая их подробно, получим (рис. 20):

$$\frac{1}{\Delta^2}(\tau_{x+\Delta,y} - 2\tau_{x,y} + \tau_{x-\Delta,y}) + \frac{1}{\Delta^2}(\tau_{x,y+\Delta} - 2\tau_{x,y} + \tau_{x,y-\Delta}) = 0,$$

откуда, решая полученное уравнение относительно $\tau_{x,y}$, будем иметь:

$$\tau_{x,y} = \frac{\tau_{x+\Delta,y} + \tau_{x-\Delta,y} + \tau_{x,y+\Delta} + \tau_{x,y-\Delta}}{4}, \qquad (32)$$

т. е. в однородном поле температура в каждом узле сетки должна равняться средней арифметической температур четырех соседних узлов.

Если поле неоднородно, т. е. в нем имеются материалы с различными коэффициентами теплопроводности, поступаем следующим образом. Накладываем на исследуемую конструкцию квадратную сетку с расстояниями между ее узлами Δ таким образом, чтобы узлы сетки располагались по возможности в тех точках, в которых требуется определять температуру. Кроме того, направление одних нитей сетки должно быть параллельным, а других — перпендикулярным основному направлению теплового потока. На рис. 21 приведен пример наложения сетки на стальную колонну двутаврового сечения. Вертикальные нити сетки направлены параллельно оси колонны; одна из горизонтальных нитей совпадает с наружной поверхностью полки двутавра.

Рассмотрим узел с температурой $\tau_{x,y}$. Квадрат, в центре которого находится этот узел, получает (или отдает) тепло в направлении к точкам, расположенным в четырех соседних узлах сетки, имеющих температуры $\tau_{x-\Delta,y}$, $\tau_{x,y+\Delta}$, $\tau_{x+\Delta,y}$ и $\tau_{x,y-\Delta}$. Количество тепла, которым обменивается с окружающим материалом квадрат, вырезанный вокруг точки x, y, будет зависеть не только от температуры соседних узлов, но и от величины коэффициентов теплопередачи в направлении нитей сетки между точкой x, y и этими точками. Обозначив коэффициенты теплопередачи буквами k с соответствующими индексами, получим:

количество тепла, передаваемого в направлении от узла x, y к узлу с температурой $\tau_{x-\Delta,y}$;

$$Q_1 = (\tau_{x,y} - \tau_{x-\Delta,y})\, k_{x-\Delta};$$

Материал	Объемный вес γ в сухом состоянии в *кг/м³*	Коэффициент теплопроводности λ, *ккал/м·ч·град*	Удельная теплоемкость c, *ккал/кг·град*	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$, *м²/ч*	Коэффициент теплоусвоения s (при $Z=24$ ч), *ккал/м²·ч·град*	Коэффициент паропроницаемости $\mu \cdot 10^3$, *г/м·ч·мм рт. ст.*
Плиты древесно-волокнистые . . .	800	0,16	0,6	0,333	4,45	1,5
То же	600	0,14	0,6	0,39	3,6	1,5
»	250	0,065	0,6	0,43	1,6	3,2
Плиты пробковые . .	250	0,06	0,5	0,48	1,4	0,5
Камни естественные и кладки из них						
Мрамор, гранит, базальт	2800	3	0,22	4,87	21,9	0,15
Песчаники и кварциты	2400	1,75	0,22	3,32	15,5	0,5
Известняки	2000	1	0,22	2,27	10,7	0,8
»	1700	0,8	0,22	2,14	8,8	1
Известняк-ракушечник	1400	0,55	0,22	1,79	6,65	2
Туфы вулканические .	1600	0,4	0,22	1,14	5,75	1,1
То же	1300	0,3	0,22	1,58	4,5	1,3
Кладка из камней неправильной формы на тяжелом растворе:						
при $\gamma_{камня} = 2800$ *кг/м³* .	2420	2,21	0,22	4,15	17,5	0,55
при $\gamma_{камня} = 2000$ *кг/м³*	1900	0,91	0,22	2,18	9,95	0,98
при $\gamma_{камня} = 1200$ *кг/м³*	1380	0,52	0,22	1,71	6,4	1,62
Кирпичная кладка						
Из глиняного кирпича на тяжелом растворе	1800	0,7	0,21	1,85	8,3	1,4
То же, на легком растворе	1700	0,65	0,21	1,82	7,75	1,6
Из силикатного кирпича на тяжелом растворе	1900	0,75	0,2	1,97	8,6	1,4

количество тепла, передаваемого в направлении от узла x, y к узлу с температурой $\tau_{x,y+\Delta}$;

$$Q_2 = (\tau_{x,y} - \tau_{x,y+\Delta})\, k_{y+\Delta};$$

количество тепла, передаваемого в направлении от узла x, y к узлу с температурой $\tau_{x+\Delta,y}$;

$$Q_3 = (\tau_{x,y} - \tau_{x+\Delta,y})\, k_{x+\Delta};$$

количество тепла, передаваемого в направлении от узла x, y к узлу с температурой $\tau_{x,y-\Delta}$;

$$Q_4 = (\tau_{x,y} - \tau_{x,y-\Delta})\, k_{y-\Delta}.$$

Из условия теплового баланса сумма этих количеств тепла должна быть равна нулю, т. е.

$$(\tau_{x,y} - \tau_{x-\Delta,y})\, k_{x-\Delta} + (\tau_{x,y} - \tau_{x,y+\Delta})\, k_{y+\Delta} + (\tau_{x,y} - \tau_{x+\Delta,y})\, k_{x+\Delta} + (\tau_{x,y} - \tau_{x,y-\Delta})\, k_{y-\Delta} = 0.$$

Решая это уравнение относительно $\tau_{x,y}$, получим окончательно

$$\tau_{x,y} = \frac{k_{x-\Delta}\tau_{x-\Delta,y} + k_{y+\Delta}\tau_{x,y+\Delta} + k_{x+\Delta}\tau_{x+\Delta,y} + k_{y-\Delta}\tau_{x,y-\Delta}}{k_{x-\Delta} + k_{y+\Delta} + k_{x+\Delta} + k_{y-\Delta}}. \quad (33)$$

Это и есть общая формула для вычисления температуры во всех узлах сетки.

В частном случае, если все четыре квадрата, примыкающие к узлу с температурой $\tau_{x,y}$, лежат в пределах одного материала (однородное температурное поле), то $k_{x-\Delta} = k_{y+\Delta} = k_{x+\Delta} = k_{y-\Delta}$ и в этом случае формула (33) обращается в формулу (32).

Коэффициенты теплопередачи между узлами сетки определяются следующим образом (см. рис. 21). Принимаем, что от узла с температурой $\tau_{x,y}$ к узлу с температурой $\tau_{x,y+\Delta}$ передача тепла происходит только по квадрату *abdc*. Тогда коэффициент теплопередачи $k_{y+\Delta}$ определится как величина, обратная сопротивлению теплопередаче квадрата *abdc*. Сопротивление теплопередаче этого квадрата определяется как ограждение, в котором однородность материала нарушена в перпендикулярном и параллельном тепловому потоку направлениях.

Передача тепла от узла с температурой $\tau_{x,y}$ к узлу с температурой $\tau_{x+\Delta,y}$ происходит по квадрату *hknm*, а к узлу с температурой $\tau_{x-\Delta,y}$ — по квадрату *ghml*. Сопротивление теплопередаче этих квадратов определяется, как для двухслойной стены.

В направлении к узлу с температурой $\tau_{x,y-\Delta}$ передача тепла происходит по квадрату *cdfe*, сопротивление теплопередаче которого определяется, как для стены, состоящей из двух материалов, каждый из которых имеет толщину, равную толщине стены.

Для квадратов, в которые входит только один материал, $k =$

Материал	Объемный вес γ в сухом состоянии в *кг/м³*	Коэффициент теплопроводности λ, *ккал/м·ч·град*	Удельная теплоемкость c, *ккал/кг·град*	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^3$, *м²/ч*	Коэффициент теплоусвоения s (при Z=24 *ч*), *ккал/м²·ч·град*	Коэффициент паропроницаемости $\mu \cdot 10^3$ *г/м·ч·мм рт.ст.*
Из пористого кирпича на легком растворе при $\gamma_{кирп}$ = =1300 *кг/м³* . . .	1350	0,5	0,21	1,76	6,05	2
Из трепельного кирпича при $\gamma_{кирп}$ = =1000 *кг/м³* . . .	1200	0,45	0,21	1,79	5,45	2,5
Из семищелевого кирпича	1400	0,55	0,21	1,87	6,5	1,8
Металлы						
Сталь строительная .	7850	50	0,115	55,5	108,4	0
Чугун	7200	43	0,115	51,9	96,4	0
Алюминий	2600	190	0,2	365	160	0
Органические волокнистые материалы						
Соломит и плиты страмит	250	0,09	0,4	0,9	1,53	6
Камышит	350	0,12	0,4	0,85	2,1	6
Войлок строительный	150	0,05	0,4	0,83	0,88	4,5
Пакля	150	0,06	0,4	1	0,97	6,5
Торфоизоляционные плиты	200	0,055	0,4	0,69	1,07	2,56
Пластмассы и полимеры						
Мипора	20	0,045	0,35	6,43	0,29	7,5
Пенопласт ПХВ-1 . .	125	0,05	0,3	1,33	0,7	—
Пенопласт ПС . . .	70	0,04	0,35	1,63	0,5	—
Пенополистирол . .	30	0,04	0,35	3,81	0,33	0,8
Растворы и штукатурки						
Цементно-песчаный раствор	1800	0,8	0,2	2,22	8,65	1,2
Сложный раствор . .	1700	0,75	0,2	2,21	8,15	1,3
Известково-песчаный раствор	1600	0,7	0,2	2,19	7,65	1,6

Материал	Объемный вес γ в сухом состоянии в *кг/м³*	Коэффициент теплопроводности λ, *ккал/м·ч·град*	Удельная теплоемкость c, *ккал/кг·град*	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^3$, *м²/ч*	Коэффициент теплоусвоения s (при $Z=24$ *ч*), *ккал/м²·ч·град*	Коэффициент паропроницаемости $\mu \cdot 10^3$, *г/м·ч·мм рт. ст.*
Легкий шлаковый раствор	1450	0,6	0,18	2,3	6,4	1,5
Штукатурка известковая по драни на наружной поверхности	1400	0,6	0,25	1,71	7,4	1,6
То же, на внутренней поверхности	1400	0,45	0,25	1,29	6,4	1,6
Рулонные материалы						
Линолеум	1100	0,16	0,35	0,415	4	0,02
Картон плотный	1000	0,2	0,35	0,57	4,25	0,83
То же	700	0,15	0,35	0,61	3,1	1,25
Релин	1200	0,19	0,35	0,45	4,55	0,02
Рубероид, пергамин, толь	600	0,15	0,35	0,71	2,85	См. табл. 24
Стекло						
Стекло оконное	2500	0,7	0,2	1,4	9,3	0
Вата стеклянная	100	0,05	0,2	2,5	0,51	6,5
Газостекло или пеностекло	400	0,12	0,2	1,5	1,58	0,3
То же	200	0,1	0,2	2,5	1,02	0,4
Снег, лед и вода						
Лед	900	2	0,5	4,45	15,3	—
Снег свежевыпавший:	200	0,09	0,5	0,9	1,53	—
» уплотненный	350	0,3	0,5	1,72	3,7	—
» в начале таяния	500	0,55	0,5	2,2	5,95	—
Вода	1000	0,47	1	0,47	11,1	—

$=\lambda/\Delta$, где λ — коэффициент теплопроводности материала, Δ — расстояние между узлами сетки в *м*.

Если узел с температурой $\tau_{x,y}$ лежит в плоскости, граничащей с воздушной средой, то коэффициент теплопередачи к воздуху будет равен соответствующей величине коэффициента тепловосприятия $\alpha_в$ или теплоотдачи $\alpha_н$. В этом случае величины k к соседним узлам, лежащим в этой плоскости, берутся с коэффициентом 0,5 на основании того, что в направлении к этим узлам передача тепла по материалу будет происходить только по площади, равной половине квадрата сетки, а по воздуху, в котором окажется вторая половина квадрата, передачи тепла не будет.

Иногда удобнее для расчета температурного поля пользоваться прямоугольной сеткой (рис. 22). Располагая нити сетки более густо в области поля, в которой нас наиболее интересует распределение температуры, например в местах теплопроводных включений, и более редко в остальной области поля, удается значительно сократить число узлов сетки, а следовательно, и число расчетных уравнений.

При прямоугольной сетке коэффициенты теплопередачи между узлами определяются с учетом площади, по которой передается тепло; размер поля в направлении оси z принимается равным 1 *м*. При этом, если узлы сетки лежат в области одного материала, имеющего коэффициент теплопроводности λ (однородное поле), то по рис. 22 получим следующие значения величин коэффициентов теплопередачи между узлом с температурой τ_x и соседними узлами:

к узлу 1 — площадь теплопередачи будет: $F_1 = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2}$;

коэффициент теплопередачи $k_{x-1} = \frac{\lambda}{\Delta x_1} F_1$;

к узлу 2 — $F_2 = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{2}$; $k_{x-2} = \frac{\lambda}{\Delta y_2} F_2$;

к узлу 3 — $F_3 = F_1$; $k_{x-3} = \frac{\lambda}{\Delta x_2} F_3$;

к узлу 4 — $F_4 = F_2$; $k_{x-4} = \frac{\lambda}{\Delta y_4} F_4$.

Если поле неоднородно, то коэффициенты теплопередачи между узлами сетки определяются так же, как и при квадратной сетке, но с умножением их на соответствующие площади теплопередачи F в $м^2$. При этом размерность коэффициентов теплопередачи между узлами прямоугольной сетки будет *ккал/ч·град*.

Расчеты температурного поля делаются методом итерации следующим образом. Предварительно задаются некоторыми произвольными значениями температур во всех узлах сетки. Затем по формуле (33) последовательно вычисляют значения температур во всех узлах, заменяя полученными значениями температур предыдущие до тех пор, пока в каждом узле сетки поля температура не станет удовлетворять соответствующим уравне-

ниям при заданных температурах воздуха с одной и с другой стороны ограждения. Процесс расчета можно считать законченным только тогда, когда в пределах заданной точности температуры остаются постоянными во всех узлах сетки. Продолжительность расчета зависит от того, насколько правильно были заданы начальные температуры.

Температурное поле, полученное для данных значений температур внутреннего и наружного воздуха, легко пересчитывается и для других значений этих температур на основании того, что разность температур любой точки поля и внутреннего или наружного воздуха изменяется пропорционально изменению разности температур внутреннего и наружного воздуха.

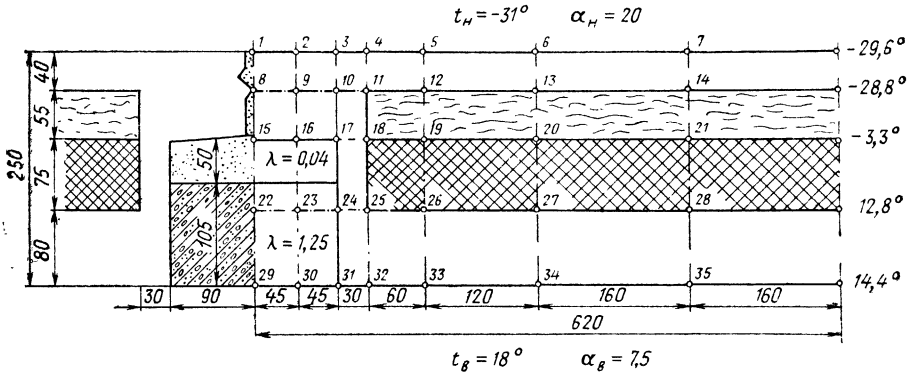


Рис. 23. Расчетная схема температурного поля стыка наружных стеновых панелей

Пример 16. Произвести расчет температурного поля вертикального стыка панелей стены, рассмотренной в примере 5. Расчетная схема стыка дана на рис. 23.

Для расчета температурного поля накладываем на горизонтальное сечение стыка прямоугольную неравномерную сетку, располагая горизонтальные нити сетки по плоскостям раздела материалов панели, а вертикальные от оси симметрии стыка более часто у самого́ стыка и далее — более редко (см. рис. 23). Полагая, что на расстоянии двух толщин стены от стыка распределение температуры по толщине стены не нарушается, берем протяженность поля от оси стыка равной: $120+250\cdot2=620$ *мм*. На этом расстоянии принимаем распределение температуры по толщине стены по данным рис. 13, приведенного в примере 12.

Принимаем температуры воздуха: внутреннего $t_в = 18°$ С, наружного $t_н = -31°$ С. Коэффициенты теплопроводности материалов берем из примера 5, причем для фибролита в направлении, параллельном поверхности стены, принимаем $\lambda = 0{,}26$, т. е. в 2 раза большим, учитывая его анизотропное строение. В полость стыка заложен слой стиропора толщиной 50 *мм*, имеющего коэффициент теплопроводности $\lambda = 0{,}04$. Остальная часть полости стыка заполнена бетоном с $\lambda = 1{,}25$ *ккал/м·ч·град*.

Ниже приводится вывод расчетных формул для пяти наиболее характерных узлов сетки.

Узел 1. Теплопередача от этого узла к наружному воздуху происходит

КОЭФФИЦИЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ C, ккал/м²·ч·°К⁴

Материал	Состояние поверхности	C
Асбестоцемент	Шероховатая	4,75
Бетон	»	3,1
Гипс	»	4,48
Дерево (ель)	Строганая	3,82
» (дуб)	»	4,44
Кирпич глиняный обыкновенный	Шероховатая	4,61
Мрамор	Полированная	4,62
Песчаник красный	Гладкошлифованная	2,86
Гранит	Полированная	2,1
Известняк доломитовый	Гладкошлифованная	1,96
Краска масляная	—	4
Плитки метлахские	Гладкая	3,3
Алюминий	Неполированная	0,22
»	Окисленная	0,55
Бронзировка алюминием	Шероховатая	3
Сталь листовая	Черная матовая	3,4
То же	Оцинкованная	1,13
Резина мягкая серая	Шероховатая	4,25
Сажа голландская на жидком стекле	Матовая	4,76
Стекло оконное	Гладкая	4,65
Толь кровельный	Шероховатая	4,52
Цементный раствор	Гладкая	3,35
Шлакобетон	Шероховатая	4,46
Штукатурка известковая	»	4,5
Эмалевая краска	»	4,45

по площади $F=0{,}045$ $м^2$. При $\alpha_н=20$ коэффициент теплопередачи к наружному воздуху будет $k_{1-t_н}=20\cdot0{,}045=0{,}9$ *ккал/ч·град*.

К узлу *2* теплопередача по железобетону происходит по площади $F=0{,}02$:

$$k_{1-2}=\frac{1{,}4}{0{,}045}\,0{,}02=0{,}62.$$

К узлу *8* — по площади $F=0{,}045$; $k_{1-8}=\dfrac{1{,}4}{0{,}04}\;0{,}045=1{,}58$.

По формуле (33) для узла *1* получим следующую расчетную формулу:

$$\tau_1=\frac{0{,}9\,t_н+2\cdot0{,}62\tau_2+1{,}58\tau_8}{3{,}72}=0{,}242t_н+0{,}333\tau_2+0{,}425\tau_8.$$

Так как узел *1* лежит на оси симметрии стыка, температура τ_2 взята дважды, учитывая, что слева от узла *1* расположен на таком же расстоянии узел *2*.

Узел 11. Теплопередача к узлу 4 — по площади

$$F=\frac{0{,}03+0{,}06}{2}=0{,}045\ м^2,\quad k_{11-4}=\frac{1{,}4}{0{,}04}\;0{,}045=1{,}58.$$

К узлу 10 — по площади $F=\dfrac{0{,}04+0{,}055}{2}=0{,}0475$ $м^2$;

$$k_{11-10}=\frac{1{,}4}{0{,}03}\,0{,}0475=2{,}22.$$

К узлу 12 — по площади $F=0{,}0475$; здесь теплопередача происходит по железобетону и по минераловатной плите, поэтому сначала определяем их средний коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{ср}=\frac{1{,}4\cdot40+0{,}06\cdot55}{95}=0{,}62,$$

следовательно,

$$k_{11-12}=\frac{0{,}62}{0{,}06}\,0{,}0475=0{,}49.$$

К узлу 18 — $F=0{,}045$;

$$\lambda_{ср}=\frac{1{,}4\cdot30+0{,}06\cdot60}{90}=0{,}505;\quad k_{11-18}=\frac{0{,}505}{0{,}055}\,0{,}045=0{,}415.$$

По формуле (33) для температуры узла 11 получим:

$$\tau_{11}=\frac{1{,}58\tau_4+2{,}22\tau_{10}+0{,}49\tau_{12}+0{,}415\tau_{18}}{4{,}705}=0{,}336\tau_4+0{,}472\tau_{10}+$$
$$+0{,}104\tau_{12}+0{,}088\tau_{18}.$$

Узел 17. К узлу 10 — $F=\dfrac{0{,}045+0{,}03}{2}=0{,}0375$ $м^2$;

$$k_{17-10}=\frac{1{,}4}{0{,}055}\,0{,}0375=0{,}95.$$

К узлу 16 — $F=\dfrac{0{,}055+0{,}075}{2}=0{,}065$ $м^2$;

$$\lambda_{ср} = \frac{1{,}45 \cdot 55 + 0{,}04 \cdot 75}{130} = 0{,}615;\ k_{16-15} = \frac{0{,}615}{0{,}045}\,0{,}065 = 0{,}89.$$

К узлу 18 — $F = 0{,}065$ *м*²; $k_{17-18} = \frac{1{,}4}{0{,}03}\,0{,}065 = 3{,}04$.

К узлу 24 — $F = 0{,}0375$ *м*²; сначала определяем R слева от нити 17—24: $R' = \frac{0{,}05}{0{,}04} + \frac{0{,}025}{1{,}25} = 1{,}27$; справа от нити 17—24 $R' = \frac{0{,}075}{1{,}4} = 0{,}0535$; по формуле (22) получим

$$R_{17-24} = \frac{45 + 30}{\frac{45}{1{,}27} + \frac{30}{0{,}0535}} = 0{,}126;\ k_{17-24} = \frac{1}{0{,}126}\,0{,}0375 = 0{,}298.$$

$$\tau_{17} = \frac{0{,}95\tau_{10} + 0{,}89\tau_{16} + 3{,}04\tau_{18} + 0{,}298\tau_{24}}{5{,}178} = 0{,}184\tau_{10} + 0{,}172\tau_{16} + \\ + 0{,}587\tau_{18} + 0{,}057\tau_{24}.$$

Узел 31. К узлу 24 — $F = 0{,}0375$ *м*²;

$$\lambda_{ср} = \frac{1{,}25 \cdot 45 + 1{,}4 \cdot 30}{75} = 1{,}31;\ k_{31-24} = \frac{1{,}31}{0{,}08}\,0{,}0375 = 0{,}615.$$

К узлу 30—$F = 0{,}04$;

$$k_{31-30} = \frac{1{,}25}{0{,}045}\,0{,}04 = 1{,}11.$$

К узлу 32

$$k_{31-32} = \frac{1{,}4}{0{,}03}\,0{,}04 = 1{,}87.$$

К внутреннему воздуху $k_{31-t_в} = 7{,}5 \cdot 0{,}0375 = 0{,}282$.

$$\tau_{31} = \frac{0{,}615\tau_{24} + 1{,}11\tau_{30} + 1{,}87\tau_{32} + 0{,}282t_в}{3{,}877} = 0{,}159\tau_{24} + 0{,}286\tau_{30} + \\ + 0{,}482\tau_{32} + 0{,}073t_в.$$

Узел 35. К узлу 28 — $F = 0{,}16$ *м*²;

$$k_{35-28} = \frac{1{,}4}{0{,}08}\,0{,}16 = 2{,}8.$$

К узлам 34 и узлу с $\tau = 14{,}4°$ С

$$k_{35-34} = \frac{1{,}4}{0{,}16}\,0{,}04 = 0{,}35.$$

К внутреннему воздуху $k_{35-t_в} = 7{,}5 \cdot 0{,}16 = 1{,}2$:

$$\tau_{35} = \frac{2{,}8\tau_{28} + 0{,}35\tau_{34} + 1{,}2t_в + 0{,}35 \cdot 14{,}4}{4{,}7} = 0{,}595\tau_{28} + 0{,}075\tau_{34} + \\ + 0{,}255t_в + 1{,}08° \text{ С}.$$

Аналогично изложенному получим расчетные формулы для остальных 30 узлов сетки:
Узел *2*: $\tau_2 = 0{,}242\,t_н + 0{,}167\,(\tau_1 + \tau_3) + 0{,}424\tau_9$.
Узел *3*: $\tau_3 = 0{,}208\,t_н + 0{,}171\,\tau_2 + 0{,}259\,\tau_4 + 0{,}362\,\tau_{10}$.

ДАВЛЕНИЕ (МАКСИМАЛЬНАЯ УПРУГОСТЬ) НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА *E* в *мм рт. ст.* ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР ПРИ *B*=755 *мм*

А. ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР ОТ 0 ДО —45° С (НАД ЛЬДОМ)

t°	*E* в *мм*	*t*°	*E* в *мм*	*t*°	*E* в *мм*	*t*°	*E* в *мм*	*t*°	*E* в *мм*
0	4,58	—5,4	2,91	—10,6	1,84	—16	1,13	—23	0,58
—0,2	4,51	—5,6	2,86	—10,8	1,81	—16,2	1,11	—23,5	0,55
—0,4	4,44	—5,8	2,81	—11	1,78	—16,4	1,09	—24	0,52
—0,6	4,36	—6	2,76	—11,2	1,75	—16,6	1,07	—24,5	0,49
—0,8	4,3	—6,2	2,72	—11,4	1,72	—16,8	1,05	—25	0,47
—1	4,22	—6,4	2,67	—11,6	1,69	—17	1,03	—25,5	0,45
—1,2	4,15	—6,6	2,63	—11,8	1,66	—17,2	1,01	—26	0,42
—1,4	4,08	—6,8	2,58	—12	1,63	—17,4	0,99	—27	0,38
—1,6	4,01	—7	2,53	—12,2	1,6	—17,6	0,97	—28	0,34
—1,8	3,95	—7,2	2,49	—12,4	1,57	—17,8	0,96	—29	0,31
—2	3,88	—7,4	2,45	—12,6	1,55	—18	0,94	—30	0,28
—2,2	3,82	—7,6	2,41	—12,8	1,52	—18,2	0,92	—31	0,252
—2,4	3,75	—7,8	2,36	—13	1,49	—18,4	0,9	—32	0,227
—2,6	3,69	—8	2,32	—13,2	1,46	—18,6	0,88	—33	0,205
—2,8	3,63	—8,2	2,28	—13,4	1,43	—18,8	0,87	—34	0,185
—3	3,57	—8,4	2,24	—13,6	1,41	—19	0,85	—35	0,167
—3,2	3,51	—8,6	2,2	—13,8	1,38	—19,2	0,83	—36	0,15
—3,4	3,45	—8,8	2,17	—14	1,36	—19,4	0,82	—37	0,134
—3,6	3,39	—9	2,13	—14,2	1,34	—19,6	0,8	—38	0,119
—3,8	3,34	—9,2	2,09	—14,4	1,31	—19,8	0,79	—39	0,105
—4	3,28	—9,4	2,05	—14,6	1,29			—40	0,093
—4,2	3,22	—9,6	2,01	—14,8	1,26	—20	0,77	—41	0,082
—4,4	3,17	—9,8	1,98	—15	1,24	—20,5	0,74	—42	0,072
—4,6	3,11			—15,2	1,22	—21	0,7	—43	0,063
—4,8	3,06	—10	1,95	—15,4	1,19	—21,5	0,67	—44	0,055
—5	3,01	—10,2	1,91	—15,6	1,17	—22	0,64	—45	0,048
—5,2	2,96	—10,4	1,88	—15,8	1,15	—22,5	0,61		

Б. ДЛЯ ТЕМПЕРАТУР ОТ 0 до 50° С

t°	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	*t*°
0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,72	4,75	4,79	4,82	4,86	4,89	0
1	4,93	4,96	5	5,03	5,07	5,11	5,14	5,18	5,22	5,26	1
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,49	5,53	5,57	5,61	5,65	2
3	5,69	5,73	5,77	5,81	5,85	5,89	5,93	5,97	6,02	6,06	3
4	6,1	6,14	6,19	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,5	4
5	6,54	6,59	6,64	6,68	6,73	6,78	6,82	6,87	6,92	6,97	5
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46	6
7	7,51	7,57	7,62	7,67	7,72	7,78	7,83	7,88	7,94	7,99	7
8	8,05	8,1	8,16	8,21	8,27	8,32	8,38	8,44	8,49	8,55	8
9	8,61	8,67	8,73	8,79	8,85	8,91	8,97	9,03	9,09	9,15	9
10	9,21	9,27	9,33	9,4	9,46	9,52	9,59	9,65	9,71	9,78	10
11	9,84	9,91	9,98	10,04	10,11	10,18	10,24	10,31	10,38	10,45	11
12	10,52	10,59	10,66	10,73	10,8	10,87	10,94	11,01	11,09	11,16	12
13	11,23	11,31	11,38	11,45	11,53	11,6	11,68	11,76	11,83	11,91	13
14	11,99	12,07	12,14	12,22	12,3	12,38	12,46	12,54	12,62	12,71	14

Узел *4*: $\tau_4=0{,}232\ t_н+0{,}241\ \tau_3+0{,}12\ \tau_5+0{,}407\ \tau_{11}$.
Узел *5*: $\tau_5=0{,}319\ t_н+0{,}082\ \tau_4+0{,}041\ \tau_6+0{,}558\ \tau_{12}$.
Узел *6*: $\tau_6=0{,}345\ t_н+0{,}029\ \tau_5+0{,}022\ \tau_7+0{,}605\ \tau_{13}$.
Узел *7*: $\tau_7+0{,}35\ t_н+0{,}019\ \tau_6+0{,}612\ \tau_{14}$—0,6° С.
Узел *8*: $\tau_8=0{,}278\ \tau_1+0{,}52\ \tau_9+0{,}202\ \tau_{15}$.
Узел *9*: $\tau_9=0{,}278\ \tau_2+0{,}26(\tau_8+\tau_{10})+0{,}202\ \tau_{16}$.
Узел *10*: $\tau_{10}=0{,}22\ \tau_3+0{,}247\ \tau_9+0{,}373\ \tau_{11}+0{,}16\ \tau_{17}$.
Узел *12*: $\tau_{12}=0{,}791\ \tau_5+0{,}123\ \tau_{11}+0{,}062\ \tau_{13}+0{,}025\ \tau_{19}$.
Узел *13*: $\tau_{13}=0{,}893\ \tau_6+0{,}045\ \tau_{12}+0{,}034\ \tau_{14}+0{,}028\ \tau_{20}$.
Узел *14*: $\tau_{14}=0{,}912\ \tau_7+0{,}03\ \tau_{13}+0{,}028\ \tau_{21}$—0,86° С.
Узел *15*: $\tau_{15}=0{,}388\ \tau_8+0{,}6\ \tau_{16}+0{,}012\ \tau_{22}$.
Узел *16*: $\tau_{16}=0{,}388\ \tau_9+0{,}3(\tau_{15}+\tau_{17})+0{,}012\ \tau_{23}$.
Узел *18*: $\tau_{18}=0{,}104\ \tau_{11}+0{,}764\ \tau_{17}+0{,}048\ \tau_{19}+0{,}084\ \tau_{25}$.
Узел *19*: $\tau_{19}=0{,}182\ \tau_{12}+0{,}352\ \tau_{18}+0{,}176\ \tau_{20}+0{,}29\ \tau_{26}$.
Узел *20*: $\tau_{20}=0{,}272\ \tau_{13}+0{,}17\ \tau_{19}+0{,}126\ \tau_{21}+0{,}432\ \tau_{27}$.
Узел *21*: $\tau_{21}=0{,}295\ \tau_{14}+0{,}12\ \tau_{20}+0{,}465\ \tau_{28}$— 0,4° С.
Узел *22*: $\tau_{22}=0{,}008\ \tau_{15}+0{,}832\ \tau_{23}+0{,}16\ \tau_{29}$.
Узел *23*: $\tau_{23}=0{,}008\ \tau_{16}+0{,}416(\tau_{22}+\tau_{24})+0{,}16\ \tau_{30}$.
Узел *24*: $\tau_{24}=0{,}047\ \tau_{17}+0{,}286\ \tau_{23}+0{,}57\ \tau_{25}+0{,}097\ \tau_{31}$.
Узел *25*: $\tau_{25}=0{,}057\ \tau_{18}+0{,}62\ \tau_{24}+0{,}187\ \tau_{26}+0{,}136\ \tau_{32}$.
Узел *26*: $\tau_{26}=0{,}046\ \tau_{19}+0{,}324\ \tau_{25}+0{,}162\ \tau_{27}+0{,}468\ \tau_{33}$.
Узел *27*: $\tau_{27}=0{,}066\ \tau_{20}+0{,}15\ \tau_{26}+0{,}112\ \tau_{28}+0{,}672\ \tau_{34}$.
Узел *28*: $\tau_{28}=0{,}071\ \tau_{21}+0{,}105\ \tau_{27}+0{,}719\ \tau_{35}+1{,}35$° С.
Узел *29*: $\tau_{29}=0{,}215\ \tau_{22}+0{,}681\ \tau_{30}+0{,}104\ t_в$.
Узел *30*: $\tau_{30}=0{,}215\ \tau_{23}+0{,}34(\tau_{29}+\tau_{31})+0{,}104\ t_в$.
Узел *32*: $\tau_{32}=0{,}202\ \tau_{25}+0{,}475\ \tau_{31}+0{,}237\ \tau_{33}+0{,}086\ t_в$.
Узел *33*: $\tau_{33}=0{,}432\ \tau_{26}+0{,}255\ \tau_{32}+0{,}128\ \tau_{34}+0{,}185\ t_в$.
Узел *34*: $\tau_{34}=0{,}567\ \tau_{27}+0{,}108\ \tau_{33}+0{,}081\ \tau_{35}+0{,}244\ t_в$.

Таким образом, расчет температурного поля сводится к решению 35 уравнений с 35 неизвестными. Это решение делается методом итерации (последовательными приближениями). Результаты расчета температурного поля приведены на рис. 24, где все температуры удовлетворяют расчетным формулам с точностью до 0,1° С.

Температурное поле стыка показывает, что минимальная температура, равная 9,3° С на внутренней поверхности стыка, будет против поперечных железобетонных ребер. По оси стыка температура будет на 0,5° выше, так как в полости стыка заложен слой стиропора. Наибольшее понижение температуры на внутренней поверхности стены в месте расположения стыка по сравнению с температурой поверхности на расстоянии от стыка составляет 5,1°.

Из примера 16 видно, насколько удобнее применять для расчетов прямоугольную сетку в отличие от квадратной сетки. Если при использовании прямоугольной сетки для расчета температурного поля мы имели 35 уравнений, то при квадратной сетке с расстояниями между узлами 50 *мм* пришлось бы решать $14\cdot 6=84$ уравнения.

Температурное поле дает возможность точно определить величину среднего сопротивления теплопередаче ограждения $R_{о.ср}$. Для этого вычисляется средняя температура одной из поверхностей ограждения $\tau_{ср}$. Количество тепла, проходящего через эту поверхность,

$t°$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$t°$
15	12,79	12,87	12,95	13,04	13,12	13,21	13,29	13,38	13,46	13,55	15
16	13,63	13,72	13,81	13,9	13,99	14,08	14,17	14,26	14,35	14,44	16
17	14,53	14,62	14,72	14,81	14,9	15	15,09	15,19	15,28	15,38	17
18	15,48	15,58	15,67	15,77	15,87	15,97	16,07	16,17	16,27	16,37	18
19	16,48	16,58	16,69	16,79	16,89	17	17,11	17,21	17,32	17,43	19
20	17,54	17,64	17,75	17,86	17,97	18,09	18,2	18,31	18,42	18,54	20
21	18,65	18,77	18,88	19	19,11	19,23	19,35	19,47	19,59	19,71	21
22	19,83	19,95	20,07	20,19	20,32	20,44	20,57	20,69	20,82	20,94	22
23	21,07	21,2	21,32	21,45	21,58	21,71	21,85	21,98	22,11	22,24	23
24	22,38	22,51	22,65	22,79	22,92	23,06	23,2	23,34	23,48	23,62	24
25	23,76	23,9	24,04	24,18	24,33	24,47	24,62	24,76	24,91	25,06	25
26	25,21	25,36	25,51	25,66	25,81	25,96	26,12	26,27	26,46	26,58	26
27	26,74	26,9	27,06	27,21	27,37	27,54	27,7	27,86	28,02	28,19	27
28	28,35	28,51	28,68	28,85	29,02	29,18	29,35	29,53	29,7	29,87	28
29	30,04	30,22	30,39	30,57	30,75	30,92	31,1	31,28	31,46	31,64	29
30	31,82	32,01	32,19	32,38	32,56	32,75	32,93	33,12	33,31	33,5	30
31	33,7	33,89	34,08	34,28	34,47	34,67	34,86	35,06	35,26	35,46	31
32	35,66	35,87	36,07	36,27	36,48	36,68	36,89	37,1	37,31	37,52	32
33	37,73	37,94	38,16	38,37	38,58	38,8	39,02	39,24	39,46	39,68	33
34	39,9	40,12	40,34	40,57	40,8	41,02	41,25	41,48	41,71	41,94	34
35	42,18	42,41	42,64	42,88	43,12	43,36	43,6	43,84	44,08	44,32	35
36	44,56	44,81	45,05	45,3	45,55	45,8	46,05	46,3	46,56	46,81	36
37	47,07	47,32	47,58	47,84	48,1	48,36	48,63	48,89	49,16	49,42	37
38	49,69	49,96	50,23	50,51	50,77	51,05	51,32	51,6	51,9	52,16	38
39	52,44	52,73	53,01	53,29	53,58	53,87	54,16	54,45	54,74	55,03	39
40	55,32	55,61	55,91	56,21	56,51	56,81	57,11	57,41	57,72	58,03	40
41	58,34	58,65	58,96	59,27	59,58	59,9	60,22	60,54	60,86	61,18	41
42	61,5	61,82	62,14	62,47	62,8	63,13	63,46	63,79	64,12	64,46	42
43	64,8	65,14	65,48	65,82	66,16	66,51	66,86	67,21	67,56	67,91	43
44	68,26	68,61	68,97	69,33	69,69	70,05	70,41	70,77	71,14	71,51	44
45	71,88	72,25	72,62	72,99	73,36	73,74	74,12	74,5	74,88	75,26	45
46	75,65	76,04	76,43	76,82	77,21	77,6	78	78,4	78,8	79,2	46
47	79,6	80	80,41	80,82	81,23	81,64	82,05	82,46	82,87	83,29	47
48	83,71	84,13	84,56	84,99	85,42	85,85	86,28	86,71	87,14	87,58	48
49	88,02	88,46	88,9	89,34	89,79	90,24	90,69	91,14	91,59	92,05	49
50	92,51										

Примечание. Значения, приведенные в таблицах, взяты из книги: Landolt — Börnstein, Physikalich — chemische — Tabellen, т. II. Берлин, 1923.

$$Q' = (t_{воз} - \tau_{ср})\,\alpha,$$

где $t_{воз}$ — температура воздуха около данной поверхности; α — коэффициент теплоотдачи воздух — поверхность.

С другой стороны, количество тепла, проходящего через ограждение

$$Q'' = \frac{t_в - t_н}{R_o},$$

где $t_в - t_н$ — разность температур внутреннего и наружного воздуха.

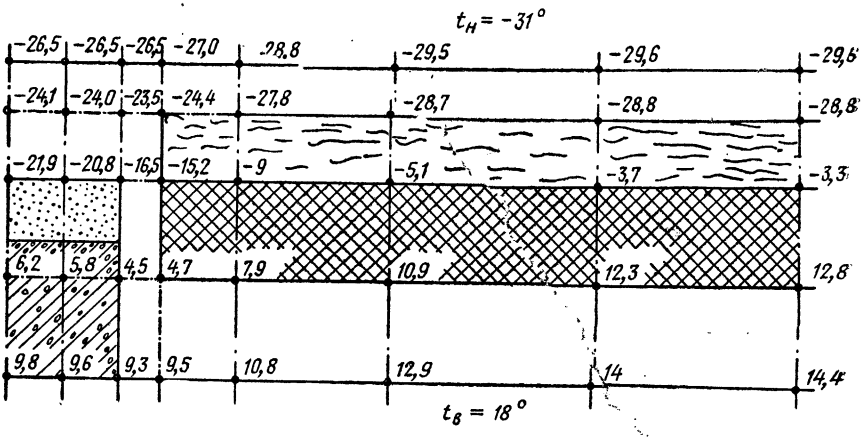


Рис. 24. Результаты расчета температурного поля вертикального стыка наружных стеновых панелей

Из условий равенства величин Q' и Q'' получим окончательно:

$$R_{о.ср} = \frac{t_в - t_н}{t_{воз} - \tau_{ср}} \cdot \frac{1}{\alpha}. \qquad (34)$$

Формула (34) дает возможность точно определить сопротивление теплопередаче любого сложного ограждения, а также ограждений, отличающихся от плоской стенки (простенки с выступами, перекрытия с кессонными потолками и пр.).

Пример 17. Определить среднее значение сопротивления теплопередаче наружной панельной стены на полосе шириной 1240 *мм* в зоне влияния вертикального стыка (см. рис. 23) по температурному полю, приведенному на рис. 24.

Учитывая симметричность стыка, определяем среднее сопротивление теплопередаче на полосе шириной 620 *мм* от оси стыка. Средняя температура внутренней поверхности стены на этой полосе (по формуле трапеций)

$$\tau_{ср} = \frac{9{,}7 \cdot 45 + 9{,}45 \cdot 45 + 9{,}4 \cdot 30 + 10{,}15 \cdot 60 + 11{,}85 \cdot 120 + 13{,}45 \cdot 160 + 14{,}2 \cdot 160}{620} =$$

$$= 12{,}3°\,С.$$

ЗНАЧЕНИЯ СОРБЦИОННЫХ ВЛАЖНОСТЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКОЛО 20° С)

Материал	Объемный вес в *кг/м*³	Весовая влажность материала в % при относительной упругости водяного пара φ, %						
		40	50	60	70	80	90	100
Асбестоцементные теплоизоляционные плиты	290	2	2,2	2,4	2,9	3,8	5,5	9,5
То же	415	2,3	2,6	2,9	3,4	4,5	6,8	13,5
Бетон тяжелый	2160	—	0,3	0,4	0,5	0,7	0,95	1,4
Войлок шерстяной	120	6,7	7,5	8,3	9,6	12,6	19,8	33,3
Газосиликат	600	2,7	3,1	3,2	3,5	4,2	6,4	15,6
»	1290	3,7	4,2	4,8	5,5	6,3	10,7	20
Глино-соломенная смазка	1350	1,5	1,9	2,25	2,75	3,35	4,15	5,3
Сосна	500	7,7	9,2	10,9	13	15,6	20,5	29,9
Сосна при t=—20° С	500	9,7	11,1	12,8	14,9	17,9	23,3	32,7
Древесноволокнистые плиты (оргалит)	200	5	5,7	7	8,9	11,5	15,8	26
Известняк	1300	0,06	0,065	0,08	0,11	0,17	0,25	0,37
Керамзитобетон	900	1	1,3	1,7	2,4	3,3	5,6	9,1
»	1000	1,9	2,4	3,1	4	5,8	8,6	13
»	1100	2,7	3	3,5	4,3	5,5	7,9	12,4
»	1180	2,5	2,9	3,4	4	5	6,8	11,8
Керамзитобетон на фенольной связке	3500	0,7	0,77	0,95	1,3	1,8	2,45	3,7
Керамзит фракции 20 *мм*	560	0,05	0,06	0,08	0,13	0,2	0,3	0,5
» фракции 0,5 *мм*	600	0,08	0,09	0,12	0,17	0,23	0,33	1,4
Кирпич глиняный	1700	0,05	0,07	0,1	0,16	0,24	0,36	0,53
» силикатный	1780	0,3	0,35	0,4	0,45	0,55	0,7	0,9
» трепельный	480	1,05	1,25	1,55	2	2,85	4,45	7,1
Минеральная вата	150	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14	0,18	0,6
Минераловатный войлок	150	0,05	0,07	0,1	0,18	0,32	0,5	0,75
Минераловатные плиты на битумной связке	350	0,25	0,3	0,4	0,55	0,75	1,1	1,9
То же, на фенольной связке	120	0,14	0,15	0,17	0,19	0,24	0,34	0,54
Мипора	18	8,8	10	10,9	12,5	16,1	24,5	35,5
Пенобетон	345	2,55	3,05	3,6	4,2	5,2	6,5	8,3
»	660	2	2,3	2,85	3,6	4,75	6,2	10

По формуле (34) получим

$$R_{\text{о.ср}} = \frac{18+31}{18-12{,}3} \cdot \frac{1}{7{,}5} = 1{,}15 \ \textit{град} \cdot \textit{м}^2 \cdot \textit{ч}/\textit{ккал}.$$

Следовательно, стык понижает сопротивление теплопередаче стены в зоне его влияния на 35% против $R_{\text{о}}$, полученного в примере 5 для сечения панели по утеплителю.

2. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ

Дифференциальное уравнение пространственного температурного поля приведено в главе I [уравнение (3)]. Решение этого уравнения в конечных разностях принципиально остается таким же, как и для плоского температурного поля, только вместо квадратной сетки поле разбивается пространственной решеткой на кубики с ребрами длиной Δ. В однородном поле температуры $\tau_{x,y,z}$ в узлах решетки должны удовлетворять условию:

$$\tau_{x,y,z} = \frac{\tau_{x+\Delta,y,z} + \tau_{x-\Delta,y,z} + \tau_{x,y+\Delta,z} + \tau_{x,y-\Delta,z} + \tau_{x,y,z+\Delta} + \tau_{x,y,z-\Delta}}{6} \tag{35}$$

где $\tau_{x+\Delta,y,z}$; $\tau_{x-\Delta,y,z}$; ... — температуры в шести соседних узлах решетки.

При неоднородном поле необходимо учитывать величины коэффициентов теплопередачи между узлами решетки аналогично тому, как это делается при плоском температурном поле. В этом случае расчетные формулы получаются аналогичными формуле (33), но с шестью членами в числителе и в знаменателе правой части.

Следовательно, с теоретической точки зрения расчет пространственного температурного поля затруднений не представляет. Однако практически расчет пространственного температурного поля значительно усложняется и становится чрезвычайно трудоемким, что резко ограничивает область его применения. Например, если при расчете плоского температурного поля будет взята сетка с 36 узлами, то при расчете пространственного температурного поля в аналогичных условиях будем иметь пространственную решетку с $36 \cdot 6 = 216$ узлами, т. е. задача расчета пространственного температурного поля сведется в этом случае к решению 216 уравнений с 216 неизвестными.

Задача расчета пространственного температурного поля резко упрощается в одном частном случае, а именно, когда в нем имеется ось симметрии. В строительной практике этому условию соответствуют случаи, когда в ограждающей конструкции есть болтовые крепления, а также балки, заделанные в стену, вкладыши, шпонки, которые без большой погрешности можно привести к круглому сечению.

Дифференциальное уравнение температурного поля с осью симметрии должно быть выражено в цилиндрических коорди-

Материал	Объемный вес в кг/м³	Весовая влажность материала в % при относительной упругости водяного пара φ, %						
		40	50	60	70	80	90	100
Пенобетон	775	2,8	3	3,4	4	5,3	7,8	11,5
»	850	3,5	4,05	4,7	5,5	6,5	8,1	13,5
»	1050	1,3	1,7	2,3	3,3	5	8,2	23
»	1210	2,5	2,8	3,1	3,7	5,2	8,6	25
Пеностекло	200	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17	0,27	0,75
»	375	0,05	0,08	0,11	0,15	0,3	0,8	3,9
Плиты ПХВ	80	1,4	1,45	1,65	2,05	3,1	5	12,5
Стеклопластиковые плиты	160	0,25	0,26	0,28	0,4	0,65	1,35	2,75
То же	300	0,25	0,3	0,4	0,65	1,15	2,1	5,2
Пенополистирол	30	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,6
Торфоплиты	225	8	10	12,1	14,2	17	21	27,4
Торф сфагнум	280	11,1	13,3	15,6	18	21,2	25,2	30,2
Фибролит магнезиальный	325	7,7	9,4	11,4	14,2	18,8	25,4	34,8
Фибролит цементный	350	4,8	5,7	6,6	7,5	9,2	15	26,5
Цементный раствор 1 : 4	1800	1	1,05	1,1	1,3	1,75	2,35	3,3
Шлак топливный	725	1,15	1,4	1,65	1,9	2,2	2,65	3,2
Шлакобетон	920	1,15	1,35	1,6	1,85	2,15	2,65	3,55
»	1400	1,5	1,7	1,9	2,2	2,6	3,2	4
Шлакопемзобетон	1300	1,25	1,4	1,6	1,8	2,1	3,4	7,1

натах. Для однородного температурного поля его дифференциальное уравнение в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial^2\tau}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\tau}{\partial r}+\frac{\partial^2\tau}{\partial z^2}=0, \qquad (36)$$

где τ — температура в любой точке поля; r — расстояние точки от оси симметрии; z — координата точки по оси симметрии.

Если на температурное поле наложить плоскую квадратную сетку с расстояниями между узлами Δ таким образом, чтобы одна из нитей сетки совпала с осью симметрии, то в конечных разностях уравнение (36) можно представить в виде:

$$\frac{\tau_{r-\Delta,z}-2\tau_{r,z}+\tau_{r+\Delta,z}}{\Delta^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\tau_{r+\Delta,z}-\tau_{r-\Delta,z}}{2\Delta}+$$
$$+\frac{\tau_{r,z-\Delta}-2\tau_{r,z}+\tau_{r,z+\Delta}}{\Delta^2}=0,$$

откуда температура в любом узле сетки

$$\tau_{r,z}=\frac{\tau_{r+\Delta z}+\tau_{r-\Delta z}+\tau_{r,z+\Delta}+\tau_{r,z-\Delta}}{4}+\frac{\Delta}{8r}\times$$
$$\times(\tau_{r+\Delta,z}-\tau_{r-\Delta,z}). \qquad (37)$$

Полученное уравнение для температуры любой точки поля, отстоящей на расстоянии r метров от оси симметрии, отличается от уравнения (32) для плоского температурного поля добавочным членом $\frac{\Delta}{8r}(\tau_{r+\Delta,z}-\tau_{r-\Delta,z})$. По мере удаления точки от оси симметрии величина радиуса r возрастает, а следовательно, уменьшается величина добавочного члена. При $r=\infty$ добавочный член обращается в нуль, и тогда уравнение (37) обращается в уравнение (32) для плоского температурного поля, что справедливо и для $\Delta=0$.

Формула (37) неприменима для точек, лежащих на оси симметрии, так как при этом $r=0$ и $\tau_{r+\Delta,z}-\tau_{r-\Delta,z}=0$ и добавочный член обращается в неопределенность вида 0/0. Для расчета температур точек, лежащих на оси симметрии, можно применить общую формулу (35) для пространственного температурного поля. В этом случае, учитывая, что температуры в соседних узлах, лежащих на осях x и y, будут равны, из уравнения (35) получим:

$$\tau_{0,z}=\frac{4\tau_{0+\Delta z}+\tau_{0,z+\Delta}+\tau_{0,z-\Delta}}{6}. \qquad (38)$$

При неоднородном температурном поле с осью симметрии, а также при наложении прямоугольной сетки, температуры в узлах, около которых нарушена однородность поля (при прямоугольной сетке во всех ее узлах), определяются по формуле

КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПРИ $t=15°$ С)

Материал	Объемный вес в кг/м³	Весовая влажность материала $\omega_в$, %							
		Коэффициент влагопроводности $\beta \cdot 10^2$, г/м·ч·%							
Бетон на кирпичном щебне . .	1790	2	3	4	6	8	10	11	12
		0	2,8	4,1	5,5	6,6	9,3	11,9	16,2
Древесноволокнистые плиты . . .	245	16	20	25	30	35	40	45	50
		0	24	34	34	32	30	31	32
Древесноволокнистые плиты . .	765	20	25	30	40	50	60	80	100
		0	3,2	5	7	9	11,7	20	28
Известковый раствор 1 : 3 . . .	1590	1,5	2,5	4	6	8	10	12	14
		0	10	18	24	31	48	82	195
Керамзитобетон	1150	2	2,5	3	4	5	6	7	8
		0	1,3	2	2,9	3	3,2	4	6
» .	1430	4	5	7	10	13	16	18	20
		0	6,4	12,8	17	19	21,2	23	25,6
Керамзитобетон поризованный	1050	2	3	4	5	6	7	8	9
		0	8	13,5	15	16	18	21	27,5
То же	1200	2	3	4	5	6	7	8	9
		0	6	9	10	11	12,5	16,5	26
Керамзитобетон на фенольной связке	350	2	3	5	7	10	15	20	30
		0	2	4,3	5,7	6,9	8,2	9,2	11
Кирпич глиняный обыкновенный .	1700	0,5	2	5	8	11	14	16	18
		0	9	17,2	21,7	25,5	36	60	150
Кирпич силикатный	1785	0,9	2	5	8	11	14	16,5	18,5
		0	3,6	6,9	8,7	10,2	14,5	30	73
Минераловатные плиты на фенольной связке .	85	60	80	100	150	200	300	400	500
		0	0,065	0,095	0,125	0,14	0,175	0,225	0,28
Мипора	17	35	50	100	150	200	300	400	500
		0	0,018	0,044	0,059	0,069	0,085	0,105	0,13
Опилки древесные	120	30	50	80	120	160	200	225	250
		0	0,3	0,72	1,32	2,1	4,2	7,8	23
Пенобетон	465	6,5	7,5	10	13	16	19	22	25
		0	0,24	4,04	0,6	0,74	0,88	1,06	1,28

(33). Коэффициенты теплопередачи, входящие в эту формулу, определяются следующим образом:

а) в направлении радиуса — как цилиндрической стенки толщиной, равной расстоянию между узлами, по формуле

$$k = \frac{\pi z}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ (ккал/ч·град)}, \quad (39)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала, расположенного между узлами, в *ккал/м·ч·град*; z — расстояние между узлами сетки в направлении оси z; r_1 и r_2 — радиусы цилиндрической стенки.

Если между узлами расположены два материала с коэффициентами теплопроводности λ_1 и λ_2, то коэффициент теплопередачи между узлами определяется, как для двухслойной цилиндрической стенки по формуле

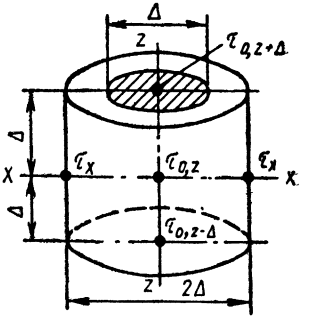


Рис. 25. Схема для определения условного диаметра d_0

$$k = \frac{\pi z}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{r_0}{r_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_0}}, \quad (39а)$$

где r_0 — радиус цилиндрической поверхности соприкосновения материалов;

б) в направлении оси z — как через плоскую стенку толщиной, равной расстоянию между узлами в этом направлении, и площадью F, равной площади кольца с радиусами r_1 и r_2, по формуле

$$k = \frac{\lambda}{z} F.$$

Аналогично изложенному учитываются и краевые условия, т. е. температуры для узлов, лежащих на поверхностях, граничащих с воздухом.

Если однородность поля нарушена около оси симметрии в пределах диаметра, равного 2Δ, то формула (38) оказывается непригодной для определения температур узлов, лежащих на оси симметрии. Если при этом температуры этих узлов определять из условий теплового баланса, то в знаменателе формулы (39) для количества тепла, отдаваемого от оси симметрии, получим $\ln \frac{\Delta}{0}$, т. е. бесконечность, и $Q=0$. В этом случае для определения величины Q приходится вводить некий условный диаметр d_0, определяемый на основании следующих соображений.

Материал	Объемный вес в кг/м³	Весовая влажность материала $\omega_в$, %							
		Коэффициент влагопроводности $\beta \cdot 10^2$, г/м·ч·%							
Пенобетон . . .	810	10	11	13	15	17,5	20	22	24
		0	0,13	0,27	0,41	0,6	0,8	1	1,25
Пенополиуретан .	35	13	16	20	30	40	50	60	70
		0	0,1	0,25	0,45	0,57	0,65	0,75	0,95
Пеностекло . . .	200	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5	3
		0	0,005	0,008	0,009	0,01	0,011	0,015	0,019
Пеностекло . . .	370	3	10	20	35	50	75	100	130
		0	0,014	0,027	0,041	0,051	0,065	0,075	0,084
Торфоплиты . . .	180	28,5	35	45	60	80	100	125	150
		0	0,038	0,06	0,078	0,092	0,104	0,127	0,17
Фибролит цементный	380	35	40	50	75	100	150	200	250
		0	0,25	0,48	0,61	0,68	0,77	0,88	1,13
Цементно-песчаный раствор .	2000	1	2	3	3,5	4	4,5	5	5,5
		0	1	1,7	2,1	2,6	3,7	5,8	9,5
Шлак топливный .	890	3,5	4	5	7	9	11	12,5	13,5
		0	0,26	0,54	1	1,54	2,28	3,1	4,15
Шлакобетон . . .	1380	4	5	7	10	15	20	25	30
		0	0,75	1,75	2,7	3,8	4,6	5,4	6,3

Примечание. В числителе — значения влажности, в знаменателе — коэффициента влажности.

Выделим около оси симметрии цилиндр диаметром 2Δ и такой же высоты (рис. 25). Количество тепла, передаваемого от узла с температурой $\tau_{0,z}$, будет следующим:

а) в направлении радиуса к точкам с температурой τ_x:

$$Q_x = \frac{2\lambda\pi\Delta}{\ln\frac{2\Delta}{d_0}}(\tau_{0,z} - \tau_x);$$

б) в направлении оси z вверх к точке с температурой $\tau_{0,z+\Delta}$:

$$Q_{z+\Delta} = \frac{\lambda}{\Delta}\pi\frac{\Delta^2}{4}(\tau_{0,z} - \tau_{0,z+\Delta});$$

в) в направлении оси z вниз к точке с температурой $\tau_{0,z-\Delta}$:

$$Q_{z-\Delta} = \frac{\lambda}{\Delta}\pi\frac{\Delta^2}{4}(\tau_{0,z} - \tau_{0,z-\Delta}).$$

Из условия теплового баланса $Q_x + Q_{z+\Delta} + Q_{z-\Delta} = 0$ или, подставляя их выражения и сокращая π, λ и Δ, получим:

$$\frac{2}{\ln\frac{2\Delta}{d_0}}(\tau_{0,z} - \tau_x) + \frac{1}{4}(2\tau_{0,z} - \tau_{0,z+\Delta} - \tau_{0,z-\Delta}) = 0;$$

решая полученное уравнение относительно $\tau_{0,z}$, будем иметь:

$$\tau_{0,z} = \frac{2}{2 + 0{,}5\ln\frac{2\Delta}{d_0}}\tau_x + \frac{0{,}25\ln\frac{2\Delta}{d_0}}{2 + 0{,}5\ln\frac{2\Delta}{d_0}}\tau_{0,z+\Delta} + \frac{0{,}25\ln\frac{2\Delta}{d_0}}{2 + 0{,}5\ln\frac{2\Delta}{d_0}}\tau_{0,z-\Delta}. \quad \text{(а)}$$

С другой стороны, при однородном температурном поле для $\tau_{0,z}$ по формуле (38) имеем:

$$\tau_{0,z} = \frac{4}{6}\tau_x + \frac{1}{6}\tau_{0,z+\Delta} + \frac{1}{6}\tau_{0,z-\Delta}. \quad \text{(б)}$$

Приравнивая коэффициенты при τ_x и $\tau_{0,z+\Delta}$ в уравнениях (а) и (б), получим:

а) при τ_x

$$\frac{2}{2 + 0{,}5\ln\frac{2\Delta}{d_0}} = \frac{4}{6},$$

откуда

$$2 + 0{,}5\ln\frac{2\Delta}{d_0} = 3 \text{ и } \ln\frac{2\Delta}{d_0} = 2;$$

ПЕРЕВОДНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕЖДУНАРОДНУЮ СИСТЕМУ СИ И ОБРАТНО

Показатель	Размерности		Переводные коэффициенты	
	в технической системе	в системе СИ	из технической в СИ	из СИ в техническую
Количество тепла	*ккал*	*кдж*	4,187	0,239
Тепловой поток	*ккал/ч*	*вт*	1,163	0,86
Коэффициент теплопроводности	*ккал/м·ч·град*	*вт/м °К*	1,163	0,86
Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи	*ккал/м²·ч·град*	*вт/м² °К*	1,163	0,86
Сопротивление теплопередаче	*м²·ч·град/ккал*	*м² °К/вт*	0,86	1,163
Удельная теплоемкость	*ккал/кг·град*	*кдж/кг °К*	4,187	0,239
Коэффициент температуропроводности	*м²/ч*	*м²/сек*	$2{,}78 \cdot 10^{-4}$	3600
Давление (упругость) водяного пара	*мм рт. ст.*	*н/м²*	133,3	0,0075
Коэффициент паропроницаемости	*г/м·ч·мм рт. ст.*	*кг·м/н·сек*	$2{,}08 \cdot 10^{-9}$	$4{,}81 \cdot 10^{8}$
Сопротивление паропроницанию	*м²·ч·мм рт. ст/г*	*н·сек/кг*	$4{,}81 \cdot 10^{8}$	$2{,}08 \cdot 10^{-9}$
Давление воздуха	*мм вод. ст.*	*н/м²*	9,81	0,102
Коэффициент воздухопроницаемости	*кг/м·ч·мм вод. ст.*	*кг·м/н·сек*	$2{,}83 \cdot 10^{-5}$	$3{,}53 \cdot 10^{4}$
Сопротивление воздухопроницанию	*м²·ч·мм вод. ст/кг*	*н·сек/кг*	$3{,}53 \cdot 10^{4}$	$2{,}83 \cdot 10^{-5}$

б) при $\tau_{0,z+\Delta}$ и $\tau_{0,z-\Delta}$

$$\frac{0{,}25 \ln \frac{2\Delta}{d_0}}{2 + 0{,}5 \ln \frac{2\Delta}{d_0}} = \frac{1}{6},$$

откуда

$$1{,}5 \ln \frac{2\Delta}{d_0} = 2 + 0{,}5 \ln \frac{2\Delta}{d_0} \quad \text{и} \quad \ln \frac{2\Delta}{d_0} = 2.$$

При $\ln \frac{2\Delta}{d_0} = 2$ имеем $\frac{2\Delta}{d_0} = 7{,}39$, откуда $d_0 = 0{,}271\Delta$.

Следовательно, коэффициент теплопередачи от точек, лежащих на оси симметрии, в направлении по радиусу можно определять по формуле (39), принимая наружный диаметр равным 2Δ и внутренний диаметр $d_0 = 0{,}271\Delta$. Условный диаметр d_0 можно применять также при составлении теплового баланса точек τ_x, если температурное поле неоднородно в пределах диаметра, равного 4Δ.

Пример 18. В кирпичную стену толщиной в 2 кирпича с наружной стороны заделана железобетонная консоль на глубину 36 *см*. Сечение консоли 20×20 *см*, вылет 60 *см*. Как отразится устройство консоли на температуре внутренней поверхности стены?

Квадратное сечение консоли заменяем эквивалентным круглым сечением исходя из следующих соображений:

а) поперечное квадратное сечение консоли имеет площадь 20×20 = = 400 *см*^{2} этой площади соответствует диаметр 22,6 *см*;

б) периметр квадратного сечения консоли 20×4 = 80 *см*, чему соответствует диаметр окружности 25,5 *см*.

В качестве эквивалентного диаметра принимает среднее значение, т. е. диаметр $d = 24$ *см*.

Для расчета температурного поля накладываем на горизонтальный разрез стены в месте консоли квадратную сетку с расстоянием между ее узлами $\Delta = 120$ *мм* (рис. 26).

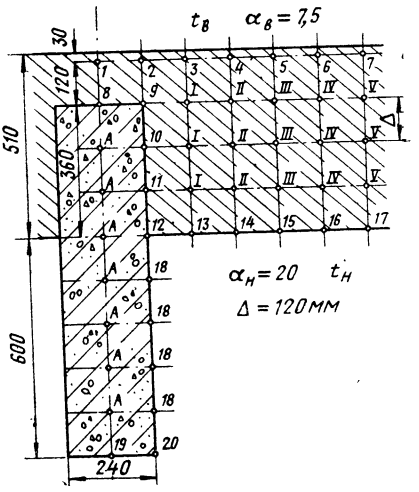


Рис. 26. Расчетная схема температурного поля стены с заделанной в ней консолью

Принимаем следующие коэффициенты теплопроводности:

для кирпичной кладки стены $\lambda = 0{,}7$ *ккал/м·ч·град*;

» железобетонной консоли $\lambda = 1{,}33$ »

Ниже приводится вывод расчетных формул для шести наиболее характерных узлов сетки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 5

Основные буквенные обозначения 7

Часть I. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Глава I. **Основные понятия и уравнения теплопередачи** 9

1. Теплопроводность 10
2. Теплопередача конвекцией 14
3. Теплопередача излучением 15

Глава II. **Теплотехнические свойства строительных материалов** . . . 18

1. Пористость и объемный вес 19
2. Влажность 20
3. Теплопроводность 22
4. Теплоемкость 31
5. Тепловое излучение 32

Глава III. **Теплопередача при стационарном тепловом потоке** . . . 33

1. Расчет сопротивления теплопередаче ограждений 35
2. Расчет температуры в ограждении 51
3. Расчет температуры внутренней поверхности ограждения при интенсивном излучении 57
4. Воздушные прослойки 65
5. Нормирование сопротивления теплопередаче наружных ограждений . 73

Глава IV. **Температурные поля и их расчет** 75

1. Плоское температурное поле 76
2. Пространственное температурное поле 85
3. Электромоделирование температурных полей 93

Глава V. **Теплопередача при нестационарном тепловом потоке** . . . 96

1. Метод конечных разностей 96
2. Моделирование процессов теплопередачи в нестационарных условиях 109

Узел 1. Теплопередача к внутреннему воздуху: площадь теплопередачи по кругу диаметром 0,12 *м* будет $F=0{,}0113$ *м*²; сопротивление теплопередаче между внутренним воздухом и узлом *1*

$$R_{1-в}=\frac{0{,}03}{0{,}7}+\frac{1}{7{,}5}=0{,}176\ град\cdot м^2\cdot ч/ккал,$$

а коэффициент теплопередачи

$$k_{1-в}=\frac{1}{0{,}176}\,0{,}0113=0{,}064\ ккал/ч\cdot град.$$

К узлу *8*:

$$k_{1-8}=\frac{0{,}7}{0{,}12}\,0{,}0113=0{,}066.$$

К узлу *2*: по формуле (39), принимая $z=0{,}03+\frac{\Delta}{2}=0{,}09$ *м* и $\ln\frac{2\Delta}{d_0}=2$, так как узел лежит на оси симметрии, получим:

$$k_{1-2}=\frac{3{,}14\cdot 0{,}09}{\frac{1}{2\cdot 0{,}7}\,2}=0{,}198.$$

По формуле (33) для узла 1 получим следующую расчетную формулу:

$$\tau_1=\frac{0{,}064t_в+0{,}066\tau_8+0{,}198\tau_2}{0{,}328}=0{,}195t_в+0{,}201\tau_8+0{,}604\tau_2.$$

Узел 2. К внутреннему воздуху: теплопередача будет по кольцу с внутренним диаметром 0,12 *м* и наружным диаметром 0,36 *м* — $F=0{,}1018-0{,}0113=0{,}0905$ *м*²;

$$k_{2-в}=\frac{1}{0{,}176}\,0{,}0905=0{,}514.$$

К узлу 9:

$$k_{2-9}=\frac{0{,}7}{0{,}12}\,0{,}0905=0{,}527$$

К узлу 1: $k_{2-1}=0{,}198$.
К узлу 3:

$$k_{2-3}=\frac{3{,}14\cdot 0{,}09}{\frac{1}{2\cdot 0{,}7}\ln\frac{0{,}24}{0{,}12}}=0{,}57.$$

Расчетная формула для узла 2

$$\tau_2=\frac{0{,}514t_в+0{,}527\tau_9+0{,}198\tau_1+0{,}57\tau_3}{1{,}809}=$$
$$=0{,}248t_в+0{,}291\tau_9+0{,}11\tau_1+0{,}315\tau_3.$$

Узел 8. К узлу 1: $k_{8-1}=0{,}066$.
К узлу 9: средний коэффициент теплопроводности материалов между этими узлами:

$$\lambda_{ср}=\frac{0{,}7+1{,}33}{2}=1{,}02;$$

Стр.

3. Теплоусвоение 112
4. Теплоустойчивость 122
5. Воздействие солнечной радиации 132

Глава VI. **Воздухопроницание** 144

1. Воздухопроницаемость материалов 147
2. Воздухопроницаемость ограждений 149
3. Расчет ограждений с вентилируемой воздушной прослойкой 158

Глава VII. **Теплотехнические особенности отдельных частей наружных ограждений** 164

1. Наружные углы стен 165
2. Карнизные узлы 170
3. Цокольные узлы 174
4. Стыки наружных стеновых панелей 174
5. Теплопроводные включения 179
6. Оконные проемы 182

Часть II. **ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ**

Глава VIII. **Общие понятия о влажностном режиме наружных ограждений** 187

1. Значение влажностного режима наружных ограждений 187
2. Причины появления влаги в наружных ограждениях 188

Глава IX. **Конденсация и сорбция водяного пара** 191

1. Влажность воздуха 191
2. Конденсация влаги на поверхности ограждения 196
3. Меры против конденсации влаги на поверхности ограждения . . . 198
4. Сорбция и десорбция 199

Глава X. **Перемещение в ограждении парообразной влаги** 204

1. Паропроницаемость 204
2. Расчет влажностного режима при стационарных условиях диффузии водяного пара 209
3. Расчет влажностного режима при нестационарных условиях диффузии водяного пара 219
4. Меры против конденсации влаги в ограждении 230
5. Влажностный режим бесчердачных покрытий 234

$$k_{8-9}=\frac{3,14\cdot 0,12}{\frac{1}{2\cdot 1,02}2}=0,384.$$

К узлу A:

$$k_{8-A}=\frac{1,33}{0,12}0,0113=0,125.$$

Расчетная формула для узла 8

$$\tau_8=\frac{0,066\tau_1+0,384\tau_9+0,125\tau_A}{0,575}=0,115\tau_1+0,667\tau_9+0,218\tau_A.$$

Узел 9. К узлу *8*: $k_{9-8}=0,384$.
К узлу *2*: $k_{9-2}=0,527$.
К узлу 1:

$$k_{9-1}=\frac{3,14\cdot 0,12}{\frac{1}{2\cdot 0,7}\ln 2}=0,761.$$

К узлу 10:
по железобетону — площадь теплопередачи по кольцу с внутренним диаметром 0,12 *м* и наружным диаметром 0,24 *м*:
$F'=0,0452-0,0113=0,0339$ *м*^{2};
по кирпичной кладке — площадь теплопередачи по кольцу с внутренним диаметром 0,24 *м* и наружным диаметром 0,36 *м*:
$F''=0,1018-0,0452=0,0566$ *м*^{2};

$$\lambda_{ср}=\frac{1,33\cdot 0,0339+0,7\cdot 0,0566}{0,0905}=0,937;$$

$$k_{9-10}=\frac{0,937}{0,12}0,0905=0,707.$$

Расчетная формула для узла *9*

$$\tau_9=\frac{0,384\tau_8+0,527\tau_2+0,761\tau_1+0,707\tau_{10}}{2,379}=$$

$$=0,161\tau_8+0,222\tau_2+0,320\tau_1+0,297\tau_{10}.$$

Узел 12. К узлу A:

$$k_{12-A}=\frac{3,14\cdot 0,12}{\frac{1}{2\cdot 1,33}2}=0,5.$$

К узлу *11*: $k_{12-11}=k_{9-10}=0,707$.
К узлу *13*: $k_{12-13}=0,5$; $k_{9-1}=0,5\cdot 0,761=0,380$.
К узлу *18*: только по железобетону с площадью $F'=0,0339$ *м*^{2}

$$k_{12-18}=\frac{1,33}{0,12}0,0339=0,376.$$

К наружному воздуху: по наружной поверхности стены $F'=0,1018-0,0452=0,0566$ *м*^{2}; по боковой поверхности консоли $F''=0,754\cdot 0,06=0,0452$ *м*^{2}.
Полная площадь теплопередачи будет: $F'+F''=0,0566+0,0452=0,1018$ *м*^{2}; $k_{12-н}=20\cdot 0,1018=2,036$.

Глава XI. **Перемещение в ограждении жидкой влаги** 239

1. Перемещение влаги в строительных материалах 240
2. Расчет влажностного режима ограждения при перемещении в нем жидкой влаги 245
3. Расчет совместного перемещения влаги в жидкой и в парообразной фазах 253

Список литературы 269

Приложения. Справочные таблицы 271

Константин Федорович Фокин

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА ОГРАЖДАЮЩИХ ЧАСТЕЙ ЗДАНИЙ

* * *

Редактор издательства И. С. Бородина
Технические редакторы Н. В. Высотина, Т. В. Кузнецова
Корректоры Л. П. Бирюкова, Г. А. Кравченко

Сдано в набор 10.X. 1972 г. Подписано к печати 23.I. 1973 г.
Т-01556. Бумага № 2. Формат 60×90¹/₁₆ — 9,0 бум. л.
18,0 печ. л. (уч.-изд. 19,9 л.) Тираж 14 000 экз. Изд. № AVI-2805
Зак. № 694 Цена 1 р. 10 к.

Стройиздат
Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9

Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

Расчетная формула для узла *12*

$$\tau_{12} = \frac{0,5\tau_A + 0,707\tau_{11} + 0,38\ \tau_{13} + 0,376\tau_{18} + 2,036t_н}{3,999} =$$

$$= 0,125\tau_A + 0,177\tau_{11} + 0,095\tau_{13} + 0,094\tau_{18} + 0,509t_н.$$

Узел 20. К узлу *19*: $k_{20-19}=0,5$ $k_{12-A}=0,5\cdot 0,5=0,25$.

К узлу *18*: $k_{20-18}=k_{12-18}=0,376$.

К наружному воздуху: по боковой поверхности консоли $F'=0,754\cdot 0,06=0,0452$ *м*^{2}; по торцовой поверхности консоли $F''=0,0452-0,0113=0,0339$ *м*^{2}.

Полная площадь теплопередачи: $0,0452+0,0339=0,0791$ *м*^{2}; $k_{20-н}=20\times 0,0791=1,582$.

Расчетная формула для узла *20*

$$\tau_{20} = \frac{0,25\tau_{19} + 0,376\tau_{18} + 1,582t_н}{2,208} = 0,113\tau_{19} + 0,17\tau_{18} + 0,717t_н.$$

Для остальных узлов сетки получим аналогично изложенному следующие расчетные формулы:

Узел *3*: $\tau_3=0,282\ t^в+0,29\ \tau_1+0,158\ \tau_2+0,27\ \tau_4$.

Узел *4*: $\tau_4=0,28\ t_в+0,288\ \tau_{II}+0,178\ \tau_3+0,254\ \tau_5$.

Узел *5*: $\tau_5=0,28\ t_в+0,288\ \tau_{III}+0,188\ \tau_4+0,244\ \tau_6$.

Узел *6*: $\tau_6=0,28\ t_в+0,288\ \tau_{IV}+0,194\ \tau_5+0,238\ \tau_7$.

Узел *10*: $\tau_{10}=0,187\ \tau_A+0,264\ \tau_9+0,264\ \tau_{11}+0,285\ \tau_I$.

Узел *11*: $\tau_{11}=0,187\ \tau_A+0,264\ (\tau_{10}+\tau_{12})+0,285\ \tau_I$.

Узел *13*: $\tau_{13}=0,068\ \tau_{12}+0,184\ \tau_I+0,116\ \tau_{14}+0,632\ t_н$.

Узел *14*: $\tau_{14}=0,076\ \tau_{13}+0,184\ \tau_{II}+0,108\ \tau_{15}+0,632\ t_н$.

Узел *15*: $\tau_{15}=0,08\ \tau_{14}+0,184\ \tau_{III}+0,104\ \tau_{16}+0,632\ t_н$.

Узел *16*: $\tau_{16}=0,082\ \tau_{15}+0,184\ \tau_{IV}+0,102\ \tau_{17}+0,632\ t_н$.

Узел *18*: $\tau_{18}=0,163\ \tau_A+0,123\ (\tau'_{18}+\tau''_{18})+0,591\ t_н$.

Узел *19*: $\tau_{19}=0,208\ (\tau_A+2\ \tau_{20})+0,376\ t_н$.

В узлах *A* температура вычисляется непосредственно по формуле (38). Для узлов, помеченных на расчетной схеме (рис. 26) римскими цифрами, температуры вычисляем по формуле (37) со следующими значениями коэффициента $\frac{\Delta}{8r}$:

для узлов *I*:

$r=0,24$ *м*, $\quad \frac{\Delta}{8r} = \frac{0,12}{8\cdot 0,24} = 0,062;$

для узлов *II*:

$r=0,36$ *м*, $\quad \frac{\Delta}{8r} = 0,042;$

для узлов *III*:

$r=0,48$ *м*, $\quad \frac{\Delta}{8r} = 0,031;$

для узлов *IV*:

$r=0,6$ *м*, $\quad \frac{\Delta}{8r} = 0,025.$

В узлах *7*, *V* и *17*, на которые, как видно из результатов расчета, влияние консоли не распространяется, принимаем значения температур, соответствующие распределению температуры в стене при отсутствии в ней консоли.

В расчете принимаем следующие значения температур воздуха: внутреннего $t_в=15°$ С и наружного $t_н=-25°$ С. Результаты расчета температурного поля с точностью до 0,1° С приведены на рис. 27.