

697  
Ш 83

1366850

# Wasserdampfdiffusion und –kondensation in der Baupraxis

К. Шпайдель

# Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях



Москва  
Стройиздат



Von Karl Schpeidel

# **Wasserdampfdiffusion und -kondensation in der Baupraxis**

**Physikalische  
Grundlagen-  
Berechnung  
nach einem  
neuen graphischen  
Verfahren**

**1980 Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn  
Berlin • München**

К. Шпайдель

# **Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях**

Перевод с немецкого  
В.Г.Бердичевского

Под редакцией  
канд. техн. наук А.Н.Мазалова

Москва Стройиздат 1985

ББК38.113  
Ш83  
УДК 697.137.2

Рекомендовано к изданию д-ром техн. наук, проф. В.А. Дроздовым (НИИ строительной физики) Госстроя СССР.

Ш 83 Шпайдель К.  
Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях (Пер. с нем. В.Г Бердичевского; Под ред. А.Н. Мазалова. - М.: Стройиздат, 1985. - 48 с., ил.

На многочисленных примерах с привлечением математического аппарата авторы из ФРГ объясняют процессы, связанные с диффузией водяного пара в ограждающих конструкциях здания, конденсацией его внутри одно- или многослойных конструкций. Рассмотрен новый метод определения выходных данных (методом треугольников) для расчета диффузии и точки росы. Используемый при графическом определении выходных параметров метод треугольников позволяет безошибочно найти практически любые зависимости.

Для инженерно-технических работников проектных организаций.

3202000000 - 248

Ш -----40-85

047(01) - 85

ББК 38.113  
6С1

© 1980 by Verlag von Wilhelm  
Ernst & Sohn, Berlin -München

© Предисловие к русскому изданию.  
Перевод на русский язык,  
Стройиздат, 1985



## Предисловие к русскому изданию

В книге западногерманского специалиста К. Шпайделя рассматривается один из важных и сложных вопросов работы ограждающих конструкций зданий — их влажностный режим, определяемый условиями паропроницаемости конструкций. Проблема влагопереноса — наиболее сложная и наименее изученная часть строительной теплофизики, хотя влияние влажностного состояния конструкции на ее эксплуатационные свойства значительно и в большинстве случаев бывает решающим. Поэтому прав автор, начиная книгу с утверждения, что многие дефекты ограждающих конструкций вызваны конденсационным увлажнением.

Чтобы избежать негативных последствий увлажнения конструкций, при их проектировании пытаются определить предполагаемое эксплуатационное состояние путем расчета влажностного режима различными способами. К их числу относится и известный графоаналитический метод, который составляет основу описанного в книге нового способа расчета — метода треугольников. Графоаналитический метод в СССР разработан К.Ф. Фокиным и Ф.В. Ушковым и достаточно широко применяется на практике.

При оценке метода треугольников нельзя не согласиться с автором, считающим главными его достоинствами простоту, ясность и наглядность, а также функциональную связь с теплотехническим расчетом. К этому следует добавить, что данный метод дает больше информации о процессах диффузии и конденсации, нежели традиционный графический метод, и является более точным, так как использует криволинейный график парциальных давлений водяного пара. Кроме того, метод треугольников позволяет варьировать составляющими расчета для получения нужного результата. С другой стороны, указанные преимущества метода сопровождаются усложнением расчета и увеличением времени его выполнения.

Рассматривая в более широком плане предлагаемый автором метод треугольников, нельзя не отметить неточность учета им реальных процессов влагопереноса в конструкции, что вытекает из самого понятия стационарного режима, лежащего в основе графоаналитического метода. Действительное влажностное состояние ограждающей конструкции в условиях эксплуатации можно определить только в результате расчета нестационарного влажностного режима с переменными внешними и внутренними параметрами. С этой целью советскими учеными К.Ф. Фокиным и О.Е. Власовым разработан расчетный метод последовательного увлажнения в нестационарных условиях, на основе которого в последние годы предложен уточненный метод<sup>1</sup>, реализуемый посредством программы расчета на ЭВМ. Это позволяет выполнять большой объем вычислений, свойственный расчету нестационарного режима.

Сопоставляя материалы исследований советских специалистов с данными графоаналитического расчета по методу треугольников, можно утверждать, что предлагаемый метод вполне точен лишь в условиях отсутствия конденсата в конструкции. При появлении конденсата он дает заметные отклонения от фактического состояния, хотя и в допустимых пределах. При расчете баланса влаги ограждающей конструкции применение метода треугольников, на наш взгляд, дает не вполне корректные результаты, которые можно использовать лишь для сравнительной оценки процессов накопления и удаления влаги в различных конструкциях.

Книга К. Шпайделя будет полезным пособием для исследователей, проектировщиков, строителей при предварительном определении и оценке влажностного состояния и ожидаемых эксплуатационных свойств конкретной ограждающей конструкции, а также при выборе варианта средств для ее защиты. При пользовании данной книгой следует учитывать ее методические и терминологические особенности. В частности, некоторые физические величины и показатели процесса влагопереноса не совпадают с применяемыми в отечественной теплофизике понятиями, например коэффициент сопротивления диффузии  $\mu$ . Используется более строгое понятие пароизоляции, к которой относятся материалы и слои с весьма высоким сопротивлением паропропусканию, значения которых стремятся к бесконечности. Прочие изолирующие материалы и слои характеризуются лишь как уменьшающие паропропускание. Введение в состав книги таблицы справочных данных облегчает выполнение расчетов, хотя перечень изоляционных материалов недостаточно полный.

*А.Н. МАЗАЛОВ*, канд. техн. наук

---

<sup>1</sup> Фоломин А.И., Кузина Л.А., Костылева Т.И. - Вопросы влажностного режима элементов ограждающих конструкции жилых и общественных зданий - В кн.: Сборные железобетонные крыши - М., ЦНИИЭП жилища, 1975.

## Предисловие

С выходом этой книги практики-строители получают в свое распоряжение пособие, которое не только даст им возможность понять физические процессы, связанные с диффузией водяного пара через конструкции, образованием конденсата на поверхностях и конденсацией внутри одно- или многослойных конструкций, но позволит также овладеть расчетными способами анализа этих процессов.

Простой и наглядный *метод треугольников*, рекомендуемый для графического определения необходимых для анализа данных, позволяет с применением очень небольшого числа исходных данных получить решение почти любой задачи.

После проработки близких к практике примеров даже имеющий небольшой запас опыта читатель без посторонней помощи сможет решать вопросы, возникающие в его практике, и избежит принятия ошибочного решения по расположению слоев при проектировании наружных конструкций любого вида и назначения.

Выражаю благодарность издательству за его внимательное отношение и помощь в подготовке этой книги.

Мюнхен, февраль 1980

*КАРЛ ШПАЙДЕЛЬ*





## ВВЕДЕНИЕ

Главной причиной многочисленных повреждений, связанных с увлажнением конструкций здания являются не проникание дождевой воды или дефекты трубопроводов, а конденсация водяного пара. Спектр повреждений, возникающих вследствие конденсации влаги простирается от небольшого образования плесени в углах помещений из-за снижения сопротивления теплопередаче слоев теплоизоляции до полного увлажнения соответствующих зон наружных стен, террас или плоских крыш. В особенно тяжелых случаях может потребоваться радикальное вмешательство.

Эта категория повреждений существенно увеличилась с введением новых способов производства работ, новых строительных материалов и способов устройства теплоизоляции. Вместо преимущественно однородных наружных стен и крыш, большей частью кирпичных, стали применять многослойные системы, в толще которых при неправильной конструкции или недостаточном проветривании образуется и накапливается конденсат. К тяжелым последствиям нередко приводило устройство собственных плавательных бассейнов в подвальном или первом этаже дома. Хотя в последние годы благодаря публикуемому время от времени данным произошло определенное улучшение, однако об окончательном устранении источников опасности еще не может быть и речи.

Обсуждая со специалистами вопросы проектирования и строительства, автор указывал, что расчеты и оценка диффузии через конструкции водяных паров, направленные на предотвращение повреждений, достаточно затруднены. В какой-то мере это связано с тем, что водной пар не видим и не осязаем, поэтому регистрация его появления с помощью органов чувств человека исключается. Однако главное в том, что специальная литература до сих пор не сделала эту сложную проблему ясной и понятной для практиков-строителей. У многих застройщиков все еще бытуют неправильные или, по меньшей мере, неполные представления, которые требуют корректировки или дополнения, нужно дать практикам-строителям необходимые знания подобно тому, как это сделано при изложении основ теплозащиты в надземном строительстве, которое приведено во введение к DIN 4108 и служит для ограничения передачи тепла при стационарных режимах. В какой-то мере удовлетворительное состояние знаний в этой области является следствием энергетического кризиса и резкого роста цен на нефть. К тому же действие тепла и охлаждения можно воспринять при помощи органов чувств.

Цель настоящей работы – осветить вопросы диффузии и конденсации так просто и наглядно, чтобы каждый специалист строитель в будущем был в состоянии составить баланс влаги или задать последовательность слоев наружных конструкции таким образом, чтобы при определенных климатических ситуациях в их толще не образовывался конденсат.

Существенную помощь в этом может оказать метод треугольников, дающий особенно наглядное графическое представление о рассматриваемой проблеме. Он базируется на нескольких напечатанных рабочих графиках достаточного формата, которые содержат все необходимые кривые, таблицы и численные значения. Необходимы лишь некоторые дополнительные построения, чтобы с относительно небольшими затратами времени, высокой точностью и большой наглядностью найти решение почти для любого расчетного случая. Для освоения этого метода требуется лишь несколько дней, после приобретения определенного навыка ошибки не превышают допустимых величин.

В тексте и на рабочих схемах применены единицы действующей в настоящее время международной системы единиц СИ. Для удобства использования единица массы килограмм (кг) заменена на более удобную в данном случае единицу грамм (г).

### Часть 1

## 1 СОСТАВ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Нижний слой атмосферы Земли, *тропосфера*, представляет собой смесь различных химических элементов в газообразном состоянии, состав которой можно рассматривать как постоянный. Из постоянных составных частей атмосферы 78 % составляет азот  $N_2$  (относительная плотность, о.п. = 0,9673, если плотность воздуха принять за 1); 20,95% - кислород  $O_2$  (о.п. = 1,1056); 0,93% - аргон  $Ar$  (о.п. = 1,379); 0,03% - углекислый газ  $CO_2$  (о. п. = 1,528). Остаток в размере 0,01 объемного процента состоит из инертных газов неона  $Ne$ , гелия  $He$ , криптона  $Kr$  и ксенона  $Xe$ , относительные количества которых соответствуют последовательности их упоминания. Несмотря на различные плотности газообразных составных частей, благодаря постоянному термическому и динамическому перемешиванию расслаивания тропосферы не происходит.

К *непостоянным* составным частям тропосферы относят воду  $H_2O$ , которая может присутствовать в трех

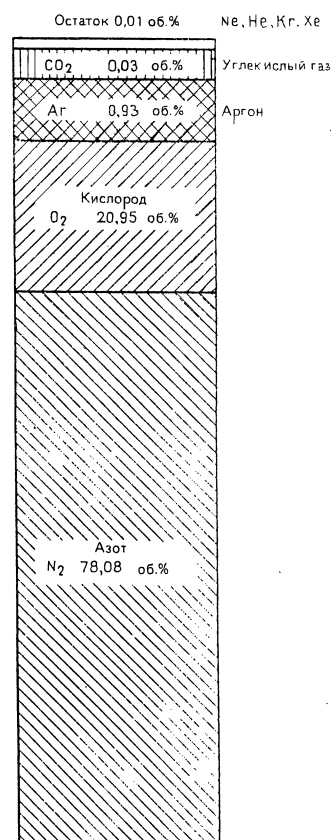


Рис. 1

агрегатных состояниях (твердом, жидком и газообразном), а также определенное количество взвешенных частиц (пыль, пепел, сажа и т.д.). Вода в первом агрегатном состоянии при низких температурах содержится в облаках в виде кристаллических частиц (звездочек) или полных кристаллов (ледяных игл), во втором состоянии в форме микроскопически маленьких капелек в облаках и в тумане или в виде дождевых капель большого размера. Третье агрегатное состояние – водяной пар, который может быть насыщенным или ненасыщенным и в обоих случаях является невидимым. В наиболее сухих регионах тропосфера содержит ненасыщенный водяной пар. Состав атмосферы Земли приведен на рис. 1.

## 2. ВОДЯНОЙ ПАР В ТРОПОСФЕРЕ

По закону Дальтона общее давление смеси газа или пара равно сумме парциальных давлений отдельных компонентов. Барометрическое (атмосферное) давление воздуха состоит из парциального давления сухого воздуха и парциального давления водяного пара.

При определенной температуре в определенном объеме воздуха может содержаться лишь такое максимальное количество водяного пара, при котором он становится насыщенным. Соответствующее этому состоянию парциальное давление обозначается как давление насыщенного пара  $p_{нас}$ . Оно представляет собой максимальное давление, которое может быть достигнуто водяным паром при температуре  $\theta$ . Если в воздухе не достигнут максимум содержания водяного пара,

пар находится в ненасыщенном состоянии и имеет парциальное давление  $p$ .

Изменение объемов паровоздушной смеси при постоянных и изменяющихся температурах показано на рис. 2.

## 3. ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Так как величина давления насыщенного пара зависит от температуры воздуха, при повышении последней воздух может воспринять больше водяного пара, при этом давление насыщения увеличивается. Повышение давления насыщения происходит не линейно, а по сложной кривой. Этот факт является настолько важным для строительной физики, что его не следует упускать из виду. Например, при температуре  $0^\circ\text{C}$  ( $273,16\text{ K}$ ) давление насыщенного пара  $p_{нас}$  составляет  $610,5\text{ Па}$  (Паскаль), при  $+10^\circ\text{C}$  ( $283,16\text{ K}$ ) оно оказывается равным  $1228,1\text{ Па}$ , при  $+20^\circ\text{C}$  ( $293,16\text{ K}$ )  $2337,1\text{ Па}$ , а при  $+30^\circ\text{C}$  ( $303,16\text{ K}$ ) оно равно  $4241,0\text{ Па}$ . Следовательно, при повышении температуры на  $10^\circ\text{C}$  ( $10\text{ K}$ ) давление насыщенного пара повышается приблизительно вдвое.

Зависимость парциального давления водяного пара от изменений температуры приведена на рис. 3.

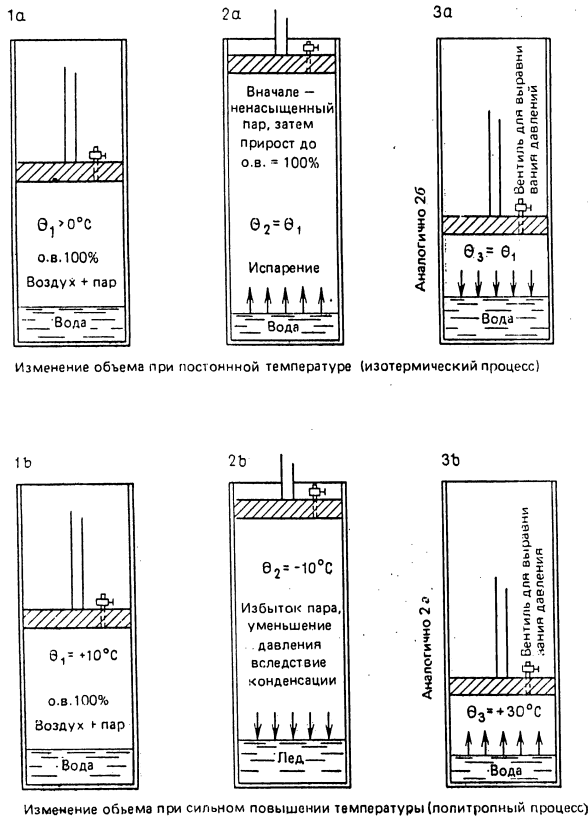


Рис.2

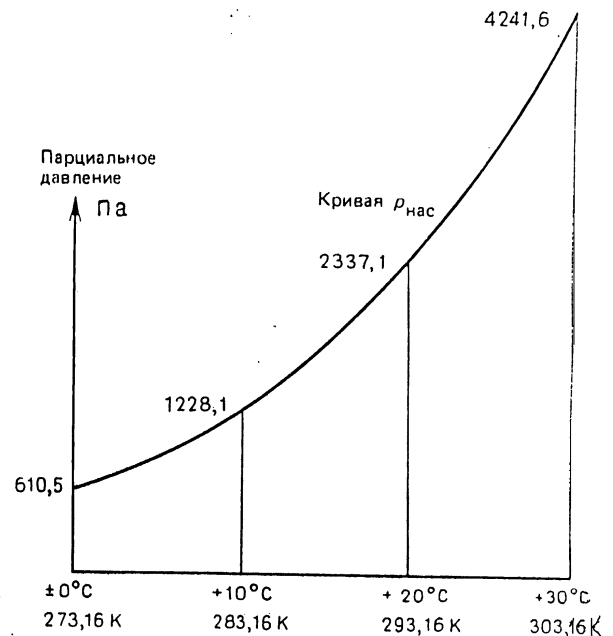


Рис. 3

## 4. АБСОЛЮТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА $f$

Плотность водяного пара, т.е. содержание его в воздухе, называется абсолютной влажностью воздуха и измеряется в  $\text{г/м}^3$ .

Максимум плотности водяного пара, который возможен при определенной температуре воздуха, называется плотностью насыщенного пара, которая, в свою очередь создает давление насыщения. Плотность насыщенного пара  $f_{нас}$  и его давление  $p_{нас}$  увеличиваются с повышением температуры воздуха. Ее повышение также является криволинейным, однако ход этой кривой не такой крутой, как ход кривой  $p_{нас}$ . Обе кривые зависят от величин  $273,16/T_{факт}[K]$ . Поэтому, если известно отношение  $p_{нас}/f_{нас}$ , они могут быть взаимно проверены.

Абсолютная влажность воздуха в воздухонепроницаемом замкнутом пространстве не зависит от темпе-

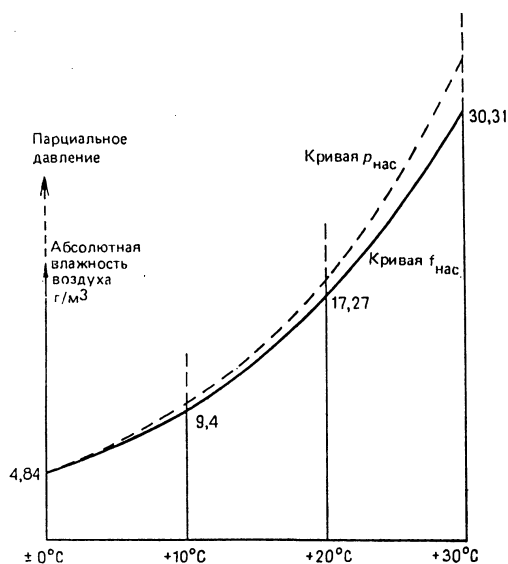


Рис 4

ратуры до тех пор, пока не достигается плотность насыщенного пара. Зависимость абсолютной влажности воздуха от его температуры показана на рис. 4.

## 5. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА $\phi$

Отношение фактической плотности водяного пара к плотности насыщенного пара или отношение абсолютной влажности воздуха к максимальной влажности воздуха при определенной его температуре называется *относительной влажностью воздуха*. Она выражается в процентах.

При понижении температуры воздухонепроницаемого замкнутого пространства относительная влажность воздуха повышается до тех пор, пока значение  $\phi$  не станет равным 100% и тем самым не будет достигнута плотность насыщенного пара. При дальнейшем охлаждении соответствующее избыточное количество водяного пара конденсируется.

При повышении температуры замкнутого пространства значение относительной влажности воздуха снижается. Рис. 5 иллюстрирует зависимость относительной влажности воздуха от температуры. Относительную влажность воздуха измеряют при помощи *гигрометра или психрометра*. Очень надежный аспирационный психрометр Ассмана измеряет разность температур двух точных термометров, один из которых, обернут влажной марлей. Охлаждение вследствие испарения воды оказывается тем большим, чем суше окружающий воздух. Из отношения разности температур к фактической температуре воздуха можно определить относительную влажность окружающего воздуха.

Вместо неточного волосяного гигрометра, который иногда применяют при высокой влажности, используют литий-хлоридный измерительный щуп. Он сос-

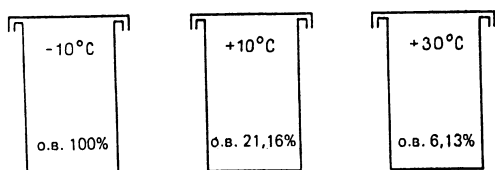


Рис. 5

тоит из металлической гильзы со стеклотканевой оболочкой, отдельной обмотки из нагревательной проволоки и термометра сопротивления. Тканевая оболочка заполнена водным литий-хлоридным раствором и находится под действием переменного напряжения между обоими обмотками. Вода испаряется, происходит кристаллизация соли и сопротивление существенно повышается. Вследствие этого содержание водяного пара в окружающем воздухе и мощность накала уравниваются. По разности температур между окружающим воздухом и встроенным термометром при помощи специальной измерительной схемы определяют относительную влажность воздуха.

Измерительный щуп реагирует на влияние влажности воздуха на гигроскопическое волокно, которое выполнено так, чтобы между двумя электродами возникла достаточная сила ток. Последний растет по мере увеличения относительной влажности в определенной зависимости от температуры воздуха.

Емкостным измерительным щупом является конденсатор с перфорированной плитой, снабженной гигроскопическим диэлектриком, емкость которого изменяется с изменением относительной влажности, а также температуры окружающего воздуха. Измерительный щуп можно применять как составную часть так называемого элемента RC схемы мультивибратора. При этом влажность воздуха переводится в определенную частоту, которая может иметь высокие значения. Таким образом достигают чрезвычайно большой чувствительности прибора, которая позволяет фиксировать минимальные изменения влажности.

## 6. ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА $p$

В отличие от давления насыщенного пара  $p_{нас}$ , которое обозначает максимальное парциальное давление водяного пара в воздухе при определенной температуре, понятие парциальное давление водяного пара  $p$  означает давление пара, который находится в ненасыщенном состоянии, поэтому в каждом случае это давление должно быть меньше, чем  $p_{нас}$ .

По мере увеличения содержания водяного пара в сухом воздухе значение  $p$  приближается к соответствующему значению  $p_{нас}$ . При этом атмосферное давление  $P_{общ}$  остается постоянным. Поскольку парциальное давление водяного пара  $p$  представляет собой лишь часть общего давления всех компонентов смеси, его величину невозможно определить путем прямого измерения. Напротив, давление пара  $p_{нас}$  можно определить, если в сосуде сначала создать вакуум, а затем ввести в него воду. Величина повышения давления вследствие испарения соответствует значению  $p_{нас}$ , относящемуся к температуре насыщенного паром пространства.

При известном  $p_{нас}$  можно косвенно измерить  $p$  следующим образом. В сосуде находится смесь воздуха и водяного пара вначале неизвестного состава. Давление внутри сосуда  $P_{общ} = p_a + p$ , т.е. атмосферному давлению окружающего воздуха. Если теперь запечатать сосуд и ввести в него определенное количество воды, то давление внутри сосуда повысится. После насыщения водяного пара оно составит  $p_a + p_{нас}$ . Установленную с помощью микроманометра разность давлений  $p_{нас} - p$  вычитают из уже известного значения давления насыщенного пара, которое соответствует температуре в сосуде. Результат будет соответствовать парциальному давлению  $p$  первоначального содержимого сосуда, т.е. окружающего воздуха.

Проще вычислить парциальное давление  $p$ , используя данные таблиц давления насыщенного пара  $p_{нас}$  для определенного уровня температуры. Величина отношения  $p/p_{нас}$  соответствует величине отношения плотности водяного пара  $f$  к плотности насыщенного пара  $f_{нас}$ , которая равна значению относительной влаж-

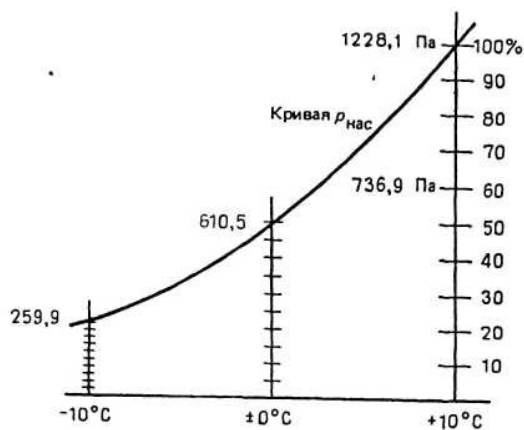


Рис 6

ности воздуха  $\varphi$ . Таким образом, получаем уравнение  $p = \varphi p_{нас}$ .

Вследствие этого, при известных температуре воздуха и давлении насыщения  $p_{нас}$  можно быстро и наглядно определить значение парциального давления  $p$ . Например, относительная влажность воздуха составляет 60%, а температура воздуха равна 10°C. Тогда, поскольку при этой температуре давление насыщенного пара  $p_{нас} = 1228,1$  Па, парциальное давление  $p$  будет равно 736,9 Па (рис 6).

#### 7 ТОЧКА РОСЫ ВОДЯНОГО ПАРА $\tau$

Содержащийся в воздухе водяной пар обычно находится в ненасыщенном состоянии и поэтому имеет определенное парциальное давление  $p$  и определенную относительную влажность воздуха  $\varphi < 100\%$ .

Если воздух находится в прямом контакте с твердыми материалами, температура поверхности которых ниже его температуры, то при соответствующей разнице температур воздух граничного слоя охлаждается и относительная влажность его повышается до тех пор, пока ее значение не достигает 100%, т.е. плотности насыщенного пара. Даже при незначительном дальнейшем охлаждении на поверхности твердого материала начинает конденсироваться водяной пар. Это происходит до тех пор, пока не установится новое равновесное состояние температуры поверхности материала и плотности насыщенного пара. Вследствие высокой плотности охлажденный воздух опускается, а более теплый — поднимается. Количество конденсата будет увеличиваться, пока не установится равновесие и процесс конденсации не прекратится.

Процесс конденсации связан с высвобождением тепла, количество которого соответствует теплоте парообразования воды. Это приводит к повышению температуры поверхности твердых веществ.

Точкой росы  $\tau$  называется температура поверхности, плотность пара вблизи которой становится равной плотности насыщенного пара, т.е. относительная влажность воздуха достигает 100%. Конденсация водяного пара начинается сразу же после того, как его температура опускается ниже точки росы.

Если известны температура воздуха  $\theta_a$  и относительная влажность  $\varphi$ , можно составить уравнение  $p(\theta_a) = p_{нас}(\tau) = \varphi p_{нас}$ . Для расчета требуемого значения  $p_{нас}$  используют таблицу давлений насыщенного пара.

Рассмотрим пример такого расчета (рис. 7). Температура воздуха  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха  $\varphi = 60\%$ ,  $p_{нас}(+10^\circ\text{C}) = 1228,1$  Па,  $p_{нас}(\tau) = 0,6 \times 1228,1$  Па = 736,9 Па, точка росы  $\tau = +2,6^\circ\text{C}$  (таблица).

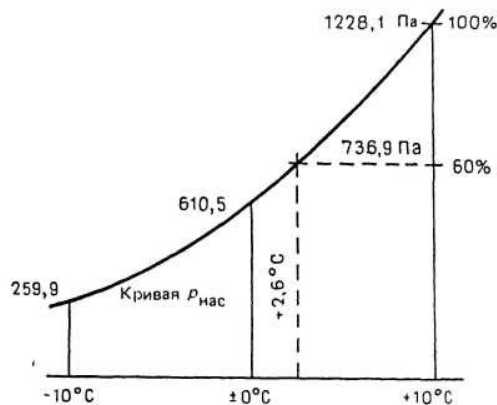


Рис 7

Точку росы можно определить графическим способом с помощью кривой давления насыщения. Точку росы можно рассчитать только в том случае, когда кроме температуры воздуха известна также его относительная влажность. Вместо расчета можно воспользоваться измерением. Если медленно охлаждать полированную поверхность плиты (или мембраны), выполненную из теплопроводного материала, до тех пор, пока не начнется выпадение на ней конденсата, и измерить затем температуру этой поверхности, можно прямым путем найти точку росы окружающего воздуха. Применение этого метода не требует знания относительной влажности воздуха, хотя можно дополнительно по температуре воздуха и точке росы вычислить значение  $\varphi$ .

На этом принципе базируется действие *гигрометра* для определения точки росы Даниеля и Рейнольта, который разработан в первой половине XIX столетия. В последнее время благодаря применению электроники он был настолько улучшен, что позволяет определить точку росы с очень высокой точностью. Таким образом, можно соответствующим образом калибровать нормальный гигрометр и контролировать его с помощью гигрометра, предназначенного для определения точки росы.

#### 8. ОБРАЗОВАНИЕ КОНДЕНСАТА НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Если температура воздуха в помещении  $\theta_{вн}$  выше температуры наружного воздуха  $\theta_{вн}$ , в наружной стене образуется перепад температур, который зависит от сопротивления теплопередаче стеновой конструкции, всегда меньше, чем разность температур  $\theta_{вн} - \theta_{вн}$ . Причина уменьшения перепада состоит в наличии сопротивлений теплоотдаче  $1/\alpha_{в}$  (внутри) и  $1/\alpha_{н}$  (снаружи), доля которых в общем температурном перепаде между воздухом помещения и наружным воздухом тем больше, чем меньше сопротивление теплопередаче. Наиболее ярким примером может служить одинарное остекление окна, термическое сопротивление которого составляет лишь незначительную долю обоих сопротивлений теплоотдаче.

Абсолютная величина сопротивления теплоотдаче определяется прежде всего движением воздуха в зоне, близкой к поверхностям конструкции, которое может колебаться в очень широких границах. Сопротивление теплоотдаче тем больше, чем меньше скорость движения воздуха. Термическое сопротивление конструкции не оказывает на нее никакого влияния.

В соответствии с DIN 4108 среднее значение наружного сопротивления теплоотдаче  $1/\alpha_{н}$  принимается равным  $0,04 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ , внутреннего сопротивления теплоотдаче  $1/\alpha_{в}$  -  $0,12 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$  (когда речь идет



Рис 8

о поверхностях стен и окон, а также перекрытий, если поток тепла направлен снизу вверх).

В верхних и горизонтальных углах помещения, а также позади висящих гардин и стоящих возле стен предметов оборудования фактическое сопротивление теплоотдаче  $1/\alpha_в$  значительно повышается. Его значение может достигать 0,17—0,22 м²·К/Вт, поэтому зоны наружных стен требуют особо критического рассмотрения.

Сопротивление теплопередаче конструкции  $1/k$  состоит из термического сопротивления конструкции  $1/\Lambda$  и обоих сопротивлений теплоотдаче  $1/\alpha_н$  и  $1/\alpha_в$ . При стационарной передаче тепла перепад температур между воздухом помещения и внутренней поверхностью конструкции пропорционален общему перепаду температур между воздухом помещения и наружным воздухом (рис 8). Отсюда следует

$$\theta_{вв} - \theta_{ов} = (\theta_{вв} - \theta_{он}) \cdot (1/\alpha_в) / (1/k) = (\theta_{вв} - \theta_{он}) \cdot (k/\alpha_в)$$

Если температура поверхности, обращенной к помещению, ниже точки росы воздуха помещения, избыточный водяной пар выпадает на поверхности конструкции.

Если температура поверхности несколько выше точки росы, часть молекул водяного пара притягивается к ней, что ведет к образованию тончайшей пленки воды, которая притягивает пыль и этим способствует возникновению на поверхности темных пятен или плесени. При этом поверхность конструкции в этих зонах достигает температуры, максимально приближенной к точке росы. Длительное воздействие конденсата на влагопоглощающие поверхности материалов (бумажные обои, гипсовая штукатурка, деревянная облицовка и т.д.) приводит к образованию грибковой плесени и разрушению. Поэтому желательно, чтобы за счет повышения термического сопротивления  $1/\Lambda$  разность температур  $\theta_{вв} - \theta_{ов}$  сохранялась настолько малой, чтобы даже при неблагоприятных климатических условиях температура поверхности не была ниже точки росы.

## 9. ДИФфуЗИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ВОЗДУХЕ

Если в сосуд с разделительной перегородкой ввести две газовые смеси, имеющие одинаковые температуру и общее давление, но с разными парциальными давлениями и затем удалить перегородку, молекулы компонентов смеси из отделения с более высоким парциальным давлением стремятся перейти в отделение с меньшим давлением. Этот процесс, называемый *диффузией*, длится до тех пор, пока не произойдет выравнивания парциальных давлений. Во время перемещения молекул общее давление обеих газовых смесей остается одинаковым.

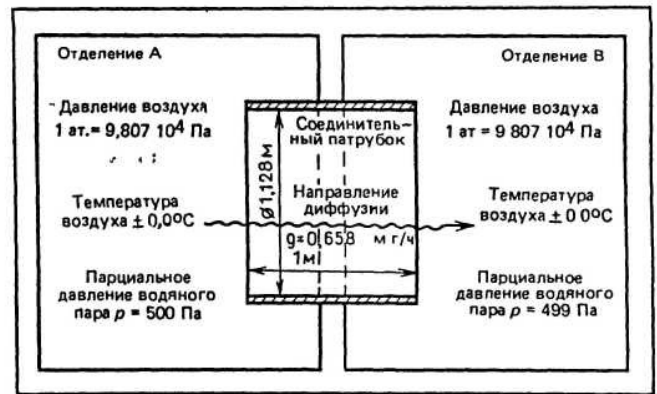


Рис 9

При одинаковых разностях парциальных давлений между соседними помещениями диффузия происходит тем быстрее, чем выше температура газовых смесей. Стремление к выравниванию парциальных давлений свойственно паровоздушным смесям с различными плотностями водяного пара.

Предположим, что в камере между отделениями А и Б установлен соединительный патрубок площадью 1 м² и длиной 1 м (рис. 9). Температура воздуха в обоих помещениях составляет ±0°C (273,16 К), а давление 1 кгс/см² (9,807 Па), т.е. давление равно одной *технической атмосфере* (ат), или 735,56 Торр. Для расчета диффузии в СИ предположим, что парциальное давление водяного пара в отделении А на 1 Па выше, чем в отделении Б. Предположим также, что имеется возможность с высокой точностью определить вес водяного пара, диффундировавшего в течение часа из отделения А в отделение Б (будем считать, что соединительный канал заполнен сухим воздухом, а оба его отверстия закрыты мембранами с бесконечно малым сопротивлением диффузии). Тогда масса водяного пара составит  $g = 0,000658$  г. Обратное значение будет равно  $1/g = 1519,3$ . Обозначим его  $N$ .

Эта величина показывает, на какое число должна быть разделена разность парциальных давлений  $p_A - p_B$  или (в обычном обозначении)  $p_1 - p_2$ , чтобы при температуре воздуха ±0°C (273,16 К) и давлении воздуха  $9,807 \cdot 10^4$  Па (1 кгс/см², или 735,56 Торр) количество водяного пара, диффундирующего через слой воздуха площадью 1 м² и толщиной 1, м за 1 ч, было выражено в граммах (г). Парциальные давления при этом включаются в расчет в Паскалях (Па). Таким образом,  $g = [p_1 - p_2 \text{ (Па)}] / 1519,3$  грамм (г). Газовая постоянная водяного пара  $R_{H_2O}$  равна 462 Дж/(кг·К), или 47,1 м·кгс/(кг·К).

Если перемножить приведенное выше значение  $g$ , равное 0,000658 г, с  $R_{H_2O}$ , равным 462, и К (или Т), равным 273, получим *коэффициент диффузии* для смеси воздух — водяной пар:  $D = 83$  г, или 0,083 кг.

Отсюда следует:

$$g = \frac{D}{R_{H_2O} \cdot T} = \frac{0,083}{462 \cdot 273} \text{ кг} = 0,00000658 \text{ кг} = 0,000658 \text{ г.}$$

Вычислить значение  $N$  можно только после определения массы водяного пара, диффундирующего через 1 м² площади слоя воздуха толщиной 1 м в течение 1 ч. Разумеется, коэффициент диффузии  $D = 0,083$  только при условии, что температура воздуха равна ±0°C, а давление воздуха составляет 1 ат.

При определенной разности парциальных давлений  $p_1 - p_2$  количество водяного пара, диффундирующего через неподвижный воздух, повышается при уменьшении общего давления  $p_{общ}$  и повышении абсолютной температуры  $T$  и наоборот. Поэтому коэффициент диффузии  $D$  зависит от климатических условий. Ширмер дает уравнение  $D = 0,083 \cdot (736 \text{ Торр}/p_{общ}) \cdot (T/273 \text{ К}) \cdot 1,81$ . Из уравнения следует что изменение давления воздуха 736 Торр/ $p_{общ}$  влияет на коэффициент диффузии меньше, чем изменение температур  $T(\text{К})/273 \text{ К}$ .

Поэтому при расчетах диффузии можно не учитывать давления воздуха, так как рассматриваемые здания расположены, как правило, на высоте с более или менее нормальным атмосферным давлением. Второй член уравнения для определения коэффициента диффузии может быть в большинстве случаев принят равным 1 или им можно совсем пренебречь.

Коэффициент диффузии водяного пара в воздухе  $D$  показывает, сколько кг водяного пара диффундирует через  $1 \text{ м}^2$  слоя воздуха толщиной  $1 \text{ м}$  за  $1 \text{ час}$ , если разность парциальных давлений  $p_1 - p_2$  составляет  $1 \text{ Па}$ . Чтобы получить результат в граммах, вместо  $0,083 \text{ кг}$  в уравнение следует подставить значение  $83 \text{ г}$ . Значение  $N$  равно  $1/g$ , т.е. является величиной, обратной массе водяного пара  $g$  и представляет собой ординату кривой  $N$  как функции температуры.

Диффузия водяного пара в воздухе имеет аналогию в электротехнике. Если заменить разность парциальных давлений  $p_1 - p_2$  разностью потенциалов электрического заряда т.е. напряжением  $U$ , и рассматривать разделяющий слой воздуха как проводник тепла с отрицательным температурным коэффициентом, обладающим определенным сопротивлением, его электрическое сопротивление  $R$  с повышением температуры нелинейно падает. При этом сила тока  $I$  соответствует диффузионному потоку водяного пара  $g$ .

По закону Ома  $I = U/R$ , причем  $R$  прямо пропорционально длине проводника и обратно пропорционально его сечению. При увеличении температуры в зависимости от температурных коэффициентов сила тока  $I$  повышается обратно пропорционально длине проводника  $L$  и прямо пропорционально его сечению  $F$ . В электротехнике толщина разделяющего слоя воздуха  $d$  аналогична длине проводника  $L$ .

При одинаковом сопротивлении  $R$  сила тока  $I$  увеличивается прямо пропорционально увеличению напряжения  $U$ , т.е. аналогично увеличению разности парциальных давлений водяного пара  $p_1 - p_2$ .

## 10. ДИФфуЗИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Многие строительные материалы являются пористыми и имеют поэтому различную плотность. При абсолютно сухом материале поры и капилляры заполнены воздухом. Однако если строительный материал находится в воздухе, содержащем водяной пар, определенное количество водяного пара проникает в воздушные поры материала и конденсируется на их стенках до тех пор, пока не установится *равновесная влажность*, которая зависит от парциального давления пара в окружающем воздухе. Если строительный материал полностью покрыт водой, поры и капилляры, выходящие на поверхность, полностью заполняются водой и плотность строительного материала достигает своего максимума.

Через перегородку между двумя помещениями с различными парциальными давлениями водяного пара ( $p_1 - p_2$ ), выполненную из пористого строительного материала, начинает диффундировать водяной пар. При этом в материале устанавливается равновесная влажность. Удельная плотность диффузионного потока при этом существенно меньше, чем при диффузии пара через

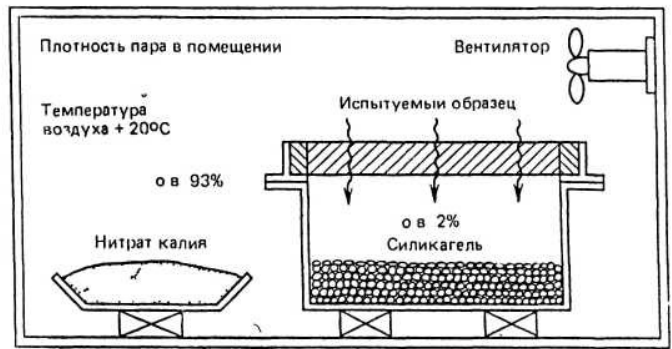


Рис 10

слой неподвижного воздуха. Чем больше проницаемость стенок пор, тем больше удельная плотность потока пара приближается к значению диффузии через слой воздуха.

Отношение  $g_{возд}/g_{матер}$  называется *коэффициентом сопротивления диффузии*  $\mu$ . Он представляет собой относительную величину, численное значение которой всегда  $> 1$ . Коэффициент сопротивления диффузии  $\mu$  можно взять из таблиц, которые составлены на базе многочисленных лабораторных измерений и постоянно улучшаются или уточняются.

По способу Каммерера в паронепроницаемый сосуд (рис. 10) помещают слой высушенного силикагеля и плотно закрывают пригнанной (с уплотнением в швах) плитой, изготовленной из строительного материала, который нужно исследовать. После взвешивания сосуд вносят в паронепроницаемое помещение, в котором находится открытый сосуд с насыщенным раствором нитрата калия. Внутреннюю температуру помещения поддерживают на уровне  $\approx +20^\circ\text{C}$ . Наличие в помещении раствора соли обеспечивает в нем постоянную относительную влажность воздуха примерно 93%, а в закрытом сосуде относительная влажность составляет около 2%. Это создает значительный перепад парциальных давлений, что приводит к диффузии пара через испытываемый образец внутрь сосуда. Отдаваемый нитратом калия пар поглощается силикагелем и парциальное давление при этом не изменяется. Через несколько дней (или недель) сосуд выносят из помещения и снова взвешивают. На основании прироста массы можно определить плотность потока пара  $g$  и коэффициент сопротивления диффузии  $\mu$ .

Диффузия водяного пара через пористый материал часто совпадает с капиллярным перемещением влаги, которое в таком случае должно приниматься во внимание. Если при определении коэффициента сопротивления диффузии применить способ двух зон, где проба строительного материала подвергается воздействию перепада влажности воздуха вначале в интервале от 50 до 0%, а затем от 100 до 50%, можно установить, что во влажной зоне паропроницаемость значительно больше, чем в сухой.

Для определения зависимости значения  $\mu$  испытываемого строительного материала от относительной влажности примыкающих слоев воздуха можно использовать два плоских паронепроницаемых сосуда с особым образом обработанными краями, которые обеспечивают эффективное уплотнение в них проб строительного материала. Первый сосуд заполняют силикагелем, второй дистиллированной водой; затем оба сосуда закрывают одинаковыми пробками и ставят в помещение, относительная влажность воздуха в котором составляет около 50% (как в обычных помещениях). Поскольку в первом сосуде относительная влажность близка к 0%, водяной пар из помещения

диффундирует через пробу снаружи внутрь этого сосуда. Внутренняя влажность во втором сосуде близка к 100%, поэтому диффузия пара идет изнутри, наружу. Если бы коэффициенты сопротивления диффузии обеих проб в сухой (сосуд 1) и влажной (сосуд 2) зонах были равны, то в помещении через некоторое время установилась бы относительная влажность, равная точно 50% (при условии, что относительная влажность в сосуде 1 равна точно 0%, а в сосуде 2 точно 100%). При одинаковых разности парциальных давлений и размерах проб в сосуд 1 должно было диффундировать точно такое же количество водяного пара, как диффундировало бы из сосуда 2. Поэтому независимо от отклонений относительной влажности и температуры помещения равновесная влажность 50% доказала бы, что никаких различий между  $\mu_c$  (сухая зона) и  $\mu_e$  (влажная зона) нет.

Однако, если  $\mu_e < \mu_c$ , то преобладает количество водяного пара, который диффундирует в направлении помещения, что ведет к повышению относительной влажности. Равновесная влажность устанавливается, если отношение разностей парциальных давлений, под действием которых находятся обе пробы, соответствует отношению значений коэффициентов сопротивления диффузии  $\mu$ . Таким образом,  $\Delta p_1 / \Delta p_2 = \mu_c / \mu_e$ .

Если, например, равновесная влажность в помещении составит 60%, проба 1 будет находиться под действием разности парциальных давлений 0,6  $p_{нас}$ , проба 2 под действием разности 0,4  $p_{нас}$ . Отсюда следует  $\mu_c / \mu_e = 0,6/0,4 = 1,5$ .

Чем больше равновесная влажность воздуха в помещении превышает 50%, тем коэффициент сопротивления диффузии  $\mu_e$  влажной зоны меньше коэффициента сопротивления диффузии  $\mu_c$  сухой зоны. Описанный способ позволяет рассчитать отношение значений  $\mu$  с высокой точностью. Поскольку в определении массы нет необходимости, сосуды, а также пробы материала могут иметь любые размеры. С увеличением площади поверхности проб уменьшается относительная площадь краевых участков и тем самым влияние возможной неравномерности диффузии. Путем двукратного замера проб можно установить их фактическую однородность.

Если вследствие повышения уровня температуры, а также ожидаемого притока или оттока водяного пара равновесная влажность изменяется, то возможен расчет значения  $\mu$ . В этом случае определяют время, которое необходимо для того, чтобы снизить разность относительных влажностей на половину первоначальной величины. Это время зависит от объема помещения и паропроницаемости проб. Температура в помещении в течение всего времени испытания должна сохраняться на постоянном уровне.

Если перемножить коэффициент сопротивления диффузии  $\mu$  и толщину слоя  $d$  пористого материала, получим *сопротивление диффузии*  $\mu d$  соответствующего слоя материала. В литературе иногда применяют также понятие *парциальное сопротивление диффузии*, которое является более точной характеристикой, особенно при рассмотрении многослойных конструкций.

Сопротивление диффузии  $\mu d$  имеет единицу измерения 1 метр (м). Оно показывает, насколько сопротивление диффузии слоя строительного материала толщиной  $d$  больше (или меньше) сопротивления диффузии слоя воздуха толщиной 1 м.

*Проницаемость водяного пара*  $A_{II}$  показывает, какое количество водяного пара в граммах в течение 1 ч диффундирует через 1 м<sup>2</sup> слоя строительного материала, если разность парциальных давлений  $p_1 - p_2$  между противоположными границами слоя составляет 1 Па. Таким образом, получаем уравнение  $A_{II} = 1/\mu d N$  г/

/(м<sup>2</sup>·ч). В данном уравнении значение  $N$  находится в знаменателе.

Если в числитель последнего уравнения подставить разность парциальных давлений  $p_1 - p_2$ , получим количество водяного пара, которое фактически диффундирует через соответствующий слой строительного материала [г/(м<sup>2</sup>·ч)]:  $g = (p_1 - p_2)(Па)/N d \mu$ .

Оно в  $1/(\mu d)$  раз превышает количество водяного пара, который при той же разности парциальных давлений и такой же температуре диффундировал бы через слой неподвижного воздуха площадью 1 м<sup>2</sup> и толщиной 1 м.

Если парциальные давления  $p_1$  и  $p_2$  определять не исходя из относительной влажности воздуха и температуры примыкающих к ограждению помещений, то найденное по приведенному выше уравнению количество водяного пара, который в течение 1 ч диффундировал через слой строительного материала, окажется несколько выше действительного количества.

Причина этой разности состоит в том, что кроме значения проницаемости водяного пара  $A_{II}$  на общую паропроницаемость оказывают влияние значения *коэффициентов перехода водяного пара*  $\beta_n$  (снаружи) и  $\beta_e$  (внутри), которые аналогичны коэффициентам теплоотдачи  $\alpha_n$  и  $\alpha_e$ .

Обратные величины  $1/\beta_n$  и  $1/\beta_e$  также по аналогии называют *сопротивлениями переходу* водяного пара. Однако по сравнению с *сопротивлением паропроницанию*  $1/A_{II}$  слоя материала последние настолько малы, что при диффузионных расчетах ими можно пренебречь.

Только при особо точных расчетах *общего сопротивления паропроницанию*  $1/k_{II}$  к сопротивлению паропроницанию конструкции  $1/A_{II}$  следует добавлять сопротивления переходу пара на поверхностях (м·ч/г):  $1/k_{II} = 1/\beta_n + 1/A_{II} + 1/\beta_e$ .

Таким образом, в обычных случаях излишне учитывать очень маленькую разницу парциальных давлений воздуха помещения и на поверхностях конструкций. Здесь расчеты диффузии весьма существенно отличаются от расчетов теплопередачи, при которых сопротивления переходу прежде всего значения  $1/\alpha_e$  оказывают большое влияние на перепад температур.

## 11. КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ТОЛЩЕ ОДНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Если противоположные поверхности однородной стены из пористого материала, например из кирпичной кладки, имеют одинаковую температуру, разностью парциальных давлений водяного пара с обеих сторон стены можно пренебречь. Соответствующие температуре в стене давления насыщенного пара  $p_{нас}$  во всех сечениях, параллельных поверхностям стены, расположены выше парциальных давлений  $p$  и даже в тех случаях, когда относительная влажность воздуха на одной из сторон стены равна 99%.

Если одна сторона стены охлаждается до температуры  $\theta_{он}$ , между  $\theta_{ов}$  и  $\theta_{он}$  образуется перепад температур, в направлении которого через некоторое время устанавливается стационарный тепловой поток. Градиенты температур между параллельными поверхностям слоями стен равной толщины также одинаковы, и падение температур внутри стены происходит линейно.

Однако, поскольку кривая давлений насыщенного пара  $p_{нас}$  ни в коем случае не является линейной, а сильно выгнута вниз, для отдельных границ слоев падение фактических давлений насыщенного пара может происходить значительно быстрее, чем соответствующее падение температур.

Если с целью упрощения исходить из того, что распределение парциальных давлений так же, как и распределение температур, имеет линейный характер, при вы-





Рис 11

соких значениях относительной влажности воздуха на обеих сторонах стены складывается ситуация, при которой прямая парциальных давлений становится касательной к кривой  $p_{нас}$ . Если относительная влажность воздуха на теплой стороне стены хотя бы немного повысится, прямая парциальных давлений превратится в секущую, которая пересекается с кривой  $p_{нас}$  в двух точках (рис. 11).

Диффундирующий через стенку водяной пар конденсируется вначале в плоскости стены, в которой происходит переход от первоначальной касательной к секущей, т.е. в зоне точки касания. От теплой стороны стены, вследствие разности давлений пара между поверхностью стены и плоскостью конденсации, внутрь продолжает постоянно диффундировать водяной пар. В связи с этим плоскость конденсации постепенно перемещается по направлению к теплой стороне и это продолжается до тех пор, пока касательная, идущая от точки  $p_{ов}$  к кривой  $p_{нас}$ , не соприкоснется с последней.

А так как прежняя плоскость конденсации не изменяется, а определенным образом лишь *разделяется* между прежней и новой, обращенной к теплой стороне стены, точками касания образуется зона конденсации. Образующийся благодаря описанному процессу конденсат называется *конденсатом ядра*, а соответствующая зона стены *ядром зоны конденсации*.

Часто не учитывают, что фактическое распределение парциальных давлений нелинейно. Вследствие зависимости диффузии водяного пара от температуры при стационарном потоке пара кривая давлений отклоняется вверх. Таким образом, фактическая ситуация менее благоприятна, чем идеализированная. Хотя часть находящегося в ядре конденсата на обращенной к холодной стороне границе зоны конденсации снова превращается в водяной пар (а при температуре ниже точки замерзания наблюдается сублимация, т.е. прямой переход льда в пар), все же происходит *накопление конденсата*. Оно продолжается до тех пор, пока количество диффундирующего от теплой стороны пара превышает количество пара, диффундирующего из зоны конденсации к холодной стороне.

Высушивание возможно лишь при определенном, повышении температуры  $\theta_{вн}$  или при достаточном снижении относительной влажности воздуха на теплой стороне и, следовательно, парциального давления  $p_{ов}$ . Накопления конденсата можно избежать, если критическая температура на холодной стороне, т.е. температура, при которой начинается образование ядра конденсации, не выше среднего значения температуры на холодной стороне в течение определенного периода. На практике это означает, что критическая температура

наружного воздуха  $\theta_{вн}$  не должна быть ниже средней годовой температуры в месте расположения здания.

Без дополнительных мероприятий невозможно полностью избежать образования ядра конденсации в наружных стенах помещений с высокой влажностью воздуха.

## 12. КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Как правило, многослойная конструкция состоит из несущего, теплоизолирующего и защитного (или облицовочного) слоев. Коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  материала отдельных слоев ограждения обычно бывают различными. Поэтому распределение температур внутри многослойной конструкции имеет вид ломаной линии. Угловые точки температур располагаются на границах слоев материалов.

Поскольку в большинстве случаев коэффициенты сопротивления диффузии  $\mu$  материалов отдельных слоев также различны при разных давлениях пара, распределение парциальных давлений также имеет вид ломаной линии, угловые точки которой лежат на границах слоев. Кривая давлений насыщенного пара  $p_{нас}$  (рис. 12) также имеет вид ломаной линии. Точки перелома лежат на тех же границах слоев.

При диффузии водяного пара через многослойную конструкцию ситуация не является критической до тех пор, пока ломаная линия парциальных давлений не коснется ломаной линии давлений насыщенного пара. Касание или пересечение этих линий означает образование на соответствующем участке плоскости или зоны конденсации. Следует учитывать, что в действительности ломаная линия парциальных давлений представляет собой ломаную кривую с небольшим выгибом вверх. Поэтому фактически соприкосновение или пересечение кривых  $p$  и  $p_{нас}$  происходит несколько раньше.

Так как давления насыщенного пара зависят от температур слоев или температур на границах слоев, падение кривой  $p_{нас}$  тем заметнее, чем меньше коэффициент теплопроводности материала этого слоя. Оно наблюдается только в том случае, если высок коэффициент сопротивления диффузии  $\mu$  рассматриваемого слоя. Отсюда следует, что только при одинаковых значениях произведений  $\lambda\mu$  всех слоев создается ситуация, характерная для однородной конструкции. При увеличении значения произведения  $\lambda\mu$  по мере приближения к теплой стороне образование конденса-

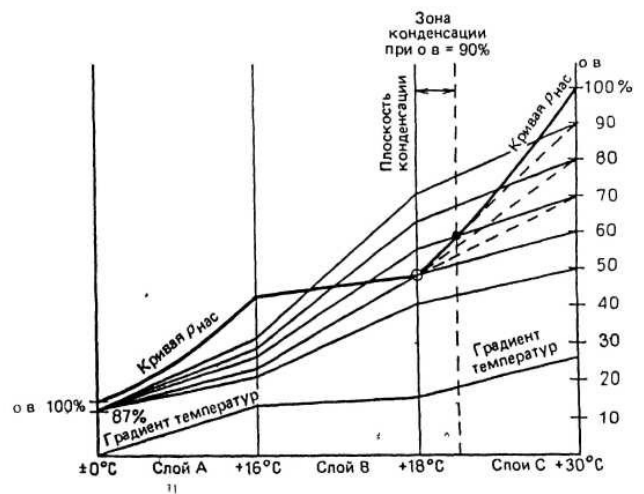


Рис. 12

та даже при экстремальной разнице в условиях на обеих поверхностях конструкции исключено.

Теплоизоляционный слой имеет малое значение произведения  $\lambda \mu$ . Поэтому, если это возможно, его располагают на холодной стороне. Расположение слоев теплоизоляции на теплой стороне ограждения, имеющего относительно большую толщину, может привести к накоплению значительного количества конденсата на границе слоя ограждения, если не будут приняты специальные меры. Аналогичное положение создается при применении плит типа "сэндвич" или подобных им конструкций. Обычное для них расположение слоя теплоизоляции в середине может привести к возникновению явлений, связанных с конденсацией.

Самопроизвольное осушение конструкции от конденсатной влаги может произойти только тогда, когда кривая  $p$  снова отдалится от кривой  $p_{нас}$  и количество водяного пара, выходящего через холодную сторону, превысит приток водяного пара с теплой стороны. После завершения процесса осушения снова устанавливаются стационарные условия.

### 13. ПРИМЕНЕНИЕ ПАРОИЗОЛЯЦИИ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЙ ПРОНИЦАНИЕ ПАРА ИЛИ УМЕНЬШАЮЩЕЙ ЕГО КОЛИЧЕСТВО

Если в однородной наружной стене помещения со сравнительно высокими температурой и относительной влажностью воздуха необходимо полностью исключить образование ядра конденсации даже при низких температурах наружного воздуха, на теплой стороне следует расположить слой, который уменьшает и замедляет диффузию водяного пара. Этот слой представляет собой либо малопроницаемую краску, либо искусственную пленку, с обеих сторон оклеенную слоями бумаги (в этом случае она выпускается в виде обоев). Иногда применяют тонкий битуминизированный картон или битуминизированную бумагу.

Большое сопротивление диффузии таких материалов, а вследствие их небольшой толщины перепада температур на поверхностях такого слоя практически нет приводит к тому, что кривая  $p$  делает резкий скачок вниз, т.е. лишается вершины. Величина этого скачка или ступени (если сравнить кривую  $p$  с лестницей) зависит от соотношения значений  $\mu d$  слоя, снижающего паропроницание, и стены (рис. 13).

Благодаря этой ступени кривая  $p$  так сильно удаляется от кривой  $p_{нас}$  что при соответствующих размерах или выборе пароизоляционного материала со-

прикосновение кривых не происходит даже в самых неблагоприятных граничных случаях.

Еще одним примером применения слоя, уменьшающего паропроницание, может служить *холодная крыша*. Ее устройство таково, что в воздушное пространство между верхним и нижним ограждениями диффундирует очень небольшое количество водяного пара. Поэтому в любое время за счет поперечного проветривания он может быть удален из этого воздушного пространства. При этом не возникает опасности для конструкции крыши, так как в критических ситуациях конденсат не образуется.

Подобную цель можно преследовать при применении вентилируемых экранов фасадных стен, если к ним примыкают помещения с высоким давлением пара и есть опасения, что одного лишь действия потока воздуха недостаточно для удаления поступающего сюда потока водяного пара.

Пароизоляция отличается от материалов, предназначенных лишь для уменьшения паропроницания, своим более высоким сопротивлением диффузии. Вообще, термин пароизоляция следовало бы применять лишь в том случае, если сопротивление диффузии такого слоя  $\mu d$  бесконечно велико. Однако это возможно лишь при применении бесшовных металлических листов или стекла, через которые диффузия пара не возможна.

В строительной практике понятие *пароизоляция* применимо уже при  $\mu d > 10$  м, что при определенных обстоятельствах может быть отнесено и к высококачественным материалам, используемым обычно лишь для уменьшения паропроницания. Это ограничение необходимо учитывать при выборе подходящей пароизоляции.

Почти всегда пароизоляция содержит в своем составе гладкую или профилированную алюминиевую фольгу толщиной от 0,06 до 0,1 мм, а в качестве покрытия в большинстве случаев применяются битумные материалы или рулонная бумага с промежуточными слоями в виде термопластов.

Определенная проблема возникает при устройстве стыков между полосами материала, потому что очень трудно обеспечить там такое же сопротивление диффузии, как на самих полосах пароизоляции. Поэтому при относительно тонких изделиях предпочтительно применять перекрытие стыков внахлест, иногда целесообразным является также приклеивание при этом второго слоя.

Чаще всего пароизоляцию применяют в теплых крышах, которые вследствие высокого сопротивления диффузии кровельного ковра и отсутствия поперечного проветривания особенно подвержены конденсатообразованию. В таких конструкциях наибольшее количество конденсата накапливается в слое теплоизоляции. Высушивание этого слоя длится очень долго, если это вообще возможно. Нередко приходится производить дорогостоящие ремонтные работы.

Еще одной областью применения пароизоляции являются многослойные наружные стены с неправильным (в отношении диффузии пара) расположением слоев и относительно высоким давлением пара на теплой стороне. Типичными примерами являются плавательные бассейны и холодильники, при устройстве которых могут наблюдаться экстремальные условия.

При применении пароизоляции понижение кривой  $p$  (и тем самым расстояние между кривыми  $p$  и  $p_{нас}$ ) больше, чем при применении материалов, которые лишь уменьшают паропроницание. Таким образом, можно еще легче ликвидировать опасность пересечения кривых или ограничить это пересечение лишь короткими периодами с особенно неблагоприятными климатическими условиями.

В заключение отметим, что использование пароизоляции или материалов, уменьшающих паропроницание,

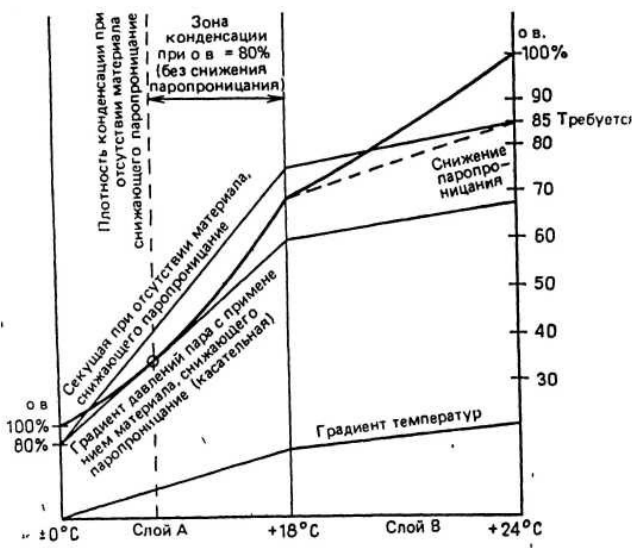


Рис. 13

ограничено лишь определенными конструкциями, рациональными с точки зрения строительной физики. Поэтому, правильная оценка той или иной ситуации имеет большое значение.

#### 14. ВЛАЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Пористый материал может быть совершенно свободен от воды лишь тогда, когда он находится в абсолютно сухом воздухе. Поскольку в естественных условиях воздух имеет большую или меньшую относительную влажность, в любом пористом материале содержится влага. Этот факт объясняется тем, что молекулы водяного пара, содержащиеся в окружающем воздухе, откладываются на стенках пор в виде мономолекулярного слоя (рис. 14). Это явление носит название адгезии. Она возникает между молекулами различных веществ и при повышении относительной влажности воздуха постепенно приводит к образованию полимолекулярной водяной пленки. При этом сила адгезии для внешнего молекулярного слоя превышает силу когезии поверхности воды, которая для давления насыщенного пара  $p_{нас}$  над этой поверхностью является значительно большей.

Отсюда следует, что давление насыщенного пара  $p'_{нас}$  над адсорбированной водяной пленкой ниже, чем давление насыщенного пара  $p_{нас}$  над нормальной поверхностью воды. Обозначив разность давлений пара  $\Delta p_{нас}$  и относительную влажность воздуха над адсорбированной водяной пленкой  $\phi'_{нас}$ , получим следующее уравнение:  $\phi'_{нас} = p'_{нас} / p_{нас} = (p_{нас} - \Delta p_{нас}) / p_{нас}$ .

Равенство значений относительной влажности  $\phi$  и  $\phi_{нас}$  создает равновесное состояние, так как воздух, содержащий водяной пар, имеет такую же температуру, как и поверхность водяной пленки. Если устанавливается *гигроскопическая равновесная влажность*, образование водяной пленки прекращается.

Вследствие повышения относительной влажности воздуха и нарушения первоначального равновесия влажность строительного материала возрастает. Благодаря дальнейшему накоплению молекул воды разность давлений пара  $\Delta p_{нас}$  должна сокращаться до тех пор, пока значение  $\phi_{нас}$  снова сравняется со значением повышенной относительной влажности  $\phi$ , что приведет к установлению нового равновесного состояния. Гигроскопическая равновесная влажность достигает своего максимума при относительной влажности воздуха 100%.

Процессы, связанные с поглощением влаги пористыми материалами из содержащего водяной пар окружающего воздуха, называются *сорбцией*. Понятие сорбция охватывает отдельные области, называемые *адсорбцией*, *капиллярной конденсацией* и *хемосорбцией*, которые часто происходят одновременно и поэтому различаются и поддаются учету с большим трудом. В рамках строи-

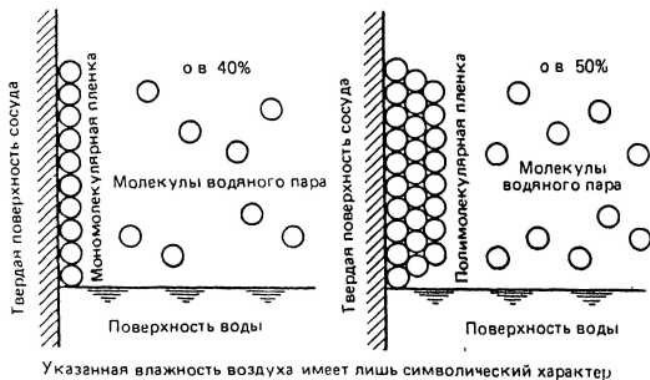


Рис. 14

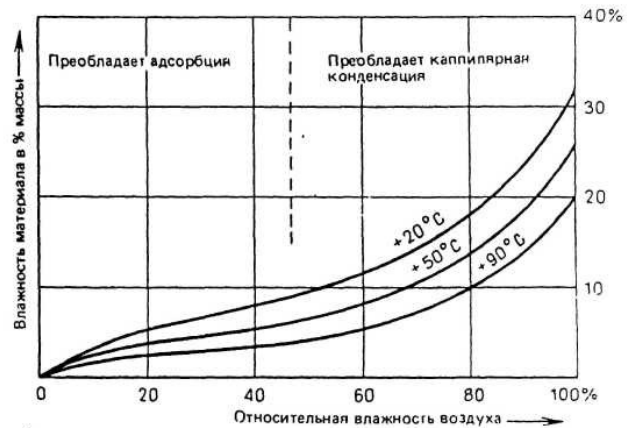


Рис. 15

тельной физики решающую роль играют адсорбция и капиллярная конденсация.

Капиллярная конденсация является процессом, который в отличие от адсорбции на поверхности и в порах материала происходит тем интенсивнее, чем выше поднимается относительная влажность (о.в.) воздуха. Если последняя составляет, например, 35%, то полностью заполняются конденсатом водяного пара лишь капилляры цилиндрической формы, радиус которых составляет  $1 \cdot 10^{-9}$  м, т.е. 1 нанометр (нм). При о.в., равной 70%, насыщаются конденсатом капилляры радиусом 3 нм, при о.в., равной 80%, — капилляры радиусом 4,7 нм. Дальнейшее увеличение радиуса происходит прогрессирующим образом. Так, для о.в. = 90% радиус составляет 10 нм, для о.в. = 97% радиус составляет 35 нм, а для о.в. = 99,9% — 1000 нм.

Количество влаги, образующееся благодаря сорбции, зависит при определенной относительной влажности воздуха от вида и структуры пор или капилляров материала и от температуры. Поглощение влаги повышается при снижении последней. Чтобы построить изотерму сорбции соответствующего материала для выбранной температуры (рис. 15), необходимо построить систему координат, у которой ось абсцисс представляет собой шкалу относительных влажностей воздуха от 0 до 100%, а ось ординат — шкалу поглощения влаги в процентах массы. Затем следует нанести определенные в лабораторных условиях равновесные значения влажности материала. Форма изотермы сорбции слегка напоминает букву S. Начиная от нулевой точки она несколько вогнута, далее становится выпуклой по отношению к оси абсцисс и достигает своего максимума при о.в. — 100%. Для вогнутой зоны преобладающими являются процессы адсорбции, а для выпуклой — процессы капиллярной конденсации. Вначале доминирует *адгезионная* (поверхностная) влага, а затем — влага в порах. Если повторить тот же самый лабораторный опыт при более высоком уровне температуры окружающего воздуха, получим другую изотерму сорбции, которая располагается ниже первой и почти параллельна ей. Таким образом, гигроскопическая влажность возникает уже при незначительном поглощении влаги материалом.

Влагосодержание материала выражается в процентах от его массы в сухом состоянии. Высушивание пробы материала происходит при условии, что она длительное время находится в воздухе при температуре  $+105^\circ\text{C}$  и при определенных условиях подвергается весовому контролю. Предварительное измельчение пробы ускоряет процесс ее высушивания. Помещение пробы в высокогигроскопичный силикагель способствует быстрой отдаче влаги. Процесс высушивания материала называется

ся десорбцией. Изотермы десорбции, как правило, не совпадают с изотермами сорбции. Причины этого *гистерезиса* до сих пор еще полностью не ясны.

Максимальное влагосодержание строительных материалов органического происхождения при нормальной температуре помещений может достигать 20-30% массы, тогда как влагосодержание строительных материалов неорганического происхождения составляет лишь 1—5% массы. При этом следует помнить, что последние обладают большей плотностью.

Строительный материал называют влажным, если в нем содержится не только сорбционная влага, но также дополнительное количество влаги, которая попадает туда благодаря прямому контакту строительного материала с наружной влагой или за счет конденсации водяного пара внутри.

### 15. КАПИЛЛЯРНЫЙ ПЕРЕНОС ВЛАГИ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Схема взаимодействия сил когезии и адгезии между молекулами жидкости и стенками сосуда изображена на рис 16.

Поскольку поверхность жидкости располагается под прямым углом к общей результирующей, образуется более или менее выраженное скругление, которое при небольших отношениях сил адгезии к силам когезии имеет выпуклую, а при более высоких отношениях этих сил вогнутую форму.

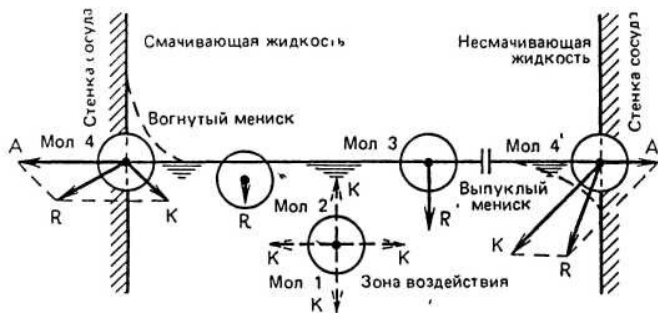


Рис. 16

Жидкость с выпуклым скруглением краев называется *несмачивающей жидкостью*, наиболее известным примером которой является ртуть. Силы когезии в ней достигают значительной величины. Жидкость с вогнутым примыканием краев называют *смачивающей жидкостью*, типичным примером которой может служить вода. Угол примыкания краев ее поверхности к поверхности стекла близок к 0°.

Если погрузить узкую стеклянную трубку в несмачивающую жидкость, в ее пространстве образуется **фффффффффффффффффффффффффффф**

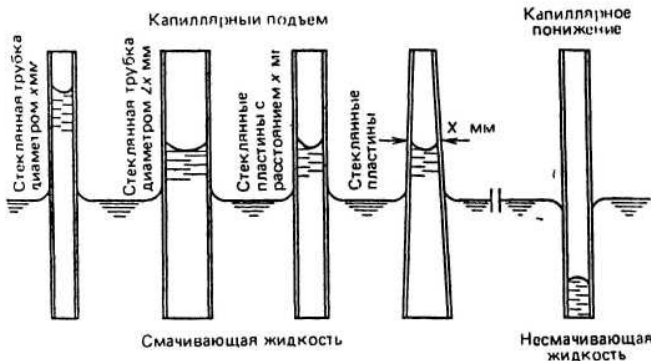


Рис. 17

лярного понижения устанавливается на некотором расстоянии ниже поверхности жидкости.

Если стеклянная трубка находится в смачивающей жидкости, например в воде, то произойдет обратное явление. В этом случае образуется *вогнутый мениск*, который поднимается на некоторую высоту над поверхностью воды под влиянием капиллярного подъема. Высота подъема обратно пропорциональна внутреннему радиусу трубки. При радиусе 1 мм она составляет примерно 15 мм. Чем меньше сечение имеют капилляры, тем значительнее высота подъема жидкости. Если вместо стеклянной трубки опустить в жидкость две параллельные стеклянные пластинки, расстояние между которыми соответствует внутреннему диаметру стеклянной трубки, высота подъема уменьшится до половины своего значения в стеклянной трубке.

Если перевести стеклянные пластинки в непараллельное положение, высота подъема воды определяется исключительно расстоянием между пластинками на их верхнем конце. То же самое действительно для капилляров с переменным радиусом, при котором форма столба подъема ниже мениска не оказывает никакого влияния. В капилляре или узкой щели, находящихся в горизонтальном положении, воды всасывается на всю их длину. Радиус или ширина щели не играют в этом случае существенной роли.

### 16. ОСМОТИЧЕСКИЙ ПЕРЕНОС ВЛАГИ В СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Для иллюстрации данного процесса в сосуд, заполненный водой, поместим стеклянный цилиндр (рис. 18), который снабжен сверху трубкой, а снизу закрыт *полупроницаемой* мембраной. В цилиндре находится раствор соли, зеркало которого в нижней зоне подъемной трубки лежит на уровне зеркала воды сосуда. Мы увидим, что зеркало раствора в трубке установится на высоте  $\Delta h$  над зеркалом воды.

Этот процесс называется *осмосом*. Он вызван тем, что молекулы воды стремятся выровнять разность концентраций обеих жидкостей. Поскольку полупроницаемая мембрана для чистых молекул воды имеет большую, а для молекул раствора лишь очень незначительную проницаемость, молекулы воды до тех пор диффундируют из сосуда в стеклянный цилиндр, пока гидростатическое давление не придет в равновесие с диффузионным давлением. Диффузионное давление называется в этом случае *осмотическим давлением*. При концентрации  $x$  процентов по массе оно составляет  $\approx x \cdot 10^5$  Па и может достигать таким образом весьма значительных величин. Для оценки этого явления французским естествоиспытателем Дютрошем в 1826 г. был разработан *конечный осмометр*, внутренний сосуд которого (см. рис. 18) наполняется насыщенным раствором медного купороса, а нижняя сторона закрыта натянутым

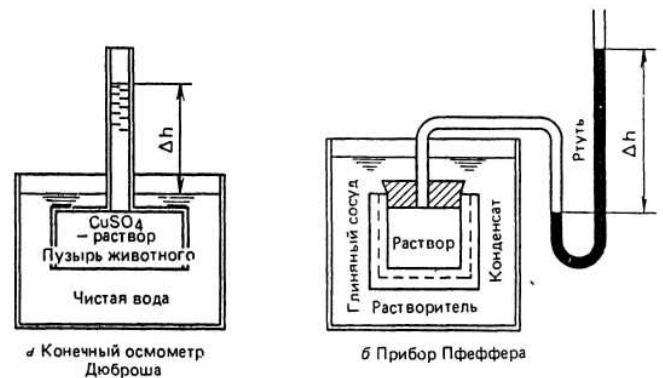


Рис. 18

пузырем животного. Наружный сосуд содержит чистую воду, постепенное окрашивание которой в голубой цвет показывает, что при осмотическом процессе не только молекулы воды диффундируют во внутренний сосуд, но и молекулы растворенного вещества диффундируют в наружный сосуд. Кроме того, был зафиксирован значительный подъем  $\Delta h$  уровня жидкости в вертикальной трубке внутреннего сосуда.

Осмоз имеет большое значение не только для биологии, но также для определенной области строительной техники. Например, в кирпичных стенах подвальных этажей старых строений, которые совершенно не имели гидроизоляции, перенос воды от примыкающего к стенам грунта вверх происходил не только за счет капиллярного подсоса, но и за счет осмотического давления. Этот процесс происходит в том случае, когда в капиллярах и порах содержатся растворы солей. Вследствие постоянного испарения воды в зоне стен, близкой к поверхности земли, они все время повышают свою концентрацию, тем самым способствуя переносу воды путем диффузии при осмотическом давлении.

### 17. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

На внутренних стенках капилляров, содержащих водный раствор, образуется двойной электрический слой, который состоит из положительных ионов (катионов) и отрицательных ионов (анионов) стенок капилляров. Если присоединить к обоим концам стеклянного капилляра электроды (рис. 19) и создать на них постоянное электрическое напряжение, катионы начинают перемещаться к катоду и приводят раствор в движение, которое происходит в том же направлении. Этот процесс называется *электроосмосом*. Такой же эффект возникает, если изогнутую U-образную стеклянную трубку заполнить пористым материалом, например ватой, и частично наполнить водой. В колене U-образной трубки, обращенном к катоду, уровень воды повышается, а в колене, обращенном к аноду, — понижается. Возникающая при этом разность отметок характеризует величину электроосмотического давления.

Если через концы стеклянной трубки с подключенными к ним электродами прокачать водный раствор, катионы двойного слоя увлекаются раствором и накапливаются на том конце капилляра, который обладает свойствами анода. Между ним и противоположным ему катодом образуется электрический потенциал потока, величина которого, наряду с прочими факторами, зависит от скорости потока и может достигать примерно 100 мВ.

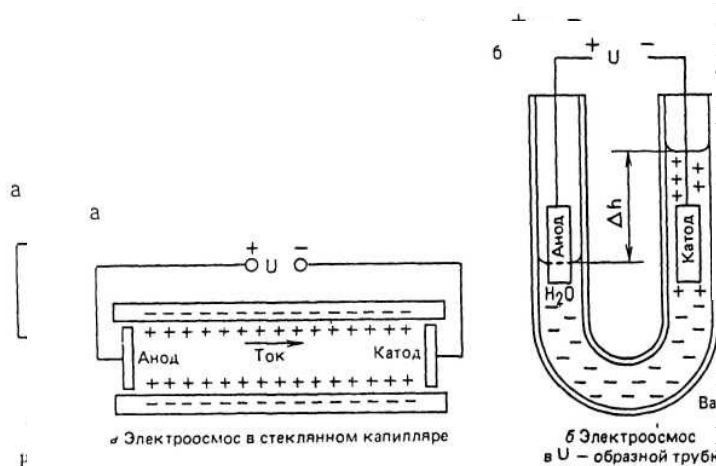


Рис. 19

### 18. ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЕ ВЫСУШИВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Вследствие перемещения влаги в неизолированных или недостаточно изолированных стенах подвалов образуется потенциал потока. Потенциал потока в кирпичной кладке можно преобразовать в активный потенциал и тем самым приостановить капиллярное или осмотическое перемещение влаги. Для этого необходимо устройство двух расположенных один над другим плоскостей электродов, связанных между собой (рис. 20). В некоторых случаях можно изменить направление движения потока на противоположное. Желательным результатом является постепенное высушивание зоны стены, расположенной выше второй плоскости электродов.

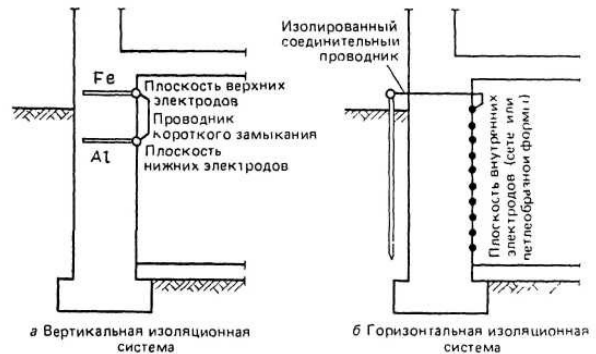


Рис. 20

Если применить электроды, изготовленные из разного металла, то при соответствующем учете электрохимических рядов напряжения можно увеличить активный потенциал и благодаря этому усилить электроосмотический эффект. В качестве альтернативы можно использовать также слабое напряжение постороннего источника, которое подается через трансформатор и выпрямитель от осветительной сети.

В стене подвала, в которой отсутствует или повреждена вертикальная изоляция, грунтовая влага может мигрировать не только в направлении первого этажа, но также к внутренней стороне стены. Поэтому при размещении в подвальных этажах жилых помещений или помещений, используемых для различных занятий, целесообразно использовать для стен горизонтальную изоляционную систему. Такая система состоит обычно из внутреннего электрода, который в виде петли или сетки укладывается в стыки или швы с внутренней стороны стены, и наружного электрода, который состоит из связанных между собой и забитых в грунт прутьев. Вследствие короткого замыкания обеих систем электродов происходит пассивная активация потенциала кирпичной кладки, а при использовании постороннего источника напряжения создается *активное возбуждение*, при котором можно ожидать большего эффекта.

### 19. ДИФфуЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА ПОД ВЛИЯНИЕМ КАПИЛЛЯРНОГО И ОСМОТИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА ВЛАГИ

Из предыдущего изложения можно сделать вывод, что влажностные условия в конструкции (исходя из влияния погодных условий) зависят не только от диффузии водяного пара, но также от структуры капилляров и пор строительного материала. Таким образом происходит как бы наслаивание различных процессов.

Особенно существенным является то обстоятельство, что адсорбция влаги в мелких капиллярах, происходящая на основе закономерностей гигроскопической равновесной влажности, проявляется намного раньше, чем конденсация водяного пара при точке росы. Таким образом, еще до того, как может образоваться плоскость или зона конденсации, часть имеющихся в ней капилляров заполняется водой. Она проникает независимо от градиента давления пара в направлении обеих поверхностей конструкции. Если конструкция состоит из большого числа слоев с различной капиллярной структурой, перенос влаги происходит в направлении более мелких капилляров.

Капиллярный перенос влаги прекращается по достижении слоев конструкций, не имеющих пор, пароизоляции и зоны оледенения. Внутренняя конденсация водяного пара во время периодов с благоприятными климатическими условиями прекращается, как правило, быстрее, чем этого можно было бы ожидать по балансу влаги без учета капиллярности.

## Часть II

### НОВЫЙ ГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИФфуЗИИ И КОНДЕНСАЦИИ ("МЕТОД ТРЕУГОЛЬНИКОВ").

#### 1. ОПИСАНИЕ СПОСОБА

Способы графического решения задач, связанных с диффузией водяного пара в строительных конструкциях, основаны на методе Глязера. Их применение заставляет пользователя самостоятельно вычерчивать существенную часть диаграмм, а значительную долю необходимых данных выписывать из таблиц давлений пара. Зависящие от температуры значения  $N$  имеются в его распоряжении большей частью лишь в виде средних значений.

Самостоятельно подготовленные или существенно дополненные диаграммы редко оказываются настолько точными, чтобы гарантировать получение надежных результатов, особенно при ломанной форме кривых давлений насыщенного пара в многослойных конструкциях.

Упрощенная гипотеза о линейном характере кривой перепада давлений пара в однородных слоях приводит к искажению фактической картины процесса и получению недостаточно корректных результатов.

Эти выводы не имеют значения для специалиста, который хорошо владеет физическими основами диффузии водяного пара. Однако пользователю, который редко сталкивается с вопросами диффузии, каждый раз необходимо тратить время на определение исходных данных и проведение расчетов.

Автор считает необходимым построить рабочие графики, содержащие все требуемые таблицы, числовые значения, определяющие уравнения и кривые, которые необходимы в каждом случае для расчетов, связанных с определением точки росы, диффузией и конденсацией водяного пара. Следует также выбрать такой формат графика, который создает дополнительные предпосылки для обеспечения высокой точности результатов.

Для максимальной наглядности и ясности, а также экономии времени при применении рабочих графиков нужно вычертить диаграмму, ось абсцисс которой представляет собой шкалу температур, а ось ординат – шкалу давлений пара. Систему координат нанести на миллиметровку, сантиметровые деления которой соответствуют  $1^\circ\text{C}$  (К) и 100 Па. Таким образом, 1 мм будет соответствовать  $0,1^\circ\text{C}$  и 10 Па. Шкала температур содержит участок от  $-20^\circ$  до  $+30^\circ\text{C}$ , поэтому также будет

соответствовать обычным в строительной практике температурным условиям<sup>1</sup>.

Ординату, соответствующую температуре  $+30^\circ\text{C}$ , нужно дополнить шкалой относительных влажностей воздуха, содержащей деления от 30 до 100%. Эта система координат обладает следующими преимуществами:

а) Кривая давлений насыщенного пара ( $p_{нас}$ ) представлена в нормальной форме, т.е. без переломов и искажений. То же можно сказать о графиках кривых парциальных давлений ( $p$ ), которые начинаются от шкалы относительных влажностей при температуре  $+30^\circ\text{C}$  и заканчиваются у ординаты, соответствующей температуре  $+10^\circ\text{C}$ .

б) Точку росы для любых условий внутри помещения можно быстро и точно найти с помощью построения горизонтальной проекции ординаты, соответствующей условиям помещения, на кривую  $p_{нас}$  и вертикальной проекции точки их пересечения на шкалу температур.

в) Шкала температур позволяет выполнить прямое построение на ней расчетных уровней температур, соответствующих границам слоев. Таким образом создается очевидная и наглядная связь с расчетом теплопередачи. Границы слоев конструкции оказываются на расстояниях, которые пропорциональны термическим сопротивлениям  $1/\alpha$  того или иного слоя и сопротивлению теплоотдаче  $1/\alpha_n$  и  $1/\alpha_g$ .

г) Фактическое давление пара в однородных слоях (при стационарном режиме теплопередачи) представлено тремя пунктирными кривыми  $p$ , которые обозначают три различные ординаты и соприкасаются с кривой  $p_{нас}$  плоскостях, имеющих разную температуру 5,  $+5$  и  $+15^\circ\text{C}$ .

д) Кривая парциальных давлений для относительной влажности воздуха, равной 80%, продолжена до нижнего конца кривой  $p_{нас}$ . Она служит в качестве исходной базы для метода треугольников и проходит близко над кривой  $p$ , которая соответствует средней относительной влажности наружного воздуха ( $\approx 78\%$ ). Для дальнейшего упрощения работы и во избежание ошибок под температурной шкалой на диаграмму нанесены соответствующие давления  $p_{нас}$  в Па, а в двух диагональных рядах — значения абсолютных влажностей  $f$  в  $\text{г/м}^3$  и значения  $N$ .

Свободное пространство в области диаграммы, расположенное выше диагональных рядов цифр, содержит формулы и таблицы, необходимые для расчета. Процесс работы складывается из следующих этапов.

Вначале на нижнюю часть диаграммы наносят обозначения отдельных слоев конструкции, а в верхнюю табличную зону соответствующие данные для теплотехнических и диффузионных расчетов. Затем переносят вычисленные процентные значения перепадов температур между границами слоев в нижнюю область таблицы и прибавляют их к желаемым температурам воздуха. В распоряжении пользователя имеются три колонки, благодаря которым возможно исследование при трех вариантах температуры. После выполнения расчетов и записи в таблицу значений температур на поверхностях и границах слоев результаты первой колонки вычерчивают на диаграмме в виде линий температур. Они начинаются на оси абсцисс и заканчиваются выше кривой  $p_{нас}$ .

От точки пересечения первой линии температур ( $\theta_{0n}$ ) с базовой кривой  $p$ , соответствующей значению относительной влажности 80%, проводят горизонтальную линию до пересечения с третьей температурной линией (граница слоев 1/2). Место пересечения со второй линией температур ( $\theta_{0n}$ ) представляет собой левую, угловую точку первого треугольника, точка пересечения с третьей линией температур является осно-

<sup>1</sup> Для территории ФРГ. (Примеч. пер. св.)

ванием противоположного катета, т.е. правой конечной точкой основания треугольника (прилежащего катета).

В качестве гипотенузы вначале служит прямая, которая либо исходит из левой угловой точки в виде касательной к кривой  $p_{нас}$ , либо только достигает точки ее пересечения с противоположным катетом. Это зависит от удаления третьей линии температур от второй. Предварительно найденная таким образом верхняя угловая точка треугольника ограничивает длину противоположного катета и является, кроме того, левой угловой точкой второго треугольника, который занимает пространство до четвертой линии температур (на стыке слоев 2/3). Противолежущий катет второго треугольника имеет вначале длину, которая так относится к сопротивлению диффузии  $\mu d$  второго слоя, как длина противоположного катета первого треугольника относится к сопротивлению диффузии первого слоя. Предварительное значение длины противоположного катета второго треугольника можно определить с помощью карманного калькулятора или логарифмической линейки. При этом следует учитывать два положения катета: а) он может заканчиваться не доходя до кривой  $p_{нас}$  или, в крайнем случае, на этой кривой; б) может пересекать кривую  $p_{нас}$ , т.е. его вершина находится над этой кривой.

В первом случае построение треугольника дополняется прочерчиванием гипотенузы и начинается построение третьего треугольника, вершина которого лежит в верхней угловой точке второго треугольника, а основание простирается до пятой линии температур. Для установления длины третьего противоположного катета можно использовать описанное выше правило. Во втором случае в качестве верхней угловой точки треугольника сначала устанавливается точка пересечения противоположного катета с кривой  $p_{нас}$  проводится гипотенуза. Поскольку последняя должна пересечь кривую  $p_{нас}$ , угол ее наклона изменяется до тех пор, пока она не превратится в касательную к кривой  $p_{нас}$ . Благодаря этому верхняя угловая точка треугольника перемещается на плоскость, которая лежит ниже кривой  $p_{нас}$ .

Вследствие того, что противоположущий катет стал короче, во втором случае изменяется первоначально установленное отношение его к длине противоположного катета первого треугольника. По этой причине необходимо выполнить обратную корректировку. Форма обоих треугольников изменится. При этом первый станет более плоским, а второй будет немного выше, чем это было до корректировки. То же самое выполняется при построении всех остальных треугольников, общее число которых равно числу слоев конструкции. Поэтому для однородного ограждения (без учета толщины штукатурных слоев) требуется построить лишь один треугольник.

Верхняя угловая точка последнего треугольника, которая в соответствии с описанным выше правилом построения лежит либо ниже кривой  $p_{нас}$ , либо на ней, характеризует приблизительное значение парциального давления на теплой стороне поверхности конструкции, проецируется по горизонтали на последнюю линию температур  $\theta_{вв}$ . Точка их пересечения характеризует относительную влажность воздуха и принадлежит ломаной линии гипотенуз треугольников, которые в Действительности соответствуют упрощенному представлению кривой давлений пара в толще конструкции. Значение относительной влажности можно легко вычислить и оценить интерполяцией между обеими соседними кривыми.

Описанный выше процесс построения и комплектации диаграммы можно очень быстро выполнить с помощью мягкой карандаша и линейки. При некоторой сноровке это может быть сделано даже от руки. Поскольку значения  $\mu d$  отдельных слоев конструкций были из-

вестны до начала построения треугольников, некоторых обратных корректировок можно и не производить, если своевременно учесть относительные длины противоположных катетов.

Во избежание образования или накопления конденсата в толще конструкции при общем перепаде температур нельзя допустить превышения определенного в конечном итоге значения относительной влажности воздуха на теплой стороне.

Если этот максимум лежит ощутимо выше заданной относительной влажности воздуха помещения, исследование можно считать законченным, дальнейшее уточнение является излишним.

Однако, если имеет место лишь незначительная разница обоих значений влажности, необходимо выполнить корректировку. Она состоит в том, что прямолинейные ранее гипотенузы заменяются кривыми. Кривизна их должна соответствовать кривизне ближайших кривых фактических давлений пара. Как было упомянуто, эти кривые нанесены на диаграмму в виде пунктирных линий. Вместо прежних нормальных треугольников образуются *криволинейные треугольники*. Эту операцию очень просто можно выполнить при помощи криволинейных лекал или шаблонов.

Полученное таким образом изменение формы треугольников приводит к небольшому сдвигу верхней угловой точки последнего треугольника в направлении оси абсцисс, т.е. вниз. Благодаря этому изменяется максимальное значение допустимой относительной влажности.

Если и этого теперь недостаточно, можно применить слой, снижающий паропроницание. Последний изображается на диаграмме в виде ступени ломаной линии фактических давлений пара. Она идет от угловой точки последнего треугольника перпендикулярно вверх и может быть доведена до кривой  $p_{нас}$ . Эта ступень является противоположным катетом треугольника с длиной основания, равной нулю, потому что значением  $1/\lambda$  слоя, уменьшающего паропроницание, вследствие его незначительности можно пренебречь.

Высота ступени дает в отношении к длине остальных противоположных катетов сопротивление диффузии  $\mu d$  этого слоя. Путем построения верхнего края ступени на линии  $\theta_{вв}$  получают максимальное значение допустимой теперь относительной влажности воздуха в помещении.

Если сопротивление диффузии системы, снижающей паропроницание, оказывается больше, чем определенное графическим путем значение, треугольники остальных слоев можно делать все более плоскими, пока их противоположные катеты не будут соответствовать новому отношению  $\mu d$ . Благодаря этому верхняя угловая точка треугольника еще больше отдалится от кривой  $p_{нас}$  и опасность образования в толще конструкции конденсата полностью исключается. Графическое определение сопротивления диффузии лишь одного слоя, уменьшающего паропроницание, выполняется соответствующим образом. Большим преимуществом способа является то, что в отличие от других способов его результаты видны на самой диаграмме.

Содержащиеся на рабочих диаграммах температурные таблицы позволяют исследовать влажностное состояние при трех различных вариантах общего перепада температур. В этом случае удобно использовать цветные карандаши, чтобы построить треугольники каждого из вариантов своим цветом.

После приобретения определенных навыков в использовании метода треугольников пользователи самостоятельно применяют многие упрощающие и улучшающие наглядность приемы; поэтому их дальнейшая детализация представляется излишней.

## 2. РАСЧЕТ ПАРПРОНИЦАНИЯ ЧЕРЕЗ КОНСТРУКЦИЮ

Паропроницание через одно- или многослойную конструкцию происходит в *стационарном* режиме, если верхняя угловая точка или гипотенузы всех треугольников лежат ниже кривой давлений насыщенного пара ( $p_{нас}$ ) или соприкасаются с ней. Значения давлений пара  $p_1$  и  $p_2$  берутся из диаграммы, причем  $p_1$  лежит на предпоследней линии температур ( $\theta_{пв}$ ), а  $p_2$  - на второй линии температур ( $\theta_{ни}$ ).

Значение  $N$  можно прочесть в середине обеих температурных линий из диагональных рядов значений  $N$ . Значения сопротивлений диффузии отдельных слоев  $\mu d$  были уже нанесены ранее рядом с противолежащими катетами треугольников, поэтому их можно легко получить. Разумеется, это относится также к возможному применению материалов, снижающих паропроницание, или к пароизоляции. Расчет выполняют по уравнению  $g = (p_1 - p_2) (Па) / \sum \mu d N$ .

Поскольку диффузионные потоки, проходящие через каждый слой, равны между собой, паропереход можно определить также по частным величинам перепада давлений пара, создаваемым отдельными слоями, их частным значениям сопротивления диффузии и средним значениям  $N$ .

Режим паропроницания является нестационарным, когда верхняя угловая точка или гипотенуза треугольника находится выше кривой давлений насыщенного пара ( $p_{нас}$ ), вследствие чего образуется зона конденсации. При этом, если количество водяного пара, диффундирующего от теплой стороны конструкции в направлении зоны конденсации, больше количества водяного пара, диффундирующего из зоны конденсации к холодной стороне, происходит *накопление конденсата*. Количество конденсата при прочих равных условиях тем больше, чем шире зона конденсации. Это связано с ходом кривой  $p_{нас}$  и может быть легко проверено.

Дальнейший расчет проводится в два этапа. На первом этапе определяют количество водяного пара, диффундирующего в направлении зоны конденсации под действием парциальных давлений  $p_1$  и  $p_{кв}$ , причем последнее представляет собой парциальное давление обращенной к теплой стороне границы зоны конденсации. Соответствующее парциальное сопротивление диффузии определяется расстоянием между линиями  $k_v$  и  $\theta_{ов}$ , а соответствующее значение  $N$  находится посередине обеих температурных линий. Затем выполняют расчет с помощью известного уравнения, в котором  $p_2$  заменяют на  $p_{кв}$ .

На втором этапе определяют количество пара, диффундирующего из зоны конденсации в направлении холодной стороны ограждения под действием парциальных давлений  $p_{кн}$  и  $p_2$ , причем  $p_{кн}$  представляет собой парциальное давление на границе зоны конденсации, обращенной к холодной стороне. Соответствующее парциальное сопротивление диффузии определяется расстоянием между линиями  $k_n$  и  $\theta_{ни}$ , а соответствующее значение  $N$  находится в середине обеих температурных линий. Затем выполняют расчет с помощью известного уравнения, в котором  $p_1$  заменяют на  $p_{кн}$ . Разность между обоими результатами соответствует массе накапливающегося за час количества конденсата.

В приводимых ниже примерах использования метода треугольников речь идет также об установлении *баланса влаги*. При этом приходится оперировать такими понятиями, как *среднемесячная и среднегодовая температуры*.

## 3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ТРЕУГОЛЬНИКОВ

3.1. Определение допустимой относительной влажности на теплой стороне однородной конструкции. Наруж-

ная стена плавательного бассейна в Мюнхене выполнена из кирпича с вертикальными пустотами, характеризуемого коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,41$  Вт/(м·К) и коэффициентом сопротивления диффузии  $\mu = 8$ , причем толщина стены  $d = 0,365$  м. Термическое сопротивление такой стены составит  $d/\lambda = 0,365/0,41 = 0,89$  м<sup>2</sup>·К/Вт, а сопротивление диффузии  $\mu d = 8 \cdot 0,365$  м = 2,92 м. В целях упрощения расчета влияние штукатурного слоя не учитывается. При сопротивлении теплоотдаче на внутренней поверхности стены  $1/\alpha_{в} = 0,123$ , а сопротивлении теплоотдаче на ее наружной поверхности  $1/\alpha_{н} = 0,043$  м<sup>2</sup>·К/Вт, общее сопротивление теплопередаче  $1/k = 0,89 + 0,123 + 0,043 = 1,056$  м<sup>2</sup>·К/Вт, а коэффициент теплопередачи  $k = 0,947$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температура воздуха внутри плавательного бассейна рассматривается как постоянная и принимается равной +27°C.

Разность температур воздуха в помещении и внутренней поверхности стен составляет  $0,123 \cdot 100/1,056$ , или 11,65%, а разность между температурой воздуха в помещении и температурой наружной поверхности стены —  $1,013 \cdot 100/1,056$ , или 95,93% общей разности температур воздуха в помещении и наружного воздуха. Из таблицы средних температур, приведенной в приложении, видно, что средняя температура января для Мюнхена равна -2,3°C, а среднегодовая температура равна +7,4°C. Округленно примем их равными соответственно -3° и +7°C. Тогда общая разность температур составляет в январе 30°C, а в среднем за год 20°C.

После заполнения всех таблиц на рабочих графиках (рис. 21) и вычисления температур на поверхностях вычертим на диаграмме линии температур. Затем построим треугольник для января, основание которого (прилежащий катет) расположено на высоте, определяемой точкой пересечения линии температуры -3°C с кривой давлений  $p$ , соответствующей относительной влажности 80%. От точки пересечения линии температур -1,8°C (температура наружной поверхности стены в январе) построим касательную к кривой  $p_{нас}$  проведем ее до точки пересечения с линией температуры +23,5°C (температура внутренней поверхности стены в январе). Горизонтальная проекция этой точки пересечения на линию температуры +27°C (температура воздуха помещения) дает путем интерполяции значение относительной влажности воздуха 61%.

Следовательно, чтобы избежать образование ядра конденсации в январе, относительная влажность воздуха в помещении плавательного бассейна не должна подниматься выше 61%.

С целью более точного определения предельной влажности необходимо провести криволинейную касательную, форма которой повторяет форму соседней (пунктирной) линии падений давления пара. Тогда максимальная относительная влажность будет равна примерно 59%.

Треугольник, соответствующий среднегодовым условиям, строят аналогичным образом. Его основание лежит на высоте пересечения линии температуры +7°C с кривой давлений  $p$ , соответствующей влажности 80%. Касательная выходит из точки пересечения основания с линией температуры +7,8°C (среднегодовая температура наружной поверхности стены) и пересекается с линией температуры +24,7°C (среднегодовая температура внутренней поверхности стены) в точке, горизонтальная проекция которой на линию температуры +27°C дает значение относительной влажности воздуха 81%. При построении криволинейной касательной максимальное значение относительной влажности воздуха в помещении плавательного бассейна было бы равно 80%, правда, с образованием ядра конденсации в зимнюю половину года. При этом можно гарантировать полное высушивание стен помещения в течение летней половины года.



ДИФФУЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

Слой № п/п	Обозначение и вид материала	Толщина d, м	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·К)	Термическое сопротивление, 1/λ (м²·К/Вт)	Промежуточная сумма, м²·К/Вт	Градиент температур, %	Коэффициент сопротивления диффузии μ	Сопротивление диффузии, d, м
ГСВ	Граничный слой внутри		$\alpha_{в} = 8,13$	$1/\alpha_{в} = 0,123$	0,123	11,65		
1	Кирпич М-800	0,365	0,41	0,890	1,013	95,93	8	2,92
2								
3								
4								
5								
6								
7								
ГСН	Граничный слой снаружи		$\alpha_{н} = 23,3$	$1/\alpha_{н} = 0,043$	1,056	100,00		

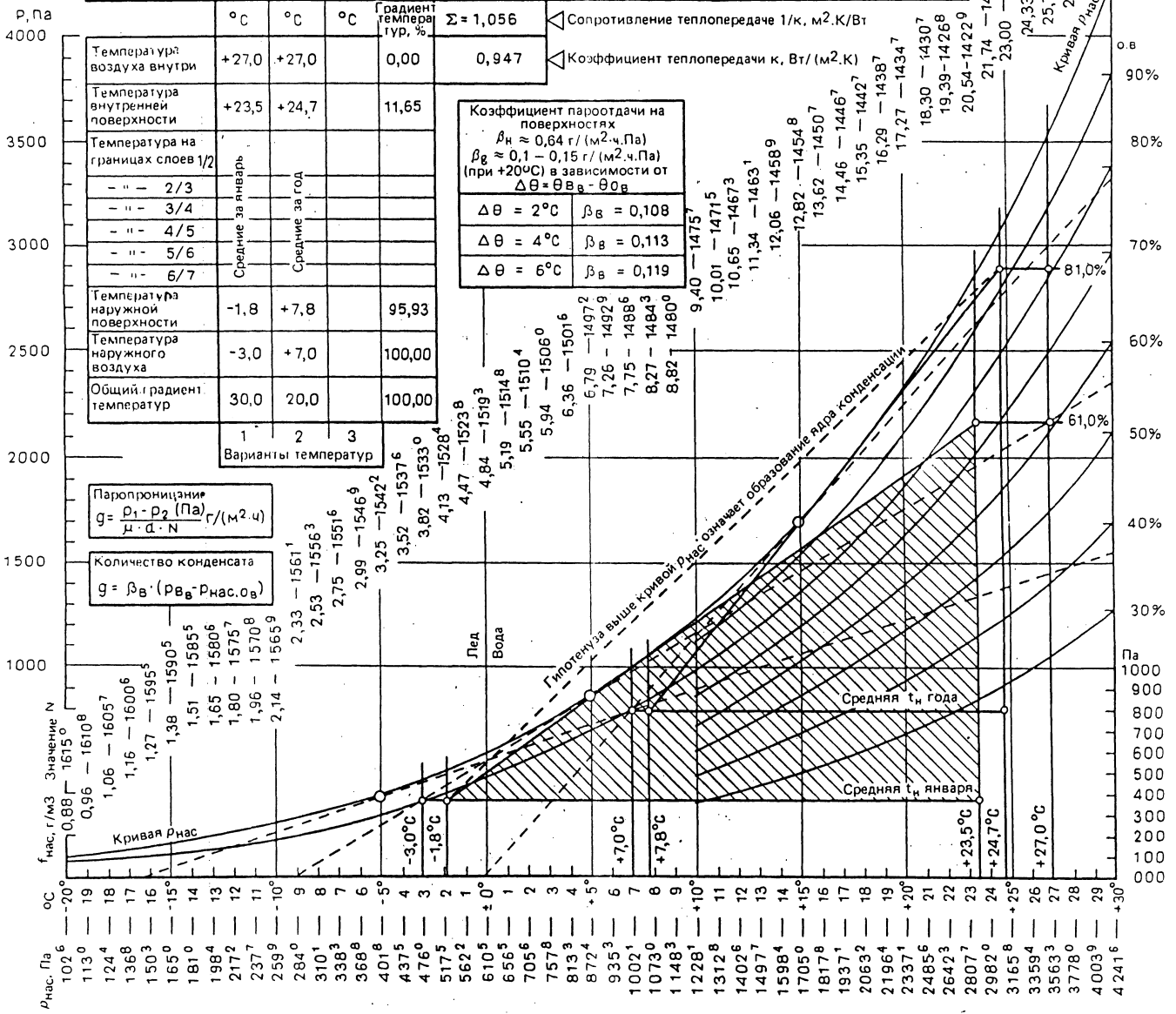


Рис. 21

3.2. Проверка двухслойной конструкции с расположенной снаружи слоем теплоизоляции на возможность образования конденсата. Наружная стена старого здания красильни в Регенсбурге выполнена из полнотелого кирпича М1800 с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,79 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  и коэффициентом сопротивления диффузии  $\mu = 11$ , толщина стены  $d = 0,24 \text{ м}$ . Вследствие небольшого термического сопротивления стены, равного  $0,304 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , очень часто на ее поверхности и в толще образовывался конденсат, который приводил к прогрессирующим повреждениям. Поэтому было решено нанести снаружи дополнительный слой теплоизоляции из твердых плит пенополистирола толщиной  $d = 40 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,041 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  и термическим сопротивлением  $d/\lambda = 0,976 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ .

Нужно проверить, является ли это мероприятием достаточным, если температура воздуха внутри красильни составляет  $+18^\circ\text{C}$ , а максимальная относительная влажность равна  $85\%$ . В основу контроля должна быть положена средняя температура января.

После внесения требуемых данных в таблицы с рабочими кривыми (рис. 22) и вычисления температур на поверхностях и на границах слоев (температура наружного воздуха округляется от  $-2,4$  до  $-3^\circ\text{C}$ ) на диаграмме вычерчивают линии температур: Затем ординату влажности воздуха  $85\%$  проецируют по горизонтали от линии температуры  $+18^\circ\text{C}$  (температура воздуха в помещении) на линию температуры  $+16,2^\circ\text{C}$  (внутренняя поверхность стены в январе) и при этом устанавливают, что искомая точка пересечения лежит на кривой, соответствующей влажности  $95,7\%$ . Это свидетельствует о том, что образования конденсата опасаться не следует.

Точка пересечения представляет собой вершину треугольника, соответствующего первому слою. Основание треугольника для второго слоя лежит на высоте точки пересечения кривой давления для влажности  $80\%$  с линией температуры  $-3^\circ\text{C}$  (наружный воздух). Сначала определяют положение вершины треугольника второго слоя, которая соответствует высоте основания треугольника первого слоя, причем основание второго треугольника по направлению к первой вершине делится пропорционально сопротивлениям диффузии слоев на отрезки  $1,6$  и  $2,64 \text{ м}$  (в сумме  $4,24 \text{ м}$ ). Затем вычерчивают оба треугольника. Большое расстояние от гипотенузы до кривой  $p_{нас}$  говорит о том, что в сечении полностью исключено образование конденсата.

В заключение должно быть установлено, при какой наружной температуре на внутренней стороне стены выпал бы конденсат и следует ли также учитывать возможность образования конденсата в толще конструкции стены.

Если продлить проекцию ординаты, соответствующей относительной влажности  $85\%$ , в другую сторону до пересечения с кривой  $p_{нас}$ , получим значение температуры  $+15,4^\circ\text{C}$ . Перепад между температурой воздуха помещения и температурой внутренней поверхности стены может быть равен, таким образом,  $18 - 15,4 = 2,6^\circ\text{C}$ , при этом образования конденсата еще не происходит.

Поскольку этот перепад температур в соответствии с данными таблицы составит  $8,51\%$  общего перепада температур, можно вычислить величину последнего, которая составит  $2,6 - 100/8,51 = 30,6^\circ\text{C}$  или округленно  $30^\circ\text{C}$ .

Таким образом, критическое с точки зрения образования конденсата предельное значение температуры наружного воздуха составляет около  $-12^\circ\text{C}$ . С использованием обычных процентных значений перепадов температур в отдельных слоях определяют соответствующие температуры на границе слоев  $1/2(+9,1^\circ\text{C})$  и на наружной поверхности стен ( $-11,1^\circ\text{C}$ ).

После внесения новых данных в таблицу с рабочими кривыми и после вычерчивания новых линий темпе-

ратур в диаграмме оба треугольника для основных слоев строят уже известным методом. Вследствие увеличенного теперь расстояния между основанием второго треугольника и вершиной первого удлиняется также противолежащий катет треугольника, однако отношение сопротивлений диффузии слоев остается прежним.

Поскольку гипотенузы треугольников все еще оптимально удалены от кривой  $p_{нас}$ , даже при критической предельной температуре наружного воздуха на обращенной к помещению стороне стены конденсат не образуется. Этого благоприятного результата следовало ожидать уже потому, что произведение  $\lambda\mu$  первого слоя ( $0,79 \cdot 11 = 8,69$ ) намного больше произведения  $\lambda\mu$  второго слоя ( $0,041 \cdot 40 = 1,64$ ). Следует вспомнить о том, что у многослойных конструкций ситуация особенно благоприятна, когда значения произведений  $\lambda\mu$  отдельных слоев сильно возрастают в направлении к теплой стороне. Поскольку угол наклона гипотенузы треугольников слоев согласуется с отношением значений произведения  $\lambda\mu$ , можно сказать, что для уменьшения диффузии водяного пара углы наклона гипотенузы треугольников слоев в направлении теплой стороны должны становиться круче. Именно таким образом можно избежать пересечения гипотенуз кривой  $p_{нас}$  для всей толщины стены и тем самым исключить конденсацию водяного пара внутри ее.

В целях упрощения в выбранных примерах были исключены из рассмотрения штукатурные слои. Однако легко можно понять, что дополнительный треугольник третьего слоя возможной наружной штукатурки, который имеет незначительную высоту, соответствующую сопротивлению диффузии около  $0,3 \text{ м}$ , не мог бы существенно ухудшить ситуацию. Цементная штукатурка, армированная тканой сеткой, была бы вполне приемлема. При применении вентилируемой облицовки фасада на отnose - альтернативы наружной штукатурки - не возникает вообще никаких проблем. Учитывая, что наружные стены здания красильни находились ранее под сильным воздействием конденсационной влаги, следует уточнить ее количество.

При температуре внутреннего воздуха  $+18^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $85\%$  парциальное давление  $p_{вв}$  равно  $0,85 \cdot 2063 = 1754 \text{ Па}$ . При температуре внутренней стороны стены  $+15,4^\circ\text{C}$  это приблизительно соответствует давлению насыщенного пара  $p_{нас \text{ о.в.}}$ . Но первоначальное термическое сопротивление кирпичной кладки составляло лишь  $0,304 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , а сопротивление теплопередаче стены было равно при этом только  $0,123 + 0,304 + 0,043 = 0,47 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ . Поэтому перепад между температурой воздуха помещения и температурой поверхности стены, равный  $0,123 \times 100/0,47$ , составлял  $26,2\%$  общего перепада между температурами помещения и наружного воздуха. Таким образом, с учетом округленного значения средней температуры января  $-3^\circ\text{C}$  перепад температур на этом участке оказывается равным  $0,262 \cdot (18 + 3) = 5,5^\circ\text{C}$ , а температура стены  $+18 - 5,5 = +12,5^\circ\text{C}$ . Соответствующее давление насыщенного пара  $p_{нас \text{ о.в.}}$  составляет  $1450 \text{ Па}$ , что значительно ниже точки росы.

Для вычисления количества конденсационной влаги в  $\text{г/(м}^2 \cdot \text{ч)}$  помимо разности парциальных давлений  $p_{вв} - p_{нас \text{ о.в.}}$  (Па) необходимо также определить значение коэффициента перехода водяного пара  $\beta_g$ . В дополнение к данным на рабочих графиках последний может быть определен по следующей таблице.

Известно, что значение коэффициента перехода водяного пара возрастает по мере повышения температуры воздуха в помещении и увеличения перепада температур. При температуре воздуха в помещении  $+20^\circ\text{C}$  и перепаде температур  $5,5^\circ\text{C}$   $\beta_g = 0,117 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$ .

ДИФФУЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

Слой № п/п	Обозначение и вид материала	Толщина, d, м	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·К)	Термическое сопротивление, 1/λ (м²·К/Вт)	Промежуточная сумма, м²·К/Вт	Градиент температур, %	Коэффициент сопротивления диффузии μ	Сопротивление диффузии, μд, м
ГСВ	Граничный слой внутри		$\alpha_B = 8,13$	$1/\alpha_B = 0,123$	0,123	8,51		
1	Полнотелый кирпич М-1,8	0,24	0,79	0,304	0,427	29,53	11	2,64
2	Жесткий пенополистирол	0,04	0,041	0,976	1,403	97,03	40	1,60
3								
4								
5								
6								
7								
ГСН	Граничный слой снаружи		$\alpha_H = 23,3$	$1/\alpha_H = 0,043$	1,446	100,00		

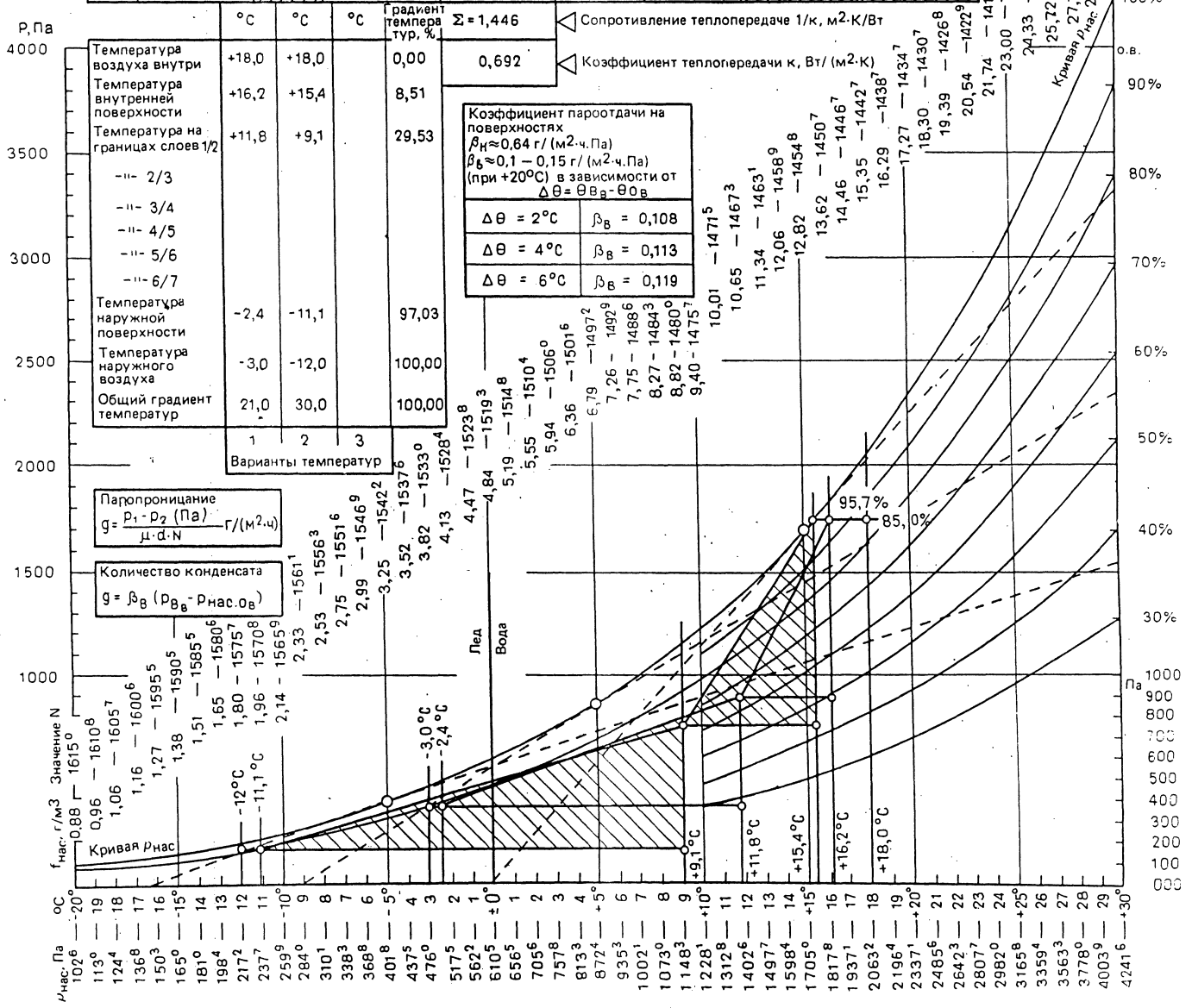


Рис. 22

Перепад температур $\Delta\theta$	Температура воздуха в помещении		
	+10°C	+20 °С	+30 °С
2 °С	0,103	0,108	0,113
4 °С	0,108	0,113	0,119
6 °С	0,113	0,119	0,125
8 °С	0,118	0,125	0,131
10 °С	0,123	0,130	0,137
12 °С	0,129	0,136	0,143
14 °С	0,135	0,142	0,149

При температуре наружного воздуха  $-3^{\circ}\text{C}$  (округленно для января) и температуре поверхности  $+12,5^{\circ}\text{C}$  количество конденсата будет равно  $[\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})]$ :  $g = \beta_6 \times (p_{\text{вв}} - p_{\text{нас о.в.}}) = 0,117 (1754 - 1450) = 35,6$ .

Поскольку абсолютная влажность воздуха в помещении составляет  $0,85 \cdot 15,35 = 13,05 \text{ г}/\text{м}^3$ , а граничный слой внутренней поверхности стены при  $+12,5^{\circ}\text{C}$  может удерживать лишь  $10,99 \text{ г}/\text{м}^3$  водяного пара,  $2,06 \text{ г}/\text{м}^3$  выпадает на поверхности стены в виде воды. Для того чтобы получить  $35,6 \text{ г}$  выпадения конденсатной влаги, требуется, таким образом, излишек водяного пара, полученный от  $35,6/2,06 = 17,3 \text{ м}^3$  воздуха помещения. Этот объем воздуха должен ежечасно вступать в тесный контакт с поверхностью стены. Кроме того, необходимо, чтобы для компенсации выпадающей в виде конденсата влаги, ежечасно вносилось в воздух помещения не менее  $35,6 \text{ г}$  водяного пара в расчете на каждый  $\text{м}^2$  поверхности наружной стены. В противном случае относительная влажность воздуха в помещении будет снижаться и вследствие этого образование конденсата приостановится или полностью прекратится. Не следует делать вывод о том, что в течение января при продолжительности воздействия  $720 \text{ ч}$  действительно образуется  $720 \cdot 35,6 = 25632 \text{ г}/\text{м}^2 = 25,6 \text{ кг}/\text{м}^2$  конденсационной влаги, если средняя температура наружного воздуха равна  $-3^{\circ}\text{C}$ . Ее количество будет меньше хотя бы потому, что в основу было положено максимальное значение относительной влажности воздуха, равное  $85\%$ . Кроме того, очень трудно вычислять с достаточной точностью для продолжительного периода количество выпадающего конденсата, если климатические условия нестабильны.

Существенное значение имеет также тот факт, что при образовании конденсационной влаги высвобождается значительное количество тепла. Для испарения содержащейся в воздухе помещения воды необходимо  $539 \text{ ккал}$  тепла на  $1 \text{ кг}$ , или  $627 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$ , которое выделяется при конденсации и передается поверхности стены. Таким образом, при количестве конденсационной влаги  $35,6 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  поступление тепла составляет  $19,2 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , или  $22,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Это влияет на величину коэффициента теплоотдачи между воздухом помещения и поверхностью стены. При нормальных условиях, т.е. при отсутствии конденсата, этот коэффициент определяется теплопроводностью, конвекцией и излучением и, в соответствии с DIN 4108, принимается равным  $8,13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ . Выделение конденсационного тепла приводит при разности температур  $5,5^{\circ}\text{C}$ , к увеличению коэффициента теплоотдачи на  $22,3/5,5 = 4,05 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ , т.е. до  $8,13 + 4,05 = 12,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ . Таким образом, сопротивление теплоотдаче  $1/\alpha_6$  изменится на  $0,082 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ . Если вычислить теперь перепад температур, то он составит  $4^{\circ}\text{C}$  вместо  $5,5^{\circ}\text{C}$ , а температура поверхности будет равна  $+14^{\circ}\text{C}$ . Количество конденсационной влаги уменьшится на  $g = 0,112 (1754 - 1598) = 17,5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Конденсационное тепло составляет теперь лишь  $627 \times 0,0175 = 11 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , коэффициент теплоотдачи повысится на  $11/4 = 2,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$  и будет равен  $10,88 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ . Отсюда следует, что  $1/\alpha_6 = 0,092 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ , перепад температур составляет  $4,4^{\circ}\text{C}$ , а соответствующее количество конденсационной влаги равно  $g = 22 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ . Повторная корректировка сопротивле-

ния теплоотдаче приводит к значению  $0,089 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ , а перепад температур становится равным  $4,3^{\circ}\text{C}$ .

При температуре поверхности  $+13,7^{\circ}\text{C}$  количество конденсационной влаги составит  $[\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})]$ :  $g = 0,112(1754 - 1568) = 20,8$ .

В этом примере учет конденсационного тепла приводит к уменьшению количества конденсата от  $35,6$  до  $20,8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , т.е. к значению, которое на  $40\%$  меньше первоначального. Не следует упускать из виду, что при сильном увлажнении наружной стены значительно снижается ее термическое сопротивление и увеличивается перепад температур. Расчет количества конденсата в этом случае на всех этапах описанного приближенного способа привел бы к более высокому значению.

3.3. Определение параметров пароизоляции двухслойной конструкции с расположенным изнутри слоем теплоизоляции. Дальнейшее исследование наружной стены красильни в Регенсбурге поможет выяснить, при каких условиях слой теплоизоляции в виде жестких пенополистирольных плит толщиной  $d = 40 \text{ мм}$  может быть установлен на их внутренней стороне.

Изменение последовательности слоев на обратную (рис. 23) приводит к сильному изменению температуры на границе слоев  $1/2$  от  $+11,8^{\circ}\text{C}$  (в примере 32) до  $+2^{\circ}\text{C}$  при условии, что температуры на поверхностях сохраняют свои старые значения. Поскольку при делении расстояния между основанием 2 и вершиной 1 вершина 2 или основание 1 оказались бы в зоне выше кривом  $p_{\text{нас}}$ , выполним построение в другой последовательности. Вначале построим треугольник второго слоя, вершина которого лежит в точке пересечения кривой  $p_{\text{нас}}$  с линией температуры  $+2^{\circ}\text{C}$ , и из этой же точки построим основание треугольника первого слоя до пересечения с линией температуры  $+16,2^{\circ}\text{C}$ . Противлежащий катет треугольника первого слоя имеет длину, которая относится к длине противолежащего катета треугольника второго слоя как  $1,6/2,64$ . Проецированием вершины 1 на линию температуры  $+18^{\circ}\text{C}$  определим значение максимальной влажности воздуха в помещении  $43,5\%$ . Таким образом, истинная величина лежит намного ниже заданной, равной  $85\%$ .

Применение изоляционных плит в виде экструдированного пенополистирола, коэффициент сопротивления диффузии которого  $\mu$  равен  $110$ , дает лучшие результаты. При этом сопротивление диффузии  $\mu d$  будет равно  $4,4 \text{ м}$ , а максимальная влажность -  $59,5\%$ .

Недостаточное сопротивление диффузии можно компенсировать лишь путем укладки слоя, снижающего паропропускание, на наружной поверхности теплоизоляционных плит. Сопротивление диффузии этого слоя можно вычислить путем умножения расстояния от вершины 1 до точки с относительной влажностью  $85\%$ , определяемого путем горизонтального проецирования из точки с влажностью  $85\%$  на линию температуры  $+18^{\circ}\text{C}$ , которая является продолжением противолежащего катета треугольника второго слоя, на сопротивление диффузии второго слоя. Теоретически можно получить такой же результат, если перемножить соответствующую долю противолежащего катета треугольника первого слоя с сопротивлением диффузии первого слоя.

Сопротивление диффузии дополнительного слоя, ограничивающего паропропускание, состоящего из нормальных жестких пенополистирольных плит, составляет  $7,09 \text{ м}$ , а из экструдированного материала -  $4,35 \text{ м}$ . Выбор материала с более высоким сопротивлением диффузии (пароизоляцией) позволит исключить образование конденсата даже при предельной температуре наружного воздуха, т.е. при  $-12^{\circ}\text{C}$  (пример 32). Легко можно выполнить графическую проверку.

3.4. Определение параметров пароизоляции „сэндвич-конструкции“. Наружная стена шерстепрядильни в Штутгарте выполнена из плит типа "сэндвич" с железобетонными внешними слоями, из которых наружный

ДИФФУЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

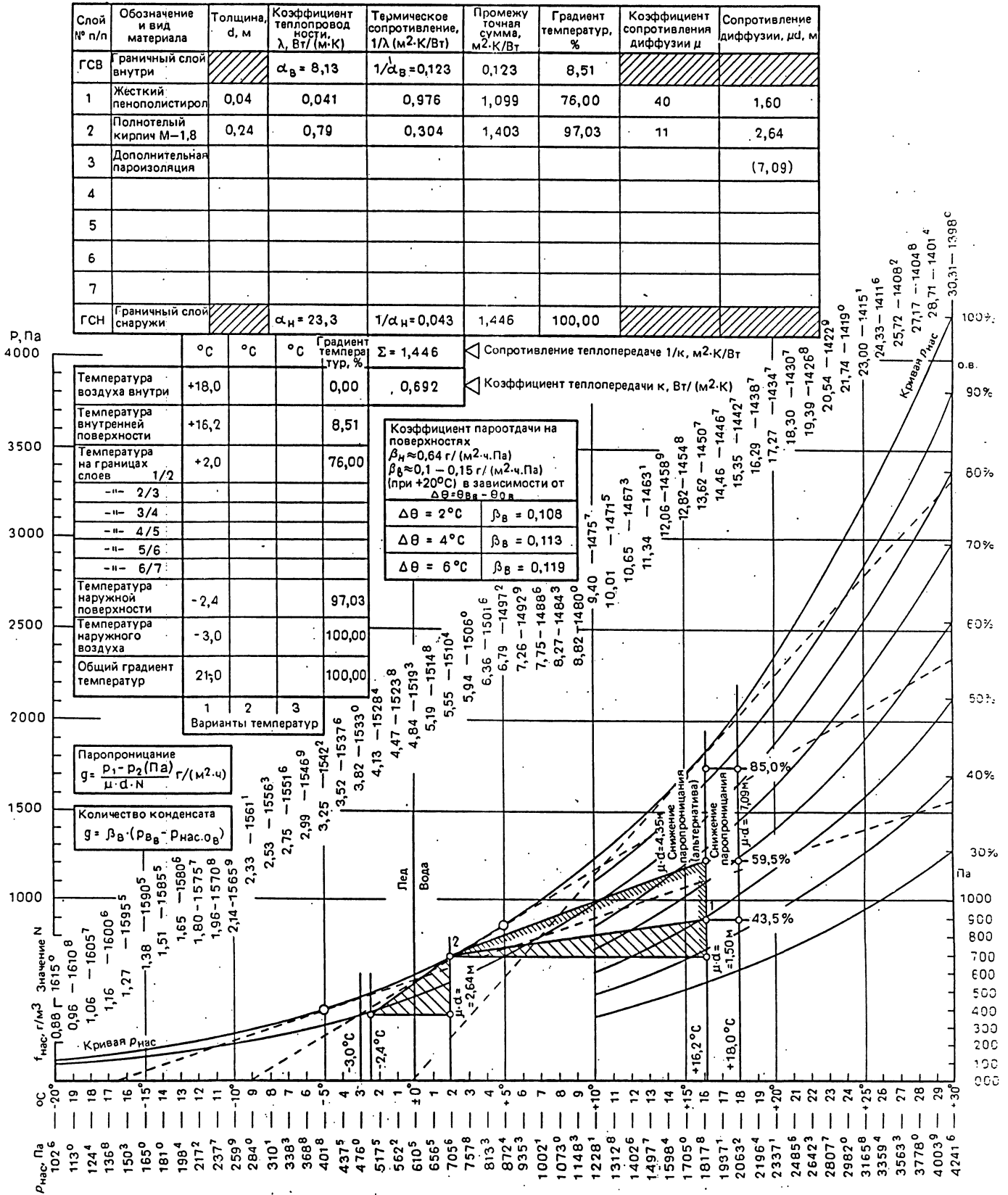


Рис. 23

ДИФФУЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

Слой № п/п	Обозначение и вид материала	Толщина d, м	Коэффициент теплопроводности, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Термическое сопротивление, $1/\lambda$ (м <sup>2</sup> ·К/Вт)	Промежуточная сумма, м <sup>2</sup> ·К/Вт	Градиент температур, %	Коэффициент сопротивления диффузии $\mu$	Сопротивление диффузии, $\mu$ , м
ГСВ	Граничный слой внутри		$\alpha_B = 8,13$	$1/\alpha_B = 0,123$	0,123	8,32		
1	Железобетон	0,07	2,04	0,034	0,157	10,62	110	7,70
2	Жесткий пенополистирол	0,05	0,041	1,220	1,377	93,10	40	2,00
3	Железобетон	0,12	2,04	0,059	1,436	97,09	110	13,20
4								
5								
6								
7								
ГСН	Граничный слой снаружи		$\alpha_H = 23,3$	$1/\alpha_H = 0,043$	1,479	100,00		

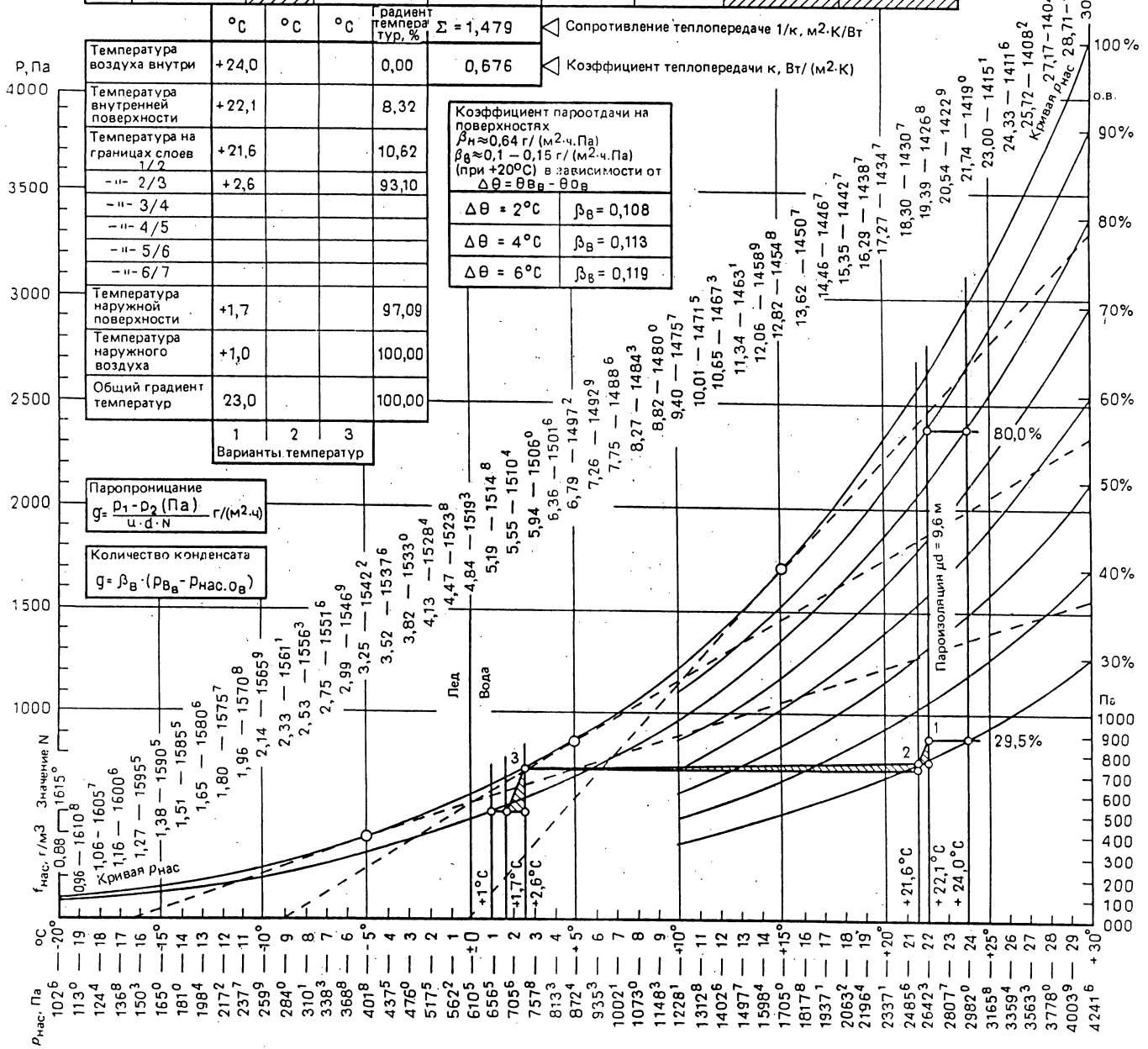


Рис. 24

слой имеет толщину 0,12 м, а внутренний — 0,07 м. Толщина слоя теплоизоляции, состоящего из жесткого пенополистирола, равна 50 мм. Таким образом, общая толщина стены составляет 0,24 м.

Первый зимний период показал, что внутри плит образуется конденсат, поэтому необходимо было выяснить целесообразность нанесения на внутреннюю сторону плит дополнительного слоя, снижающего паропроницание, или пароизоляции.

Оптимальными условиями для прядильни являются температура внутреннего воздуха +24°C и относительная влажность 80%. В Штутгарте средняя температура воздуха в январе составляет +1°C.

После внесения исходных данных в таблицы рабочего графика (рис. 24) и расчета значений температур на диаграмме вычерчивают линии температур. Отношение сопротивлений диффузии отдельных слоев показывает, что начать следует с построения наружного треугольника (т.е. третьего слоя). Его вершина 3 лежит в точке пересечения кривой  $p_{нас}$  с линией температуры + 2,6°C (температура на границе второго и третьего слоев). Эта точка является исходной для построения основания треугольника второго слоя, длина противолежащего катета которого в 2/13,2 раза меньше длины противолежащего катета треугольника третьего слоя. На основании треугольника второго слоя строится треугольник первого слоя, длина противолежащего катета которого в 7,7/13,2 раза меньше длины противолежащего катета треугольника третьего слоя. Проекция вершины 1 на линию температуры +24°C дает значение относительной влажности 29,5%. Это чрезвычайно низкое значение указывает на то, что во избежание внутреннего конденсатообразования в "сэндвич-конструкциях" должны быть обязательно предусмотрены защитные мероприятия.

Сопротивление диффузии пароизоляции рассчитывают аналогично предыдущему примеру. Его выводят из отношения расстояния от вершины 1 до ординаты, соответствующей относительной влажности 80%, к длине противолежащего катета треугольника третьего слоя, умноженной на сопротивление диффузии третьего слоя. Значение  $\mu d$  оказывается равным 96 м. Таким образом, чтобы избежать образования конденсата в опасном сечении между вторым и третьим слоями при среднеянварской температуре, на внутренней стороне "сэндвич-плит" необходимо нанести высококачественную пароизоляцию, имеющую в своем составе алюминиевую фольгу.

3.5. Определение параметров внутренней пароизоляции трехслойной конструкции. Наружная стена плавательного бассейна в г. Эссене состоит из несущего слоя кирпича с вертикальными пустотами М-1400 толщиной 0,24 м, слоя теплоизоляции из жесткого пенополистирола толщиной 0,08 м и внутреннего слоя лицевой кладки из кирпича с вертикальными пустотами М-1000 толщиной 0,115 м. Общая толщина стены составляет таким образом 0,435 м.

Чтобы исключить образование конденсата при минимальной за год температуре —12°C в плоскости, расположенной между наружным несущим слоем кирпичной кладки и теплоизоляцией, необходимо определить сопротивление диффузии слоя материала, уменьшающего паропроницание (или пароизоляции), который должен быть уложен между слоями внутренней лицевой кладки и теплоизоляции.

Микроклимат в помещении плавательного бассейна характеризуется температурой +28°C и относительной влажностью воздуха 75%.

Для большей наглядности данные в таблицу (рис. 25) следует внести таким образом, чтобы слой, снижающий паропроницание, или пароизоляцию (с неизвестным вначале сопротивлением диффузии) можно было рассматривать как второй слой, сопротивление теплопередаче кото-

рого составляет 0 м<sup>2</sup>·К/Вт. Поэтому нужно начинать построение уже известным методом треугольника четвертого слоя.

Вначале вычерчивают треугольники для третьего и первого слоев без учета пароизоляции. Они показывают, что максимальная относительная влажность воздуха в помещении составляет 19,7%. Вследствие низкой температуры наружного и относительно высокой температуры внутреннего воздуха это значение чрезвычайно мало.

Затем треугольник первого слоя смещают вверх до тех пор, пока его вершина не окажется на 75%-й ординате линии температуры +28 °С. При этом кривая  $p_{нас}$  еще не касается треугольника. Отношение расстояния сдвига к длине противолежащего катета треугольника четвертого слоя, умноженное на сопротивление диффузии четвертого слоя, позволяет получить значение сопротивления диффузии слоя дополнительной пароизоляции  $\mu d = 24,3$  м. Следует учесть, что применение криволинейной гипотенузы даст более высокий результат.

3.6. Определение параметров дополнительного слоя пароизоляции трехслойной конструкции. Наружная стена плавательного бассейна в Эссене (из предыдущего примера) должна быть оснащена слоем материала, снижающего паропроницание, или пароизоляцией, которые не допускают образования конденсата лишь при среднегодовой температуре +9,3°C (округленно +9°C).

Данные в таблицы (рис. 26) вносят аналогично предыдущему примеру. Точно так же строят треугольники слоев, т.е. треугольник первого слоя строится вначале без учета пароизоляции. Это дает максимальную относительную влажность воздуха в помещении 59,4%.

Затем треугольник необходимо сдвинуть с целью совмещения его вершины с положением 75%-й ординаты линии температуры +28°C. Отношение длины сдвига к длине противолежащего катета треугольника четвертого слоя, умноженное на сопротивление диффузии четвертого слоя, дает значение сопротивления диффузии, равное 2,93 м. Таким образом, можно сделать вывод, что для стен плавательного бассейна необходим слой материала, снижающего паропроницание, с умеренной эффективностью, например *Vaporex* ( $\mu d = 3,2$  м).

В этом случае точный результат можно получить только с использованием криволинейной гипотенузы. Дополнительную корректировку можно выполнить следующим образом. Длины противолежащих катетов четвертого третьего и первого слоев, равны соответственно 38,5 51,3 и 16,5 мм, а среднее значение.  $N - 1474, 1439$  и 1411. Расстояние сдвига равно 47 мм.

Исправленные значения длин противолежащих катетов получают путем умножения длин измеренных отрезков на отношения значений  $N$ , т.е.  $51,3 \cdot 1439 / 1474 = 50,1$  мм и  $16,5 \cdot 1411 / 1474 = 15,8$  мм. Недостаток сопротивления диффузии  $(51,3 + 16,5) - (50,1 + 15,8) = 1,9$  мм добавляет к расстоянию сдвига, скорректированное значение которого составляет 48,9 мм. Сопротивление диффузии слоя, снижающего паропроницание, имеет теперь заданную величину  $48,9 / 38,5 \times 2,4$  м = 3,05 м; прирост к первоначальному значению составляет 4,1%.

Из результата корректировки следует, что в нормальном случае при определении параметров пароизоляции не будет большой ошибки, если распределение давлений пара упрощенно принимается линейным, а гипотенузы — прямыми. Следует помнить, что речь идет о стационарных режимах переноса тепла и водяного пара. Фактическое состояние является более сложным.

3.7. Баланс влаги в однородной конструкции. Наружная стена плавательного бассейна в Мюнхене выполненная из кирпича с вертикальными пустотами М-800 с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,41$  Вт/(м·К) и коэффициентом сопротивления диффузии  $\mu = 8$ . Толщина стены  $d = 0,365$  м. Таким образом, термичес-

ДИФфуЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

Слой № п/п	Обозначение и вид материала	Толщина, d, м	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·К)	Термическое сопротивление, 1/λ (м²·К/Вт)	Промежуточная сумма, м²·К/Вт	Градиент температур, %	Коэффициент сопротивления диффузии μ	Сопротивление диффузии, μ, м
ГСВ	Граничный слой внутри		$\alpha_B = 8,13$	$1/\alpha_B = 0,123$	0,123	4,45		
1	Лицевая кирпичная кладка М-1000	0,115	0,47	0,245	0,368	13,32	9	1,03
2	Пароизоляция	-	-	-	0,368	13,32		(24,30)
3	Жесткий пенополистирол	0,08	0,041	1,951	2,319	83,96	40	3,20
4	Несущий слой кирпичной кладки М-1400	0,24	0,60	0,400	2,719	98,44	10	2,40
5								
6								
7								
ГСН	Граничный слой снаружи		$\alpha_H = 23,3$	$1/\alpha_H = 0,043$	2,762	100,00		

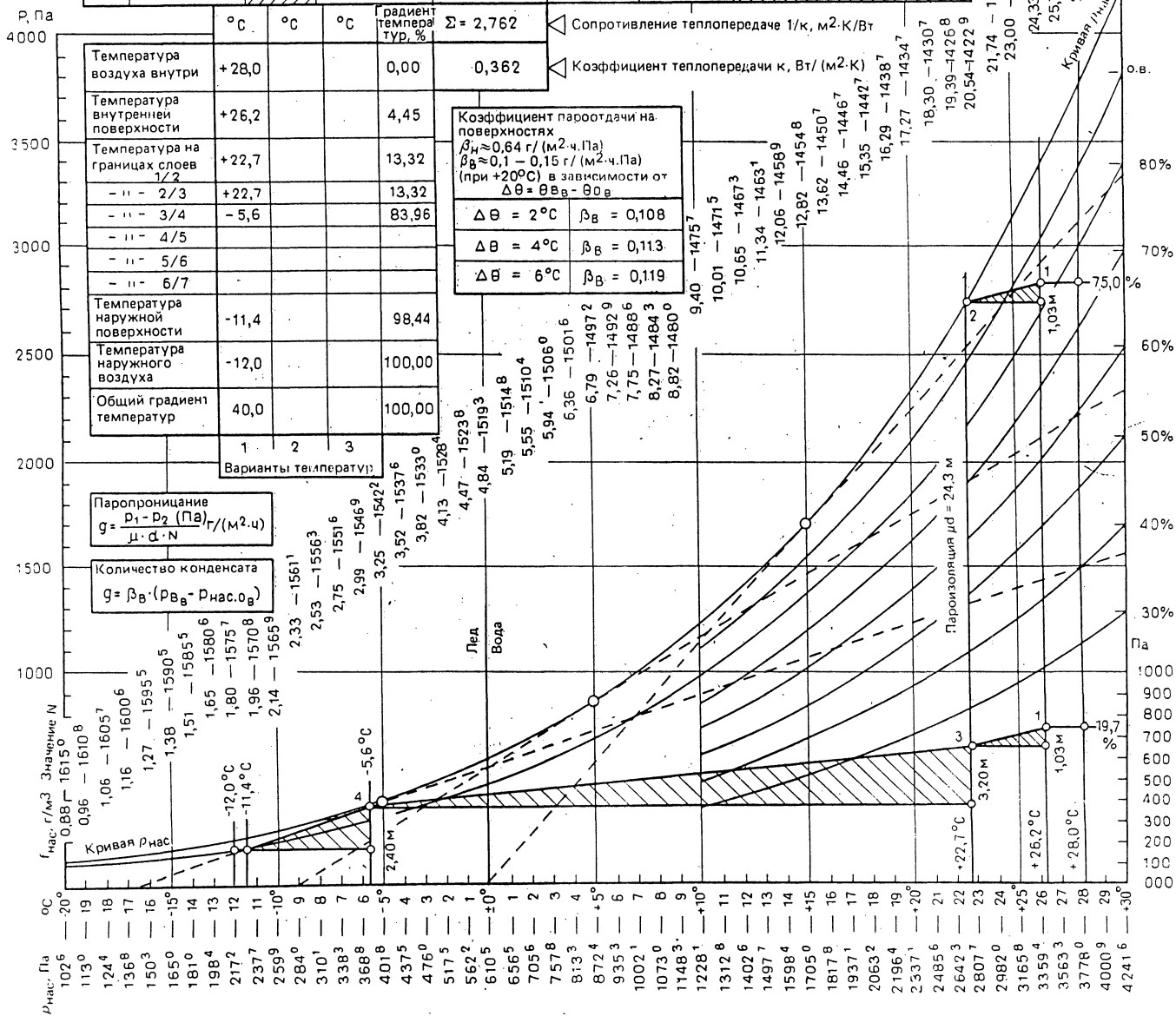


Рис. 25



ДИФФУЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

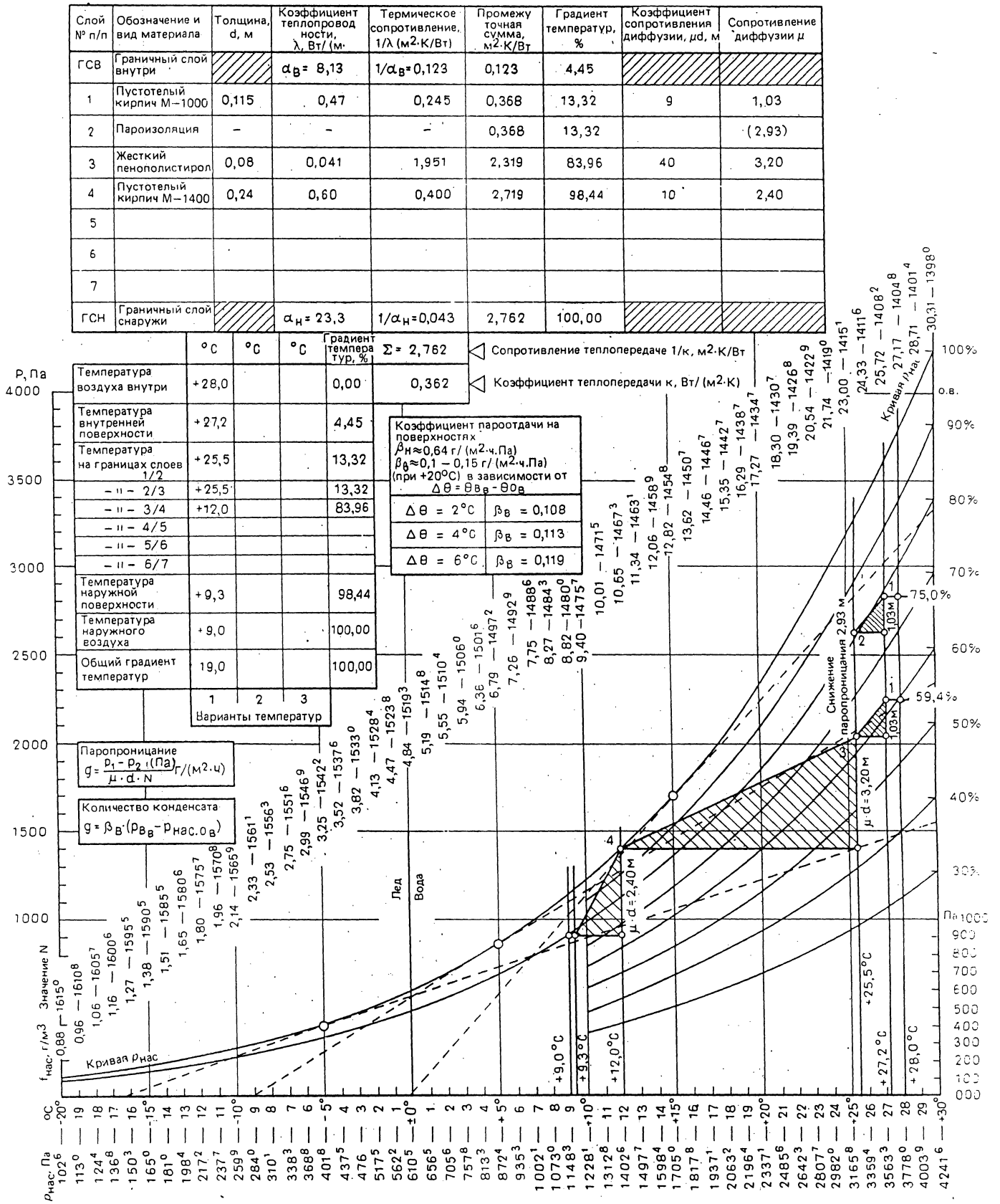


Рис. 26



кое сопротивление  $\alpha/\lambda = 0,365/0,41 = 0,89 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , а сопротивление диффузии  $\mu d = 8 \cdot 0,365 \text{ м} = 2,92 \text{ м}$ . С целью упрощения расчета можно пренебречь слоем штукатурки и сопротивлением теплоотдаче  $1/\alpha_n$ .

Если внутреннее сопротивление теплоотдаче  $1/\alpha_n$  принять равным  $0,123 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , то сопротивление теплопередаче  $1/k$  составит  $0,89 + 0,123 = 1,013 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , а коэффициент теплопередачи будет равен  $0,987 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Температуру воздуха внутри плавательного бассейна рассматривают как постоянную и принимают равной  $+30^\circ\text{C}$ .

Перепад между температурами внутреннего воздуха и поверхностью стены составляет  $0,123 \cdot 100/1,013$ , или  $12,14\%$  общего перепада между температурами внутреннего и наружного воздуха.

В интересах большей наглядности представляется целесообразным рассматривать температуры отдельных месяцев попарно. Для Мюнхена это выглядит следующим образом: январь  $-2,3^\circ\text{C}$ , февраль и декабрь  $-0,9^\circ\text{C}$ , март и ноябрь  $+2,6^\circ\text{C}$ , апрель и октябрь  $+7,2^\circ\text{C}$ , май и сентябрь  $+12,3^\circ\text{C}$ , июнь и август  $+15,6^\circ\text{C}$ , июль  $+17^\circ\text{C}$ , среднегодовая  $+7,4^\circ\text{C}$ .

Исходя из общего перепада температур и определенной в нем доли перепада между температурами внутреннего воздуха и поверхности стены  $12,14\%$  рассчитаем температуры внутренней поверхности: январь  $+26,1^\circ\text{C}$ , февраль и декабрь  $+26,2^\circ\text{C}$ , март и ноябрь  $+26,7^\circ\text{C}$ , апрель и октябрь  $+27,2^\circ\text{C}$ , март и сентябрь  $+27,9^\circ\text{C}$ , июнь и август  $+28,3^\circ\text{C}$ , июль  $+28,4^\circ\text{C}$ , среднегодовая  $+27,3^\circ\text{C}$ .

Если установить в помещении плавательного бассейна среднее значение относительной влажности воздуха  $75\%$ , то парциальное давление составит  $0,75 \cdot 4242 = 3181,5 \text{ Па}$  или округленно  $3200 \text{ Па}$ , а относительная влажность соответственно  $-75,4\%$ .

Для последующих расчетов следует принять, что сопротивление диффузии водяного пара через наружную стену равно  $1 \text{ м}$ . Необходимую корректировку целесообразно производить в конце расчета.

После вычерчивания на рабочих диаграммах (рис. 27) линий температур для тех или иных пар месяцев, а также для среднегодовых значений строят соответствующие треугольники. Необходимо построить пять треугольников для теплой и пять для холодной стороны стены, гипотенузы которых касаются кривой  $p_{нас}$ , а также три треугольника (для мая — сентября, июня — августа и июля месяцев), гипотенузы которых не касаются кривой  $p_{нас}$ . Рассмотрев построенные треугольники, можно сделать вывод, что в течение периода от октября до апреля происходит накопление, а в период от мая до сентября — удаление конденсата.

Длины противолежащих катетов отдельных треугольников соответствуют тем или иным значениям перепада давлений пара, длины оснований (прилежащих катетов) задают значение сопротивлений диффузии. Отрезки соответствующих линий температур на поверхностях конструкций соответствуют общему сопротивлению диффузии.

Дальнейший расчет можно выполнить следующим образом.

#### Январь

$$\begin{aligned} \Delta p_{тепл} &= 3200 - 2337 = 863 \text{ Па}, N = 1423; \\ \Delta p_{хол} &= 935 - 404 = 531 \text{ Па}, N = 1510; \\ \mu d_{тепл} &= 61/284 = 0,215 \text{ м}; \\ \mu d_{хол} &= 83/284 = 0,292 \text{ м}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Приток конденсата } g_{прит} &= \frac{863}{0,215 \cdot 1423} = 2,821 \\ &\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Удаление конденсата } g_{вых} &= \frac{531}{0,292 \cdot 1510} = \\ &= 1,204 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

$$\text{Накопление конденсата } \Delta g_{нак} = 1,617 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

#### Февраль – декабрь

$$\begin{aligned} \Delta p_{тепл} &= 3200 - 2267 = 933 \text{ Па}, N = 1423; \\ \Delta p_{хол} &= 1002 - 453 = 549 \text{ Па}, N = 1506; \\ \mu d_{тепл} &= 67/271 = 0,247 \text{ м}; \\ \mu d_{хол} &= 79/271 = 0,292 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Приток конденсата } g_{прит} &= \frac{933}{0,247 \cdot 1423} = 2,654 \text{ г}/ \\ &/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Удаление конденсата } g_{вых} &= \frac{549}{0,292 \cdot 1506} = 1,248 \text{ г}/(\text{м}^2 \times \\ &\times \text{ч}). \end{aligned}$$

$$\text{Накопление конденсата } \Delta g_{нак} = 1,406 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

#### Март – ноябрь

$$\begin{aligned} \Delta p_{тепл} &= 3200 - 2063 = 1137 \text{ Па}, N = 1426; \\ \Delta p_{хол} &= 1270 - 589 = 681 \text{ Па}, N = 1489; \\ \mu d_{тепл} &= 87/241 = 0,361 \text{ м}; \\ \mu d_{хол} &= 79/241 = 0,328 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$\text{Приток конденсата } g_{прит} = \frac{1137}{0,361 \cdot 1416} = 2,209 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

$$\begin{aligned} \text{Удаление конденсата } g_{вых} &= \frac{681}{0,328 \cdot 1498} = 1,394 \text{ г}/ \\ &/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

$$\text{Накопление конденсата } \Delta g_{нак} = 0,815 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

#### Апрель – октябрь

$$\begin{aligned} \Delta p_{тепл} &= 3200 - 2000 = 1200 \text{ Па}, N = 1426; \\ \Delta p_{хол} &= 1818 - 813 = 1005 \text{ Па}, N = 1467; \\ \mu d_{тепл} &= 97/200 = 0,485 \text{ м}; \\ \mu d_{хол} &= 88/200 = 0,44 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Приток конденсата } g_{прит} &= \frac{1200}{0,485 \cdot 1426} = 1,735 \text{ г}/ \\ &/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Удаление конденсата } g_{вых} &= \frac{1005}{0,44 \cdot 1467} = 1,557 \text{ г}/ \\ &/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

$$\text{Накопление конденсата } \Delta g_{нак} = 0,178 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Среднегодовые условия

$$\begin{aligned} \Delta p_{тепл} &= 3200 - 1937 = 1263 \text{ Па}, N = 1426; \\ \Delta p_{хол} &= 1877 - 824 = 1053 \text{ Па}, N = 1467; \\ \mu d_{тепл} &= 103/199 = 0,518 \text{ м}; \\ \mu d_{хол} &= 91/199 = 0,457 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Приток конденсата } g_{прит} &= \frac{1263}{0,518 \cdot 1425} = 1,71 \text{ г}/ \\ &/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Удаление конденсата } g_{вых} &= \frac{1053}{0,457 \cdot 1467} = 1,571 \text{ г}/ \\ &/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

Накопление конденсата  $\Delta g_{\text{нак}} = 0,139 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

*Май – сентябрь*

$$\Delta p_{\text{тепл}} = 3200 - 1760 = 1440 \text{ Па}, N = 1423;$$

$$\Delta p_{\text{хол}} = 1937 - 1145 = 792 \text{ Па}, N = 1455;$$

$$\mu d_{\text{тепл}} = 109/156 = 0,699 \text{ м};$$

$$\mu d_{\text{хол}} = 47/156 = 0,301 \text{ м}.$$

$$\text{Приток конденсата } g_{\text{прит}} = \frac{1440}{0,699 \cdot 1423} = 1,448 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

$$\text{Удаление конденсата } g_{\text{вых}} = \frac{792}{0,301 \cdot 1455} = 1,808 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Уменьшение количества конденсата  $\Delta g_{\text{сокр}} = 0,36 \text{ г}/(\text{м}^2 \times \times \text{ч})$ .

*Июнь - август*

$$\Delta p_{\text{тепл}} = 3200 - 1615 = 1585 \text{ Па}, N = 1423;$$

$$\Delta p_{\text{хол}} = 1937 - 1418 = 519 \text{ Па}, N = 1450;$$

$$\mu d_{\text{тепл}} = 113/127 = 0,89 \text{ м};$$

$$\mu d_{\text{хол}} = 14/127 = 0,11 \text{ м}.$$

$$\text{Приток конденсата } g_{\text{прит}} = \frac{1585}{0,89 \cdot 1423} = 1,252 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

$$\text{Удаление конденсата } g_{\text{вых}} = \frac{519}{0,11 \cdot 1450} = 3,254 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Уменьшение количества конденсата  $\Delta g_{\text{сокр}} = 2,002 \text{ г}/$   
 $/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

*Июль*

$$\Delta p_{\text{тепл}} = 3200 - 1690 = 1510 \text{ Па}, N = 1423;$$

$$\Delta p_{\text{хол}} = 2063 - 1550 = 513 \text{ Па}, N = 1445;$$

$$\mu d_{\text{тепл}} = 104/114 = 0,912 \text{ м};$$

$$\mu d_{\text{хол}} = 10/114 = 0,088 \text{ м}.$$

$$\text{Приток конденсата } g_{\text{прит}} = \frac{1510}{0,912 \cdot 1423} = 1,164 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

$$\text{Удаление конденсата } g_{\text{вых}} = \frac{513}{0,088 \cdot 1445} = 4,034 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Уменьшение количества конденсата  $\Delta g_{\text{сокр}} = 2,87 \text{ г}/$   
 $/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Если для упрощения принять длительность месяца равной  $30 \cdot 24 = 720 \text{ ч}$ , получим следующие данные (в скобках указан нарастающий итог накопления конденсата): в октябре  $720 \cdot 0,178 = 128 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $128 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в ноябре  $720 \cdot 0,815 = 587 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $715 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в декабре  $720 \cdot 1,406 = 1012 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $1727 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в январе  $720 \times 1,617 = 1164 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $2891 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в феврале  $720 \cdot 1,406 = 1012 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $3903 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в марте  $720 \cdot 0,815 = -587 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $4490 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в апреле  $720 \cdot 0,178 = -128 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $4618 \text{ г}/\text{м}^2$ ); сокращение в мае  $720 \cdot 0,36 = 259 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $4359 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в июне  $720 \cdot 2,002 = 1441 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $2918 \text{ г}/\text{м}^2$ ); в июле  $720 \cdot 2,87 = 2066 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $852 \text{ г}/\text{м}^2$ ), в августе  $426 \times 2,002 = 852 \text{ г}/\text{м}^2$  ( $- \text{г}/\text{м}^2$ ).

Таким образом, высушивание наружной стены плавательного бассейна могло бы начаться в мае и закончиться 18 августа. В качестве неиспользуемого резерва остается еще 12 дней августа и 30 дней сентября, т.е. 1008 ч, которых - как показывает простой вспомогательный расчет - было бы достаточно для высушивания дополнительно  $836 \text{ г}/\text{м}^2$  конденсата.

Расчеты показали, что при использовании среднегодовой температуры  $+ 7,4^\circ\text{C}$  происходит накопление кон-

денсата в количестве  $0,139 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ . Поэтому применение среднегодовых значений допустимо для ускоренной оценки возможной опасности долговременного накопления конденсата.

Накопление конденсата в стене достигает своего максимума в конце апреля. Поскольку расчетное значение суммарного накопления конденсата было получено с использованием первоначального фактического значения сопротивления диффузии 1 м, теперь необходимо откорректировать полученный результат.

Максимальное количество конденсата  $\max g_{\text{конд}} = 4618 / 2,92 = 1582 \text{ г}/\text{м}^2$ . Если принять, что поверхностная плотность раствора швов составляет  $365 \text{ кг}/\text{м}^2$ , то количество конденсата будет соответствовать  $1,582 \cdot 100 / 365 = 0,43\%$  массы, что практически не оказывает влияния на коэффициент теплопроводности кладки из кирпича с вертикальными пустотами.

**3.8. Упрощенная оценка баланса влаги в однородной конструкции.** Составление баланса влаги для наружной стены плавательного бассейна, показанное в предыдущем примере, требует значительного объема графических и расчетных работ.

С целью экономии времени применяют упрощенный способ расчета, который можно изложить следующим образом. Если объединить месяцы от ноября до марта и от мая до сентября, а затем найти среднее значение их среднемесячных температур, получим средние температуры зимнего и летнего периодов.

Употребляемые здесь понятия зима и лето приняты условно.

Для Мюнхена получим следующие данные (в скобках указан нарастающий итог повышения температуры): ноябрь  $+2,4^\circ\text{C}$ ; декабрь  $-0,9^\circ\text{C}$  ( $+1,5^\circ\text{C}$ ), январь  $-2,3^\circ\text{C}$  ( $-0,8^\circ\text{C}$ ), февраль  $-0,8^\circ\text{C}$  ( $-1,6^\circ\text{C}$ ), март  $+2,9^\circ\text{C}$  ( $+1,3^\circ\text{C}$ ).  $1,3^\circ\text{C} : 5 = 0,26^\circ\text{C}$  (средняя температура зимнего периода); май  $+12^\circ\text{C}$ , июнь  $+15,1^\circ\text{C}$  ( $+27,1^\circ\text{C}$ ), июль  $+17^\circ\text{C}$  ( $44,1^\circ\text{C}$ ), август  $+16,1^\circ\text{C}$  ( $+60,2^\circ\text{C}$ ), сентябрь  $+12,6^\circ\text{C}$  ( $72,8^\circ\text{C}$ ).  $72,8^\circ\text{C} : 5 = +14,56^\circ\text{C}$  (средняя температура летнего периода).

Далее следует расчет температур внутренней поверхности наружной стены плавательного бассейна в соответствии с условиями предыдущего примера.

Общий перепад температур зимой:  $30^\circ\text{C} - 0,3^\circ\text{C} = 29,7$ , летом:  $30^\circ\text{C} - 14,6^\circ\text{C} = 15,4^\circ\text{C}$ . Перепад температур между температурами воздуха и внутренней поверхности стены зимой равен  $29,7 \cdot 12,14/100 = 3,6^\circ\text{C}$  и, соответственно, летом  $-15,4 \cdot 12,14/100 = 1,9^\circ\text{C}$ . Температура поверхности зимой равна  $+30^\circ\text{C} - 3,6^\circ\text{C} = +26,4^\circ\text{C}$ ; летом  $+30^\circ\text{C} - 1,9^\circ\text{C} = +28,1^\circ\text{C}$ .

Таким образом, вместо тринадцати треугольников в предыдущем примере теперь в рабочих диаграммах (рис. 28) необходимо вычерчивать только по одному треугольнику для теплой и холодной стороны и один треугольник, не соприкасающийся с кривой  $p_{\text{нас}}$ .

Дальнейшие расчеты выполняют следующим образом:

*Зима*

$$\Delta p_{\text{тепл}} = 3200 - 2130 = 1070 \text{ Па}, N = 1425;$$

$$\Delta p_{\text{хол}} = 1111 - 499 = 612 \text{ Па}, N = 1499;$$

$$\mu d_{\text{тепл}} = 79/261 = 0,303 \text{ м};$$

$$\mu d_{\text{хол}} = 82/216 = 0,314 \text{ м}.$$

$$\text{Приток конденсата } g_{\text{прит}} = \frac{1070}{0,303 \cdot 1425} = 2,478 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

$$\text{Удаление конденсата } g_{\text{вых}} = \frac{612}{0,0314 \cdot 1499} = 1,3 \text{ г}/$$

$/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Накопление конденсата  $\Delta g_{\text{нак}} = 1,178 \text{ г}/$   
 $/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

ДИФФУЗИЙ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

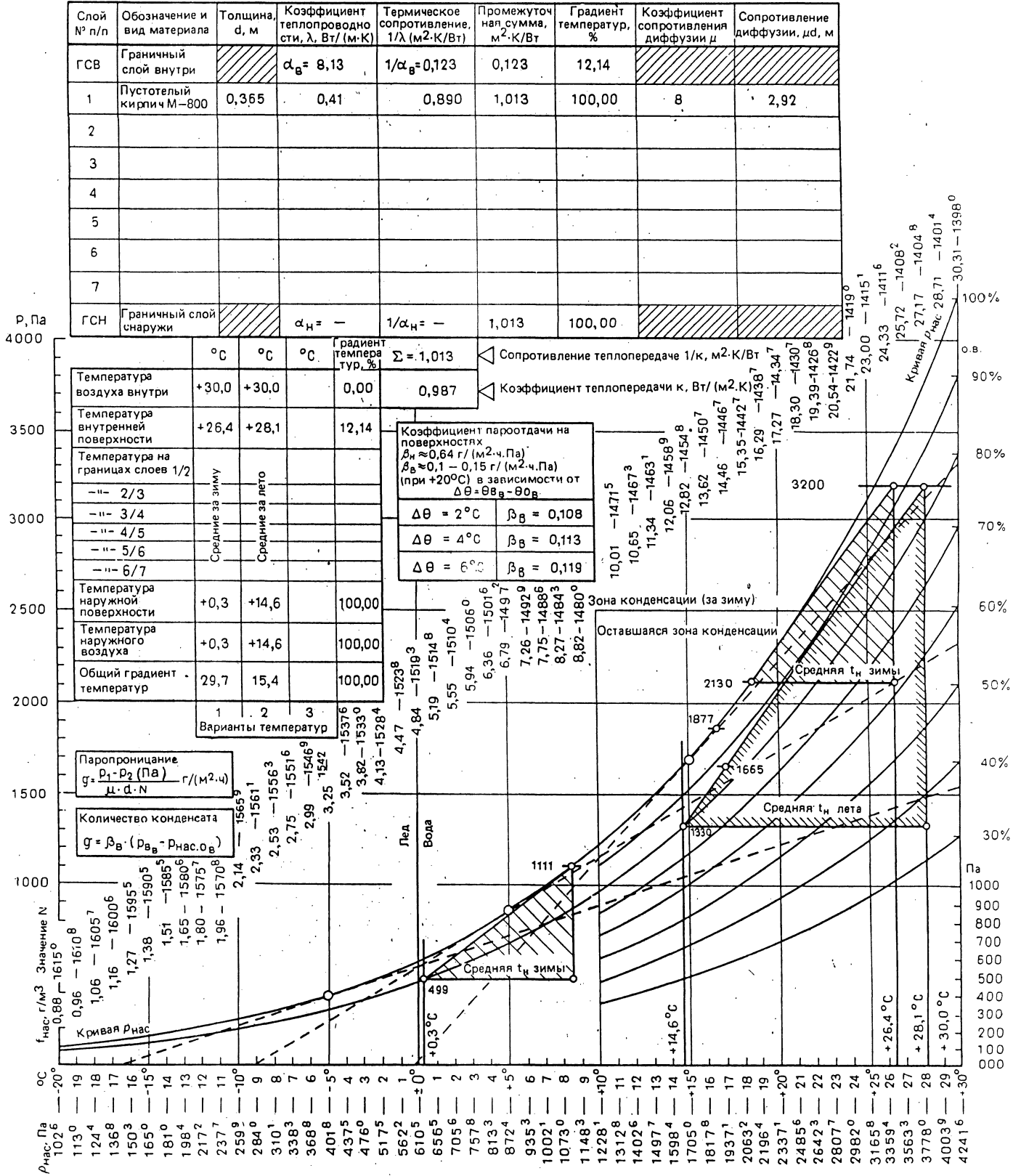


Рис. 28

Лето

$$\Delta p_{\text{менл}} = 3200 - 1665 = 1535 \text{ Па}, N = 1425;$$

$$\Delta p_{\text{хол}} = 1887 - 1330 = 547 \text{ Па}, N = 1452;$$

$$\mu d_{\text{менл}} = 116/135 = 0,859 \text{ м};$$

$$\mu d_{\text{хол}} = 19/135 = 0,141 \text{ м}.$$

$$\text{Приток конденсата } g_{\text{прит}} = \frac{1535}{0,859 \cdot 1425} = 1,254 \text{ г/}$$

/(м<sup>2</sup> · ч).

$$\text{Удаление конденсата } g_{\text{вых}} = \frac{547}{0,141 \cdot 1452} = 2,672 \text{ г/}$$

/(м<sup>2</sup> · ч).

Уменьшение количества конденсата  $\Delta g_{\text{сокр}} = 1,418 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ .

В отличие от расчетов со средними температурами длительность зимнего и летнего периодов принимается равной шести месяцам по 720 ч в месяц или по 4320 ч каждый. Отсюда следует, что накопление конденсата в зимнюю половину года равно  $4320 \cdot 1,178 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч)} = 5089 \text{ г/м}^2$ , а уменьшение его количества в летнюю половину года -  $4320 \cdot 1,418 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч)} = 6126 \text{ г/м}^2$ .

Резерв высушивания равен  $1037 \text{ г/м}^2$  и соответствует 20,4% количества конденсата, образующегося в зимнюю половину года. В предыдущем примере он составлял  $836 \cdot 100/4618 = 18,1\%$ . Таким образом, это не приводит к принципиальному изменению результатов. Однако, если рассмотреть абсолютные значения накопления и удаления конденсата, можно установить, что упрощенное определение баланса дает превышение на 10,2% по его накоплению и 12,3% по уменьшению. А это означает, что использование упрощенных методов расчета при определении максимального количества конденсата у конструкций с большими влажностными нагрузками создает определенный резерв надежности. То же самое относится к процессу высушивания, если обращенная к холодной стороне граница зоны конденсации установлена достаточно корректно. Она проходит через точку касания криволинейного треугольника, криволинейная гипотенуза которого все еще соприкасается с кривой  $p_{\text{нас}}$ . Поэтому с целью экономии времени при составлении баланса влаги можно применить упрощенный способ, основанный на средних значениях температур зимнего и летнего периодов. При этом необходимо учитывать, что гипотенуза треугольника, соответствующего среднегодовым условиям, либо немного пересекает, либо соприкасается с кривой  $p_{\text{нас}}$ . Это условие следует предварительно проверять в каждом отдельном случае. Если относительная влажность воздуха, а следовательно, и парциальное давление в помещении не намного превышает норму, то при температуре наружного воздуха зимнего периода конденсат еще не образуется. В рассматриваемом примере это будет именно так, если относительная влажность воздуха в помещении составит менее 58%. При температуре воздуха в помещении +25°C граничное значение относительной влажности воздуха будет приблизительно равно 67%, а при температуре +20°C — 77%. Это говорит о том, что при такой конструкции стены можно избежать образования конденсата, если период похолодания не будет длительным.

Необходимо также провести пробные расчеты для зимнего периода, когда его средняя температура понижается на 6°C. Полученное при этом часовое количество конденсата умножают на 1440, т.е. на продолжительность в часах двух месяцев. Для Мюнхена температура наружного воздуха составит +0,3°C -6°C = -5,7°C, для Гамбурга -3,9°C, а для Карлсруэ -2,8°C.

Если и при этой обостренной климатической ситуации не будет зафиксировано никакого конденсатообразования, среднюю температуру зимнего периода следует понизить на 10°C и возникающее при этом часовое количество конденсата умножить на 720, т.е. на

число часов в одном месяце. Тогда температура наружного воздуха составит -9,7°C, для Мюнхена, -7,9°C для Гамбурга и -6,8°C для Карлсруэ.

В заключение следует обратить внимание читателей на "Указания по оценке влажности конструкций в домах из сборных конструкций", в соответствии с которыми в расчет принимаются следующие климатические условия: температура и относительная влажность воздуха снаружи равны соответственно -10°C и 80%; температура и относительная влажность воздуха внутри равны соответственно +20°C и 50%; длительность воздействия - 1440 ч (два месяца); максимальное количество конденсата на границе поверхностей между непособными к водопоглощению слоями и воздушными прослойками или водопроницаемыми слоями через 1440 ч - 500 г/м<sup>2</sup>; максимальное повышение влажности вследствие образования конденсата для конструкций из древесины или древесных материалов 3% по весу.

Таким образом, в сборных домах требования к температуре наружного воздуха и длительности холодного периода особенно высоки. Поэтому необходимо добиться такого положения, чтобы даже построенный в наиболее неблагоприятной местности сборный дом не подвергался опасности образования в нем конденсата

**3.9. Упрощенная оценка баланса влаги в многослойной конструкции.** Конструкция теплой крыши прачечной в Гамбурге состояла из железобетонного перекрытия  $d = 0,16 \text{ м}$ , пароизоляции с сопротивлением диффузии  $\mu d = 90 \text{ м}$ , слоя теплоизоляции из жестких плит пенополиуретана  $d = 60 \text{ мм}$ , кровельного ковра в виде рулонов поливинилхлоридной пленки  $d = 1,5 \text{ мм}$  и гравийной посыпки  $d = 50 \text{ мм}$ .

После пятилетней эксплуатации здания были взяты пробы на влажность, которые показали, что в слое теплоизоляции содержится значительное количество влаги. Следовало выяснить, явились ли причиной проникновения влаги повреждения в кровельном ковре или пароизоляции или накопление конденсата в конструкции происходило несмотря на безупречное состояние отдельных слоев.

Условия микроклимата в прачечной характеризуются температурой +25°C и относительной влажностью воздуха 80%. Средняя температура зимнего периода в Гамбурге составляет +2,1°C, летнего периода +15°C. После внесения всех данных в таблицы на рабочем графике (рис. 29) и расчета значений температур на диаграммах вычерчивают линии температур.

Построение треугольников для зимних условий целесообразно начать с треугольника четвертого слоя (кровельного ковра), противолежащий катет которого лежит на линии температуры +3,4°C. Поскольку кровля не создает градиента температур, длина основания треугольника равна нулю. Противолежащий катет четвертого слоя начинается на высоте точки пересечения кривой  $p$ , соответствующей относительной влажности воздуха 80%, с линией температуры +2,1°C и содержит в себе также противолежащий катет треугольника пятого слоя. Вершина 4 соответствует точке пересечения кривой  $p_{\text{нас}}$  с линией температуры +3,4°C. Основание треугольника третьего слоя (теплоизоляции) простирается по горизонтали от вершины 4 до линии температуры +22,7°C, на которой должен быть построен соответствующий противолежащий катет. Поскольку его длина равна лишь 1/30 длины противолежащего катета треугольника четвертого слоя, графически он едва различим. Поэтому гипотенуза этого треугольника проходит вблизи его основания.

Противолежащий катет треугольника второго слоя (пароизоляции) также лежит на линии температуры +22,7°C, длина основания этого треугольника равна нулю. Длина противолежащего катета вдвое больше длины противолежащего катета треугольника четвер-

ДИФфуЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

Слой № п/п	Обозначение и вид материала	Толщина, д, м	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·К)	Термическое сопротивление, 1/λ (м²·К/Вт)	Промежуточная сумма, м²·К/Вт	Градиент температур, %	Коэффициент сопротивления диффузии μ	Сопротивление диффузии, дд, м
ГСВ	Граничный слой внутри		$\alpha_B = 8,13$	$1/\alpha_B = 0,123$	0,123	6,06		
1	Железобетонное перекрытие	0,16	2,04	0,078	0,201	9,91	110	17,60
2	Пароизоляция		-	-	0,201	9,91		90,00
3	Жесткий пенополиуретан	0,06	0,035	1,714	1,915	94,38	25	1,50
4	Кровельный рулонный материал	0,0015	-	-	1,915	94,38	30 000	45,00
5	Гравийная засыпка	0,05	0,70	0,071	1,986	97,88	8	0,40
6								
7								
ГСН	Граничный слой снаружи		$\alpha_H = 23,3$	$1/\alpha_H = 0,043$	2,029	100,00		

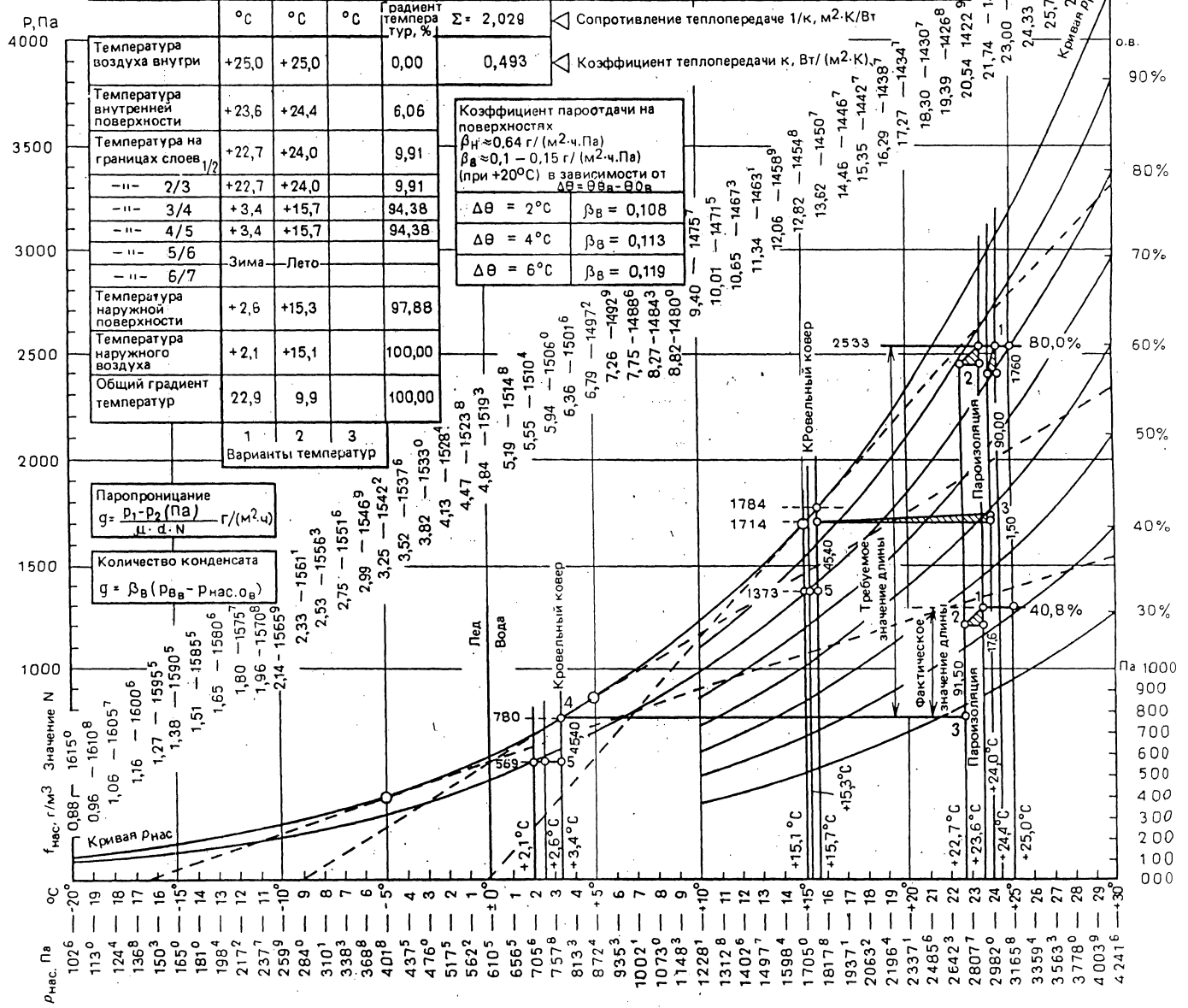


Рис. 29

того слоя ( $90/45 = 2$ ). Основание треугольника первого слоя проходит через вершину 2 и простирается до линии температуры  $+23,6^{\circ}\text{C}$ , на которой построен в соответствующей пропорции его противолежащий катет. Проекция вершины 1 на линию температуры  $+25^{\circ}\text{C}$  дает значение относительной влажности лишь  $40,8\%$ . Тем самым доказано, что в зимний период образуется зона конденсации, которая начинается на нижней стороне кровельного ковра и простирается внутрь теплоизоляционных плит.

Количество выпадающего в конструкции крыши конденсата рассчитывают как разность между количествами диффундирующего в сторону зоны конденсации и покидающего ее в единицу времени водяного пара. Выход водяного пара определяют из уравнения  $\Delta p_{\text{хр.л}} / (\mu d N) = (780 - 569) / (45,4 - 1504) = 0,00309 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Поступление пара - с учетом корректировки значений  $N$  - соответствует его количеству при относительной влажности воздуха в помещении, равной  $40,8\%$ . Однако, поскольку относительная влажность воздуха равна  $80\%$ , найденное выше количество выходящего из зоны конденсации водяного пара нужно умножить на коэффициент, величина которого больше единицы. Значение этого коэффициента можно получить, если длину противолежащих катетов всех треугольников слоев, которые лежат на теплой стороне по отношению к зоне конденсации, разделить на их фактическую длину.

Искомая длина соответствует расстоянию от основания треугольника третьего слоя до  $80\%$ -й ординаты, фактическая длина определяется расстоянием от того же основания до  $40,8\%$ -й ординаты. Значение коэффициента оказывается равным  $3,46$ .

Следовательно, поступление водяного пара равно  $0,00309 \cdot 3,46 = 0,01069 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (без корректировки) и  $0,01069 \cdot 1504 / 1424 = 0,01129 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (после корректировки). Накопление влаги равно  $0,01129 - 0,00309 = 0,00820 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , а в течение зимней половины года -  $4320 \cdot 0,00820 = 35,4 \text{ г} / \text{м}^2$ .

Построение треугольников для летних условий начинают с того, что расстояние между ординатой давления пара внутри помещения и ординатой давления пара наружного воздуха делят на сопротивление диффузии отдельных слоев.

После вычерчивания противолежащих катетов и построения треугольников слоев устанавливают, что вершина 4 лежит ниже кривой  $p_{\text{нас}}$ . Это означает, что происходит сокращение количества накопившегося конденсата.

Далее рассчитывают разницу между количествами выходящего из зоны конденсации в единицу времени и поступающего водяного пара. Приток находят из уравнения  $\Delta p_{\text{тепл}} / (\mu d N) = (2533 - 1714) / (109,10 \cdot 1419) = 0,00529 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Количество выходящего из зоны конденсации водяного пара - с учетом корректировки значения  $N$  - будет равно значению, при котором вершина треугольника четвертого слоя соприкасается с кривой  $p_{\text{нас}}$ . Но поскольку она расположена ниже кривой  $p_{\text{нас}}$ , количество поступающего в зону конденсации водяного пара следует умножить на коэффициент, величина которого близка к единице.

Значение этого коэффициента можно получить, если максимальную длину противолежащего катета треугольника четвертого слоя (до пересечения с кривой  $p_{\text{нас}}$ ) разделить на фактическую длину противолежащего катета. Его значение в данном примере оказывается равным  $1,205$ .

Следовательно, количество выходящего из зоны конденсации пара равно  $0,00529 - 1,205 = 0,00637 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (без корректировки) и  $0,00637 \cdot 1419 / 1452 = 0,00623 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (после корректировки). Уменьшение коли-

чества конденсата в течение летней половины года равно  $4320 \cdot 0,00094 = 4,1 \text{ г} / \text{м}^2$ . При накоплении конденсата в зимнюю половину года в количестве  $35,4 \text{ г} / \text{м}^2$  годовое накопление составляет  $35,4 - 4,1 = 31,3 \text{ г} / \text{м}^2$ .

Таким образом, накопление конденсата в течение пяти лет составило  $156,5 \text{ г} / \text{м}^2$ . С учетом принятой поверхностной плотности жесткого пенополиуретана  $1800 \text{ г} / \text{м}^2$  такое количество создает влажность  $8,7\%$  массы. Поскольку конденсат накапливается в слое теплоизоляционных плит, обращенном к кровельному ковра, именно там при зондировании должны были зарегистрировать соответствующий результат. Отсюда следует, что даже при безупречном состоянии отдельных слоев крыши пароизоляция должна обладать более высоким сопротивлением диффузии.

Если пароизоляция обладает таким же сопротивлением диффузии, как кровельный ковер, то это еще не говорит о том, что мероприятия против возникновения конденсата достаточны. Даже в этом случае, когда теплая сторона находится в нормальных условиях микроклимата, например, при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $50\%$ , пароизоляция должна выдерживать больший перепад давлений, чем кровельный ковер. Это условие тем более обязательно, когда температура наружного воздуха приближается к средней температуре зимнего периода. При этом через пароизоляцию в направлении слоя теплоизоляции диффундирует больше водяного пара, чем через равноценный по своим свойствам кровельный ковер наружу. Излишек водяного пара конденсируется на нижней стороне кровельного ковра, потому что в этой плоскости давление насыщенного пара ниже, чем в зоне теплоизоляции. Поэтому применение пароизоляции с более высоким сопротивлением диффузии, чем у кровельного ковра, уменьшает количество выпадающего конденсата.

По мере увлажнения слоя теплоизоляции плоскость конденсации перемещается по направлению к пароизоляции и перепад парциальных давлений слоя пароизоляции уменьшается. Когда он становится равным нулю, то дополнительное поступление водяного пара из воздуха помещения через пароизоляцию в слой теплоизоляции прекращается. В рассматриваемом примере осложняющим обстоятельством является то, что давление насыщенного пара на нижней стороне кровельного ковра играет решающую роль для всего периода накопления.

**3.10. Диффузия водяного пара через экспериментальную конструкцию многослойной стены (дополнения к методу треугольника).** В лаборатории строительной физики создали опытную конструкцию стены, которая состоит из трех одинаковых слоев специального строительного материала, обладающего высокой пористостью. Толщина большемерных плит с параллельными поверхностями равна  $80 \text{ мм}$ , общая толщина стены -  $240 \text{ мм}$ . Коэффициент теплопроводности этого специального строительного материала равен  $0,1 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ , а коэффициент сопротивления диффузии -  $10$ .

На теплой стороне опытной конструкции температура воздуха составляет  $+25,5^{\circ}\text{C}$ , на холодной - около  $0^{\circ}\text{C}$ . Сопротивление теплоотдаче на теплой стороне стены равно  $0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  (незначительное движение воздуха), а на холодной (сильное движение воздуха) им можно пренебречь.

При сопротивлении теплопередаче  $2,55 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  после достижения стационарного режима на поверхностях и на границах слоев устанавливаются температуры:  $+24^{\circ}\text{C}$ ,  $+16^{\circ}$ ,  $+8^{\circ}$  и  $-0^{\circ}\text{C}$ , т.е. градиент температуры равен  $1^{\circ}\text{C}$  на  $10 \text{ мм}$  толщины стены.

При относительной влажности воздуха на теплой стороне  $68,7\%$  и на холодной  $80\%$  гипотенуза треугольника третьего слоя (рис. 30) соприкасается с кривой  $p_{\text{нас}}$ ; продолжение касательной пересекает линию температуры  $+24^{\circ}\text{C}$  на высоте  $68,7\%$ -й ординаты. Если предельно не была выполнена корректировка значе-



ДИФФУЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

Слой № п/п	Обозначение и вид материала	Толщина, d, м	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·К)	Термическое сопротивление, 1/λ (м²·К/Вт)	Промежуточная сумма, м²·К/Вт	Градиент температур, %	Коэффициент сопротивления диффузии μ	Сопротивление диффузии, μд, м
ГСВ	Граничный слой внутри		$\alpha_B = 6,67$	$1/\alpha_B = 0,150$	0,150	5,88		
1	Специальный строительный материал	0,08	0,100	0,800	0,950	37,25	10	0,800
2		0,08	0,100	0,800	1,750	68,63	10	0,800
3		0,08	0,100	0,800	2,550	100,00	10	0,800
4								
5								
6								
7								
ГСН	Граничный слой снаружи		$\alpha_H =$	$1/\alpha_H =$		100,00		

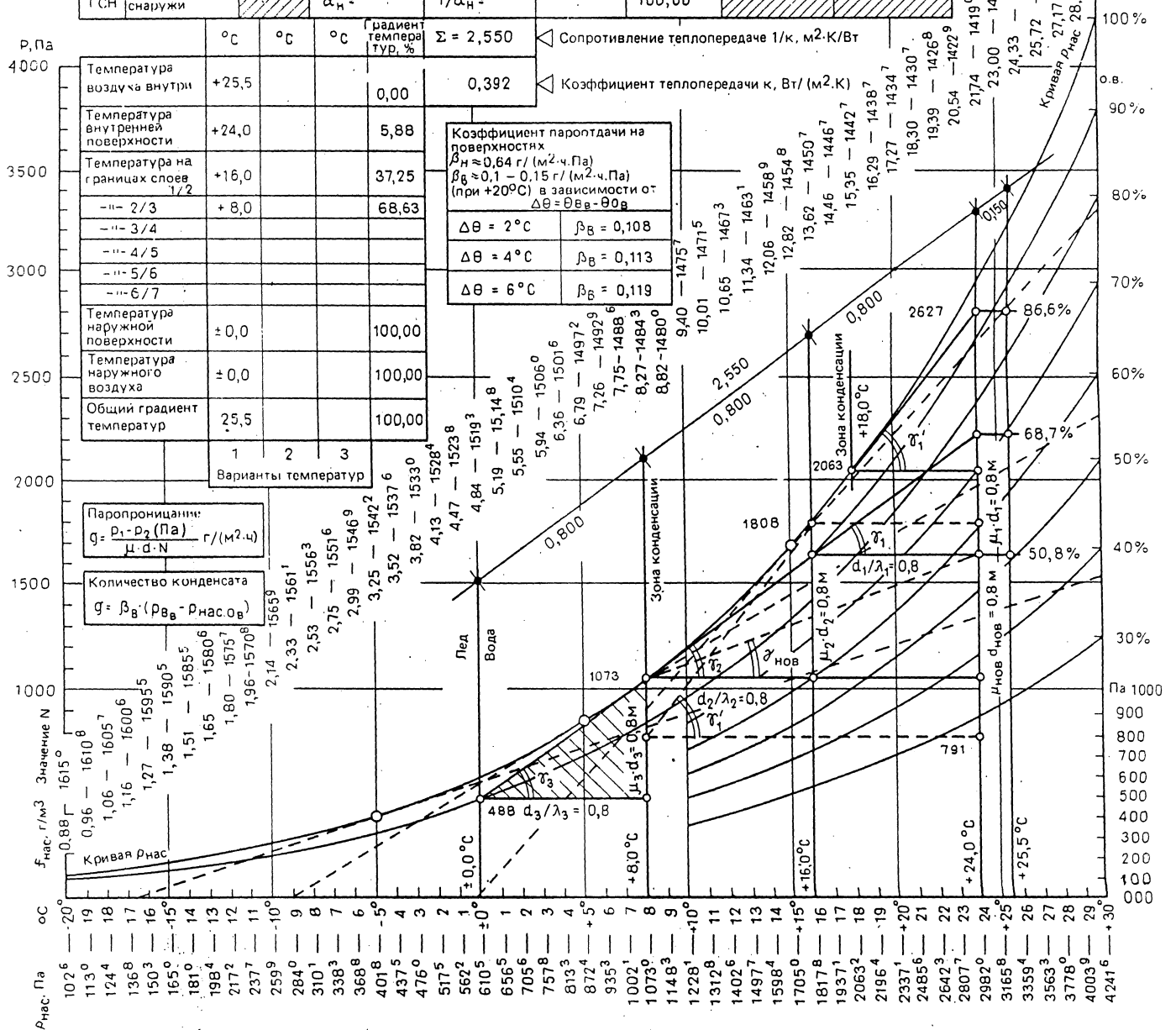


Рис. 30

нии  $N$ , то благодаря однородности слоев гипотенузы их треугольников могут лежать на касательной. Таким образом, создается такая же ситуация, как при расчете диффузии водяного пара через однослойную стену из того же материала толщиной 240 мм.

Если обозначить угол между основанием и гипотенузой  $\gamma$ , тангенсы этого угла для треугольников всех слоев будут одинаковы:  $\operatorname{tg} \gamma_1 = \operatorname{tg} \gamma_2 = \operatorname{tg} \gamma_3 = \mu d / (d/\lambda) = \lambda \mu$ . Таким образом, тангенс угла треугольника соответствует значению произведения  $\lambda \mu$ , которое упрощенно записывают как значение  $LM$ .

Разумеется, было бы чистой случайностью, если бы тангенсы возникающих в диаграмме углов  $\gamma$  оказались равны. Это объясняется тем, что длины противолежащих катетов определяются положением кривой  $p_{нас}$  или ординатой относительной влажности и лишь очень редко могут быть равны по величине сопротивлениям диффузии соответствующих слоев. Речь идет о соблюдении отношения сопротивления диффузии. Изображенные на диаграмме длины основания также иногда не могут быть равны по величине тем или иным сопротивлениям теплопередаче, потому что для последних решающими являются градиенты температур, которые изменяются в связи с изменением значения принятого общего градиента температур. Таким образом, значение  $LM$  характеризует не подъем гипотенузы, а отношение подъемов гипотенуз.

Например, если заменить первый слой другим слоем с наполовину большим коэффициентом теплопередачи и вдвое большим коэффициентом сопротивления диффузии, то следовало бы лишь уменьшить его толщину до 40 мм, чтобы сохранить прежние значения температур на поверхностях и на границах слоев стены. Величины сопротивлений теплопередаче (которые являются решающим фактором для длин основания треугольников) и сопротивлений диффузии (которые определяют длины противолежащих катетов) не изменились бы. В свою очередь остается при своем прежнем значении подъем гипотенузы, поэтому значение  $LM$  также не должно меняться. Это требование вытекает из следующего равенства  $0,5 \cdot 2 = 1$ .

Не следует выпускать из виду, что треугольники слоев образуют замкнутую цепь, которая продолжается до пересечения с кривой  $p_{нас}$ . Это значит, что без выполнения необходимой корректировки условия стационарного режима влагопереноса сохраняются. Но если образуется зона конденсации и режим влагопереноса становится нестационарным, на теплой стороне ограждения относительная влажность воздуха повышается до 86,6%. В этом случае нужно строить новый треугольник первого слоя, гипотенуза которого должна быть касательной к кривой  $p_{нас}$ . Для уровня его основания определяющей является точка касания. Если сравнить новый треугольник с прежним треугольником первого слоя, то оказывается, что подъем гипотенузы в нем значительно больше ( $\operatorname{tg} \gamma_1 > \operatorname{tg} \gamma_1$ ), хотя значение  $LM$  не изменяется. В этом случае дальнейший подъем гипотенузы означает значительное увеличение диффундирующего через остальные слои водяного пара и тем самым образование зоны конденсации между плоскостями с температурами  $\pm 0^\circ$  и  $18^\circ\text{C}$ . При этом отношение количества диффундирующего к зоне и из зоны конденсации водяного пара соответствует отношению  $\operatorname{tg} \gamma_1$  к  $\operatorname{tg} \gamma_1$ .

Если продолжить гипотенузу, т.е. касательную к кривой  $p_{нас}$  треугольника первого (со штрихом) слоя, вниз, получим точку ее пересечения с линиями температур  $+16^\circ$  и  $+8^\circ\text{C}$ . Если вспомогательные основания треугольника первого (со штрихом) слоя находятся на высоте этих точек пересечения, получим два вспомогательных треугольника, касательные которых остаются неизменными. Особенно отчетливо видна точка пересечения с линией температуры  $+8^\circ\text{C}$ . Самый из вспомогательных треугольников позволяет наи-

более точно определить длину противолежащего катета и, следовательно, значение  $\operatorname{tg} \gamma_1$ . Длина основания, кроме того, определяется расстоянием между линиями температур. Таким образом, построение вспомогательного треугольника может существенно повысить точность графического определения подъема гипотенузы.

Диффузионный расчет выполняют следующим образом. Выход водяного пара равен  $g_{вых} = (1073 - 488)/(0,8 \cdot 1502) = 0,487$  г/(м<sup>2</sup> · ч),  $\operatorname{tg} \gamma_3 = (1073 - 488)/800 = 0,731$  ( $\operatorname{tg} \gamma_3 = \operatorname{tg} \gamma_1$ );  $\operatorname{tg} \gamma_1 = (2827 - 791)/1600 = 1,273$  (большой вспомогательный треугольник). Приток водяного пара равен  $g_{приток} = 0,848$  г/(м<sup>2</sup> · ч).

Поскольку корректировка значения  $N$  не была выполнена, определенное количество притока пара будет несколько ниже фактического притока. Последний определяют из следующего уравнения:  $g_{приток} = (2827 - 2063)/(0,6 \cdot 1431) = 0,89$  г/(м<sup>2</sup> · ч). При скорректированном значении  $N$  получим  $g_{приток} = 0,848 \cdot 1502/1431 = 0,89$  г/(м<sup>2</sup> · ч).

Таким образом, корректировка значения  $N$  дает точное совпадение результата с фактическим значением. Разница на 0,042 г/(м<sup>2</sup> · ч) соответствует превышению расчетного значения над фактическим на 4,7%.

При относительной влажности с теплой стороны стены 86,6% накопление конденсата составляет 0,89 - 0,487 = 0,403 г/(м<sup>2</sup> · ч). Обращает на себя внимание необычно большое количество конденсата, которое может выпасть за один месяц:  $720 - 0,403 = 290$  г/м<sup>2</sup>.

Если при построении первоначальных треугольников слоев от первого до третьего вместо прямых использовать криволинейные касательные, форма которых повторяет форму соседней пунктирной линии градиента давления пара, противолежащие катеты треугольников второго и первого слоев будут несколько короче вследствие этого немного уменьшатся также значения тангенсов углов  $\gamma_2$  и  $\gamma_1$ , т.е.  $\operatorname{tg} \gamma_2$  и  $\operatorname{tg} \gamma_1$ . Если гипотенузу вспомогательного треугольника построить с помощью криволинейной касательной, противолежащие катеты несколько удлинятся и соответственно  $\operatorname{tg} \gamma_1$  будет иметь более высокое значение. Вследствие измененного отношения тангенсов результат первого расчета притока водяного пара будет больше и при более точном вычерчивании значения  $g_{приток}$  окажется равным 0,89 г/(м<sup>2</sup> · ч). Корректировка значения  $N$  будет излишней.

Таким образом, речь идет о правиле, согласно которому при применении криволинейных касательных отношения катетов можно определять только для треугольников равных слоев. Применение прямых касательных ничем не ограничивает выбор базового треугольника, потому что для достижения точного результата должна быть предпринята корректировка значения  $N$ .

Но если заменить первый и второй слои на слой с равным коэффициентом теплопроводности, но лишь на половину большим коэффициентом сопротивления диффузии, тогда сопротивление диффузии также изменится на половину первоначального значения.  $2 \times 0,8 = 1,6$  м, которое соответствует еще сопротивлению диффузии третьего слоя ( $\operatorname{tg} \gamma_{нов} = 0,5 \operatorname{tg} \gamma_3$ ). Это действительно также для отношения соответствующих значений  $LM$ .

Спроецированная на линию температуры  $+25,5^\circ\text{C}$ , вершина нового треугольника дает значение относительной влажности 50,8%. При таких условиях микроклимата с теплой стороны ограждения - с учетом корректировки значения  $N$  — приток водяного пара соответствовал бы выходу водяного пара. В действительности приток будет несколько выше выхода, и в зоне границы второго и третьего слоев это постепенно приведет к образованию конденсата.

Отношение разности количеств пара к количеству

удаляемого конденсата можно определить из отношения разности значений  $N$  к значению  $N$  с теплой стороны. Оно составляет, таким образом,  $(1502 - 1451)/1451 = 0,0351 = 3,51\%$ . Наиболее надежное значение  $N$  можно определить или интерполировать на половине длины основания треугольника.

Первоначальный диффузионный расчет показал значение выхода водяного пара  $g_{вых} = 0,487 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Так как относительно третьего слоя ничего не изменилось, это значение также остается действительным. Разность количеств пара становится равной  $0,0351 \cdot 0,487 = 0,017 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Такое же значение разности получили бы и в прежнем примере, так как отношение значений  $N$  так же не изменилось.

При повышении значения относительной влажности воздуха на теплой стороне до 86,6%, необходимо построить новый треугольник первого (со штрихом) слоя, который будет точно соответствовать прежнему треугольнику первого (со штрихом) слоя. Но так как коэффициент сопротивления диффузии теперь лишь вдвое меньше, чем у остальных слоев, расположенных с теплой стороны зоны конденсации, это приведет к удвоению притока водяного пара против прежнего расчета диффузии, потому что произведение  $\mu d$  стоит в знаменателе.

Отношение  $\text{tg } \gamma_1 / \text{tg } \gamma_2$  будет равно  $1,273/0,731 = 1,741$ . Если относительная влажность с теплой стороны составляет 86,6%, то для определения притока водяного пара  $g_{прит}$ , равного  $0,848 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , это значение следует умножить на значение выхода водяного пара  $g_{вых}$ , равное  $0,487$ . При этом корректировка значения  $N$  не учитывается.

Отношение  $\text{tg } \gamma_1 \cdot N \cdot A \cdot g \cdot \gamma_{нас}$  увеличивается до  $2 \cdot 1,741 = 3,482$ , потому что  $\text{tg } \gamma_{нас} = 0,5 \text{ tg } \gamma_1$ . Приток водяного пара повышается до  $3,482 \cdot 0,487 = 1,696 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , т.е. при относительной влажности 86,6% становится вдвое больше первоначального значения. Результат перекрывается по причинам, изложенным выше.

Применение метода треугольников показывает, что отношение расчетного подъема гипотенузы к фактическому ее подъему, умноженное на выход водяного пара через холодную сторону, дает приток водяного пара с теплой стороны. При этом под расчетным понимают подъем гипотенузы до фактического уровня парциального давления на теплой стороне, а под фактическим - наоборот, подъем до фактического уровня  $p$ , при котором выпадения конденсата еще не происходит.

Свободное пространство выше кривой  $p_{нас}$  дает возможность определить температуры на поверхностях и на границах слоев. Чтобы найти точки пересечения с искомыми линиями температур поверхностей конструкции и границ слоев, нужно значение сопротивлений теплопередаче  $1/k$  нанести на наклонную прямую, конечные точки которой лежат на линиях температур внутреннего и наружного воздуха, а длина соответствует численному значению сопротивления теплопередаче (применив подходящий масштаб треугольника). Для этого прямую следует разделить лишь в отношении сопротивлений теплопередаче и теплоотдаче. Этот метод может во многих случаях заменить расчет градиента температур и сократить время исследования. Точность при этом едва ли пострадает. Знание отдельных значений градиента только тогда является преимуществом, когда приходится работать со многими вариантами значений общего градиента

**3.11. Построение треугольника с помощью криволинейной касательной.** Основой дальнейших диффузионных расчетов служат содержащиеся на рабочих графиках (рис. 31) линии градиентов парциальных давлений, которые обозначены номерами 1, 2 и 3.

*Расчет для линии 1.* Стена из абсолютно однородного материала имеет толщину  $0,36 \text{ м}$  и коэффициент сопротивления диффузии  $10$ . Сопротивление диффузии

стены составляет, таким образом,  $3,6 \text{ м}$ . Температуры на поверхностях равны: с теплой стороны  $+25^\circ\text{C}$ , с холодной  $-11^\circ\text{C}$ . Температура холодной поверхности соответствует точке пересечения линии градиента парциальных давлений 1 с кривой  $p = 80\%$ . Линия градиента парциального давления 1 может быть непосредственно использована для построения треугольника. Она заменяет собой криволинейную касательную к кривой  $p_{нас}$ , точка касания которых находится на линии температуры  $-5^\circ\text{C}$ .

Точка пересечения линии 1 с линией температуры  $+25^\circ\text{C}$  лежит на высоте  $1390 \text{ Па}$ , т.е. по расчету соответствует относительной влажности  $43,91\%$ , которая является предельной. Во избежание образования конденсата в зоне плоскости с критической температурой  $-5^\circ\text{C}$  (где конденсат превратился бы в лед), это значение нельзя превышать.

Выход водяного пара находим из равенства  $g_{вых} = (402 - 191)/(0,6 \cdot 1556) = 0,2260 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Приток водяного пара равен  $g_{прит} = (1390 - 401)/(3 \cdot 1475) = 0,2233 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Так как приток пара немного меньше, чем выход, относительная влажность не достигает предельного значения. Линия градиента парциального давления 1 проходит, таким образом, ниже линии  $p_{нас}$ .

Если вместо криволинейной использовать прямую касательную, приток водяного пара будет равен  $g_{прит} = (1457 - 402)/(3 \cdot 1475) = 0,2384 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , а значение относительной влажности -  $46,02\%$ , что выше предельной на  $2,1\%$ .

*Расчет для линии 2.* Стена из однородного материала имеет толщину  $0,32 \text{ м}$  и коэффициент сопротивления диффузии  $10 \text{ м}$ . Температуры на поверхностях равны: на теплой стороне  $+29^\circ\text{C}$ , на холодной  $-3^\circ\text{C}$ . Так как температура холодной поверхности соответствует точке пересечения линии градиента парциальных давлений 2 с кривой  $p = 80\%$ , линия 2 может быть непосредственно использована для построения треугольника. Она заменяет собой криволинейную касательную к кривой  $p_{нас}$ , точка касания которых находится на линии температур  $+5^\circ\text{C}$ .

Точка пересечения линии градиента температуры  $+29^\circ\text{C}$  лежит на высоте  $2280 \text{ Па}$ , т.е. по расчету соответствует относительной влажности  $56,94\%$ , которая является предельной. Во избежание образования конденсата в зоне плоскости с критической температурой  $+5^\circ\text{C}$  это значение нельзя превышать.

Выход водяного пара находим из равенства  $g_{вых} = (872 - 381)/(0,8 \cdot 1515) = 0,4051 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Приток водяного пара равен  $g_{прит} = (2280 - 872)/(2,4 \cdot 1447) = 0,4054 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Относительная влажность воздуха достигает предельного значения, поскольку в исследуемой точке линия градиента парциального давления 2 не имеет никакого резерва.

Применение прямой касательной дает точку Пересечения линии температуры  $+29^\circ\text{C}$  на высоте  $2345 \text{ Па}$ , что по расчету соответствует относительной влажности  $58,57\%$ . При этом приток водяного пара будет равен  $g_{прит} = (2345 - 872)/(2,4 \cdot 1447) = 0,4242 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Превышение предельного значения относительной влажности воздуха составит примерно  $1,6\%$ .

*Расчет для линии 3.* Стена из однородного материала имеет толщину  $0,165 \text{ м}$  и характеризуется коэффициентом сопротивления диффузии  $10$ . Сопротивление диффузии составляет, таким образом,  $1,65 \text{ м}$ . Температуры на поверхностях равны: на теплой стороне  $+23,25^\circ\text{C}$ , на холодной —  $+6,75^\circ\text{C}$ . Так как температура холодной поверхности соответствует точке пересечения линии парциальных давлений 3 с кривой  $p = 80\%$ , линия 3 может быть непосредственно использована для построения треугольника, Она заменяет собой криволинейную касательную к кривой  $p_{нас}$  точка соприкосновения которых находится на линии температуры  $+15^\circ\text{C}$ .

ДИФФУЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

Рабочие графики для применения "Метода треугольников"

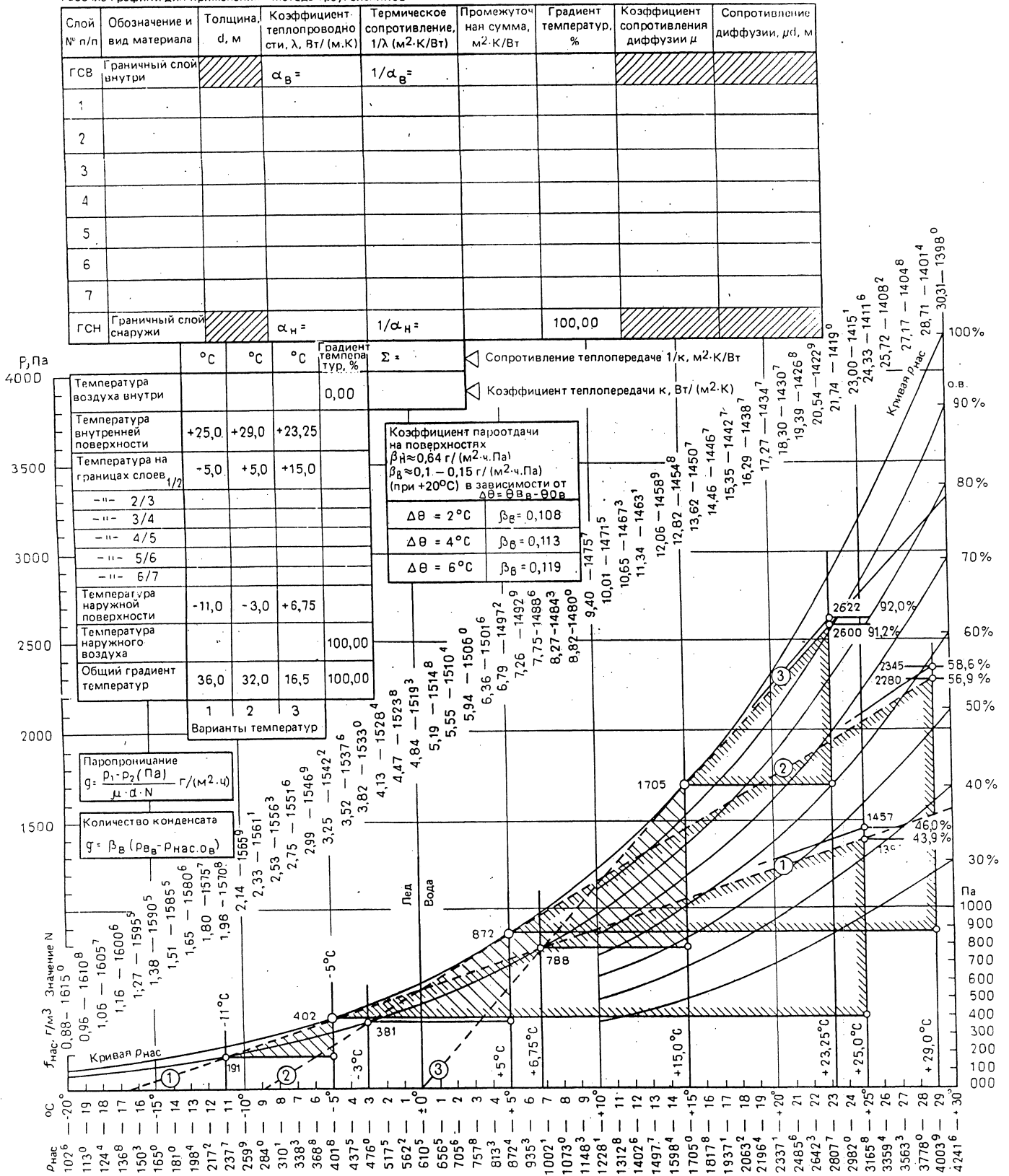


Рис. 31

Точка пересечения линии 3 с линией температуры +23,25°C, лежит на высоте 2600 Па, т.е. по расчету соответствует относительной влажности 91,19%, которая является предельной. Для того чтобы избежать образования конденсата в зоне плоскости с критической температурой +15°C, это значение нельзя превышать.

Выход водяного пара находим из равенства  $g_{вых} = (1705 - 788)/(0,825 \cdot 1472) = 0,7551 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Приток водяного пара равен  $g_{приток} = (2600 - 1705)/(0,825 \times 1438) = 0,7544 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Относительная влажность достигает предельного значения, поскольку в исследуемом месте линия 3 не имеет практически никакого резерва.

Применение прямой касательной дает точку пересечения линии температуры +23,25°C на высоте 2622 Па, что по расчету соответствует относительной влажности 91,96%. При этом приток водяного пара будет равен  $g_{приток} = (2622 - 1705)/(0,825 \cdot 1438) = 0,773 \text{ г}/(\text{м}^2 \times \text{ч})$ . Превышение предельного значения относительной влажности составило 0,8%.

Если провести исследование при других температурах на поверхности теплой стороны, можно получить примерно такой же результат.

Если вершина треугольника теплой стороны лежит на линии градиента парциальных давлений, приток водяного пара соответствует его выходу, уровень вершины треугольника - предельному значению относительной влажности воздуха для стационарного режима влагопереноса. Если фактическое значение относительной влажности превышает предельное значение, то приток водяного пара превышает его выход и это приводит к образованию ядра конденсации. При этом предполагается, что перенос водяного пара также происходит в стационарном режиме и что материал является однородным.

Предельное значение влажности для любой температуры поверхности холодной стороны лежит на криволинейной касательной, форма которой повторяет форму соседней линии градиента парциальных давлений. Искомое значение может быть прочитано в точке пересечения криволинейной касательной с линией температуры теплой поверхности или установлено путем интерполя-

ции. В сомнительном случае должна быть принята линия градиента парциальных давлений, имеющая большую кривизну. Если в распоряжении пользователя нет подходящего криволинейного шаблона, можно нанести необходимую кривую на кальку и использовать ее в качестве шаблона.

Если нужно определить предельную влажность воздуха на теплой стороне, температура которого практически почти во всех случаях выше температуры внутренней поверхности, точку пересечения криволинейной касательной с линией температуры поверхности проецируют на линию температуры внутреннего воздуха, где искомое значение может быть либо прочтено, либо определено путем интерполяции. В этом случае получается меньшее значение. Если вместо криволинейной использовать прямую касательную, точка пересечения будет располагаться выше и даст значение относительной влажности, превышающее предельное значение. Контрольные расчеты, проведенные для трех линий градиентов парциальных давлений, дают превышение предельных значений относительной влажности от 1 до 2%. Разность по отношению к предельному значению тем больше чем больше градиент температур. Разумеется, можно работать и с прямолинейными касательными, но в этом случае необходима последующая корректировка полученных значений относительной влажности. Так как относительная влажность наружного воздуха в среднем за год не всегда достигает установленного в рабочих графиках значения 80%, результаты определения предельных влажностей и баланса влаги создают некоторый запас. Для проведения более точных расчетов следует оперировать среднемесячными значениями влажности наружного воздуха и отказаться от применения направляющих кривых.

Подводя итоги, следует констатировать, что *метод треугольников* отвечает всем требованиям расчетов по диффузии и конденсации водяного пара; его главными преимуществами являются простота, ясность и наглядность, а также прямая связь с расчетами теплопередачи. Точность результатов зависит лишь от соответствия расчетных данных фактическим для тех или иных материалов.

*Приложение. Данные о важнейших строительных материалах  
для расчетов по строительной физике (взяты из работ по нормированию,  
связанных с подготовкой к новому изданию DIN 4108)*

№ п.п.	Название	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	Коэффициент сопротивления диффузии $\mu$	Значение $\frac{LM}{\lambda\mu}$
1.	<b>Штукатурка, стяжка</b>				
1.1.	Известковый раствор, цементно-известковый раствор	1800	0,87	15	13
1.2.	Цементный раствор	2000	1,4	25	35
1.3.	Известково-гипсовый раствор, гипсовый раствор, ангидритовый раствор	1400	0,7	10	7
1.4.	Гипсовая штукатурка без заполнителя	1200	0,35	6	2,1
1.5.	Ангидритовая стяжка	2200	0,7	12	8,4
1.6.	Цементная стяжка	2200	2	35	70
1.7.	Магнезиальная стяжка:				
1.7.1.	Основа под полы, подстилающие слои	1400	0,47	10	4,7
1.7.2.	Сборные плиты для полов, верхний слой	1600	0,7	15	10
2.	<b>Большеразмерные конструкции</b>				
2.1.	Обычный бетон (бетон на гравии или щебне с закнутой структурой), железобетон	2400	2,04	110	224
2.2.	Легкий бетон пористой структуры:	1600	0,81	12	9,7
2.2.1.	на плотном заполнителе, например гравии	1800	1,1	14	15
		2000	1,4	16	22
2.2.2.	на пористом заполнителе, без применения кварцевого песка	600	0,23	3	0,7
		700	0,27	4	1,1
		800	0,29	5	1,4
		1000	0,35	6	2,1
		1200	0,47	8	3,8
		1400	0,58	10	5,8
		1600	0,76	12	9,1
		1800	0,93	14	13
		2000	1,1	16	18
2.3.	Легкий бетон и железобетон плотной структуры:				
2.3.1.	с пористыми заполнителями	1000	0,47	9	4,2
		1200	0,59	12	7,1
		1400	0,72	15	11
		1600	0,87	18	16
		1800	0,99	21	21
		2000	1,2	24	29
2.3.2.	с заполнителями из керамзита, натуральной пемзы и вулканической лавы, без использования кварцевого песка	800	0,3	5	1,5
		900	0,35	6	2,1
		1000	0,38	7	2,7
		1100	0,44	8	3,5
		1200	0,5	9	4,5
		1300	0,56	10	5,6
		1400	0,62	11	6,8
		1500	0,67	12	8
		1600	0,73	13	9,5
2.4.	Газобетон автоклавного твердения (DIN)	400	0,14	3	0,4
		500	0,16	4	0,6
		600	0,19	5	0,9
		700	0,21	6	1,3
		800	0,23	7	1,6
3.	<b>Панели</b>				
3.1.	Стеновые панели из легкого бетона (DIN 18 162)	800	0,29	9	2,6
		900	0,32	10	3,2
		1000	0,35	11	3,8
		1200	0,47	13	6,1
		1400	0,58	15	8,7
3.2.	Панели из газобетона неармированные, с нормальной толщиной швов (DIN 4166)	500	0,22	6	1,3
		600	0,24	7	1,7
		700	0,27	8	2,2
		800	0,29	9	2,6
3.3.	Стеновые панели из гипса также с порами, пустотами или пористыми заполнителями (DIN 180163)	600	0,29	3	0,9
		750	0,35	4	1,4
		900	0,41	5	2
		1000	0,47	7	3,3
		1200	0,58	9	5,2
3.4.	Гипсокартонные плиты (DIN 18 180)	900	0,21	8	1,7
3.5.	Асбестоцементные плиты (DIN 274)	2000	0,58	50	29
4.	<b>Кладка с растворными швами</b>				
4.1.	Кладка из строительного кирпича (DIN 105)				
4.1.1.	Полнотелый клинкерный кирпич	2000	1,05	100	105
4.1.2.	Пустотелый клинкерный кирпич с вертикальными пустотами	1800	0,79	70	55
4.1.3.	Кирпичи: полнотелый, пустотелый, пористый и высокопрочный	600	0,35	5	1,7
		700	0,38	6	2,3
		800	0,41	7	2,9
		1000	0,47	8	3,8
		1200	0,52	9	4,7

№ п.п.	Название	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	Коэффициент сопротивления диффузии $\mu$	Значение $LM$ $\lambda\mu$		
4.2	Кладка из силикатного кирпича (DIN 106)	1400	0,6	10	6		
		1600	0,7	10	7		
		1800	0,79	11	8,7		
		2000	1,05	13	14		
		1000	0,5	8	4		
		1200	0,56	9	5		
		1400	0,7	10	7		
		1600	0,79	12	9,5		
		1800	0,99	15	15		
		2000	1,1	24	26		
4.3	Кладка из шлакоблоков (DIN 398)	1000	0,47	9	4,2		
		1200	0,52	10	5,2		
		1400	0,58	11	6,4		
		1600	0,64	13	8,3		
		1800	0,7	15	10		
		2000	0,76	18	14		
4.4	Кладка из бетонных камней	-	-	-	-		
4.4.1.	Пустотелые камни из легкого бетона (DIN 18 149)	600	0,35	3	1		
		700	0,4	4	1,6		
		800	0,47	5	2,3		
		900	0,56	6	3,4		
		1000	0,65	7	4,5		
		1200	0,77	8	6,2		
		1400	0,91	9	8,2		
		1600	1,05	9	9,4		
4.4.2.	Пустотелые блоки из легкого бетона (DIN 18151) с пористыми добавками, без кварцевого песка						
4.4.2.1	Камни толщиной d ≤ 240 мм d ≤ 300 мм d ≤ 365 мм	500	0,3	3	0,9		
		600	0,33	3	1		
		700	0,36	4	1,4		
		800	0,4	5	2		
		900	0,45	6	2,7		
		1000	0,52	6	3,1		
		1200	0,61	7	4,3		
		1400	0,73	8	5,8		
4.4.2.2	Камни толщиной d ≤ 300 мм d ≤ 365 мм	500	0,3	3	0,9		
		600	0,35	4	1,4		
		700	0,4	5	2		
		800	0,47	6	2,8		
		900	0,56	6	3,4		
		1000	0,65	7	4,5		
		1200	0,77	8	6,2		
		1400	0,91	9	8,2		
4.4.3.	Полнотелые камни из легкого бетона (DIN 18 152)						
4.4.3.1	Полнотелые камни	500	0,33	4	1,3		
		600	0,35	4	1,4		
		700	0,38	5	1,9		
		800	0,41	6	2,5		
		900	0,44	7	3,1		
		1000	0,47	8	3,8		
		1200	0,52	9	4,7		
		1400	0,64	9	5,8		
		1600	0,79	10	7,9		
		1800	0,88	12	11		
		2000	1,05	14	15		
		4.4.3.2	Полнотелые блоки	500	0,3	3	0,9
				600	0,33	4	0,3
700	0,36			5	1,8		
800	0,41			6	2,5		
900	0,44			7	3,1		
1000	0,47			8	3,8		
1200	0,52			9	4,7		
1400	0,64			9	5,8		
1600	0,79			10	7,9		
1800	0,88			12	11		
2000	1,05			14	15		
4.4.4.	Пустотелые блоки, Т-образные пустотелые Камни из обычного бетона плотной структуры (DIN 18 153)						
4.4.4.1	Камни толщиной d ≤ 240 мм d ≤ 300 мм d ≤ 365 мм			≤1800	0,92	15	14
4.4.4.2	Камни толщной 300 мм 365 мм	≤1800	1,28	18	23		
44							

№ п.п.	Название	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	Коэффициент сопротивления диффузии $\mu$	Значение $\frac{LM}{\lambda\mu}$
4.5.	Кладка из газобетонных блоков (DIN 4 165)	500 600 700 800	0,22 0,24 0,27 0,29	6 7 8 9	1,3 1,7 2,2 2,6
5	<b>Теплоизоляционные материалы</b>				
5.1.	На базе минерального и растительного волокна (DIN 18 165)				
	Группа проводимости				
	035	От 8 до 500	0,035	1,1	0,04
	040		0,04	1,2	0,05
	045		0,045	1,3	0,06
	050		0,05	1,4	0,07
5.2.	На основе пробки, пробковые плиты (DIN 18 161)				
	Группа проводимости				
	045	От 80 до 500	0,045	20	0,9
	050		0,05	25	1,2
	055		0,055	30	1,6
5.3.	Пенопласты (DIN 18 164)				
5.3.1.	Жесткий пенополистирол				
	Группа проводимости		0,041	37	1,5
	030		0,03	50	1,5
	035		0,035	43	1,5
	040		0,04	38	1,5
	Мягкий пенополистирол	≥ 15 ≥20 ≥30 ≥25		40 45 50	
5.3.2.	Экструдированный пенополистирол		0,035	120	4,2
	Жесткий пенополиуретан, плиты (DIN 18 164):		0,035	35	1,2
	плиты, расположенные между проницаемыми слоями покрытия		0,029	∞	
	группа проводимости				
	025		0,025		
	030	≥30	0,03		
	035		0,035		
5.3.3.	Жесткий пенопласт на основе фенольной смолы		0,041	40	1,6
	группа проводимости				
	035		0,035		
	040		0,04		
5.4.	Пенопласты, вспученные в конструкции (DIN 18 159)				
5.4.1.	Пенополиуретан	≥30	0,03	30	0,9
5.4.2.	Пенопласт на основе мочевинофенолоформальдегидной смолы	≥10	0,04	3	0,12
5.5.	Пеностекло (DIN 18 174)				
	То же, тип Т-2		0,055	∞	
	группа проводимости				
	050	От 110	0,05	∞	
	055	до 150	0,055	∞	
	060		0,06	∞	
5.6.	Легкие строительные плиты из древесной шерсти (DIN 1 101)	От 400 до 60	0,093	5	0,46
5.7.	Многослойные легкие строительные плиты (DIN 1 104)		0,041	15	0,062
6.	<b>Дерево и древесные материалы</b>				
6.1.	Натуральное дерево				
6.1.1.	Дуб	800	0,21	60	12,6
6.1.2.	Бук	800	0,17	50	8,5
6.1.3.	Ель, пихта, сосна	600	0,14	70	9,8
6.2.	Древесные материалы				
6.2.1.	Клееная фанера (DIN 68 705)	600	0,14	70	9,8
6.2.2.	Древесно-стружечные плиты				
6.2.2.1.	Плоские прессованные плиты (DIN 68 763)	700	0,14	70	9,8
6.2.2.2.	Экструзионные плиты (DIN 68 764)	700	0,17	70	11,9
6.2.3.	Древесно-волокнистые плиты (DIN 68 750)				
6.2.3.1.	твердые	1000	0,17	60	10,2
6.2.3.2.	мягкие	200 300	0,047 0,058	4 5	0,19 0,29
7.	<b>Облицовочные и герметизирующие материалы</b>				
7.1.	Покрытия полов				
7.1.1.	Линолеум (DIN 18 171)	1000	0,17		
7.1.2.	Линолеум с высоким содержанием пробковой муки (DIN 18 172)	700	0,081		
7.1.3.	Двухслойное линолеумное покрытие (DIN 28 173)	1000	0,12		
7.1.4.	Полимерные покрытия пола	1500	0,23	30 000	6 900



№ п.п.	Название	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	Коэффициент сопротивления диффузии $\mu$	Значение $\frac{LM}{\mu}$
7.2.	Герметизирующие материалы				
7.2.1.	Асфальт	2000	0,7	20 000	14 000
7.2.2.	Битум	1200	0,17	50 000	8 500
7.2.3.	Кровельные картон и гидроизоляционный материал (листовой или рулонный)				
7.2.3.1.	Строительный картон (DIN 52 129)	1200	0,17	2 500	425
7.2.3.2.	Кровельный картон (DIN 52 128)	1200	0,17	15 000	2 550
7.2.4.	Пленки и рулонная гидроизоляция из пластмасс (термопласт и эластомеры)				
7.2.4.1.	Поливинилхлорид (ПВХ)	1300	0,16	20 000	3 200
7.2.4.2.	Полиэтилен хлорированный (ПЭХ)	1300	0,18	30 000	5 400
7.2.4.3.	Полиизобутилен (ПИБ)	1600	0,3	260 000	78 000
7.2.4.4.	Этилен-сополимеризат-битум (ЭКБ)	1050	0,16	50 000	8 000
7.2.4.5.	Бутилкаучук (БК)	1100	0,3	500 000	150 000
7.2.4.6.	Полихлоропрен (ПХО)	1500	0,4	45 000	18 000
7.2.4.7.	Сульфохлорированный полиэтилен (СХПЭ)	1400	0,35	55 000	19 250
7.2.4.8.	Этилено-пропиленовый каучук (ЭПК)	1200	0,3	95 000	28 500
7.2.4.9.	Этиленовинилацетат (ЭВА)	1400	0,35	4 000	1 400
8.	<b>Прочие строительные материалы</b>				
8.1.	Засыпки:				
8.1.1.	из пористых материалов				
	вспученный перлит	≤100	0,06	2	0,12
	вермикулит	≤100	0,07	2	0,14
	пробковая крошка	≤200	0,05	3	0,15
	термозит	≤600	0,13	3	0,39
	керамзит, вспученный сланец	≤400	0,16	3	0,48
	пемзовый щебень	1000	0,19	4	0,76
	вулканический туф	1200	0,22	4	0,88
		1500	0,27	5	1,35
8.1.2.	из песка, гравия, щебня	1800	0,7	4	2,8
8.2.	Керамическая плитка	2000	1,05	250	262
8.3.	Стекло	2500	0,81	∞	
8.4.	Естественный камень				
8.4.1.	Кристаллические метаморфические породы (гравий, базальт, мрамор)	2800	3,5	300	1050
8.4.2.	Осадочные горные породы (песчаник, раковистый известняк)	2600	2,3	30	69
8.4.3.	Вулканические пористые горные породы (туфы)	1600	0,53	18	9,5
8.5.	Наружные облицовки из стекломозаики или керамики	2000	1,16	250	290
8.6.	Теплозащитная штукатурка (DIN 18 550)	600	0,2	4	0,8
8.7.	Металлы				
8.7.1.	Сталь, чугун	7850	58	∞	
8.7.2.	Медь	8900	384	∞	
8.7.3.	Алюминий	2700	204	∞	
8.7.4.	Бронза, литейная оловянноцинковая бронза	8700	64	∞	
8.7.5.	Свинец	11300	35	∞	
9.	<b>Покровтия, обладающие свойством уменьшать паропропускание</b>				
9.1.	Окраски				
9.1.1.	Диофан:				
	двухслойное покрытие	0,25		24 000	6
	трехслойное покрытие	0,25		37 000	9,2
9.1.2.	Меламиновая смола	0,2		30 000	6
9.1.3.	Эпоксидная смола:				
	двухслойное покрытие	0,2		60 000	12
	трехслойное покрытие	0,3		70 000	21
9.1.4.	Полиэфирная смола, армированная стекловолокном	1,5		50 000	75
9.1.5.	Терозон Д 843-10	2		25 000	50
9.1.6.	Лак Альберта №1	0,15		110 000	16,5
9.2.	Бумаги и картоны				
9.2.1.	Битумизированная бумага	0,3		3 000	0,9
9.2.2.	Пленка лувитерма (ПВХ)	0,03	0,04	14 000	0,472
9.2.3.	Коропласт, черный (ПВХ)	0,15	0,2	28 000	4,2
9.2.4.	Коротен, черный	0,2	0,22	150 000	30
9.2.5.	Пленка Остафана (политерефталат)	0,04	0,045	140 000	5,6
9.2.6.	Нэпа (пароизоляция)	0,4	0,25	40 000	16
9.2.7.	Вапорекс				
	нормальный	0,8	0,55	4000	3,2
	битумизированный	0,8	0,75	7000	5,6
	битумизированный и с песчаной посыпкой	2,2	2,4	15000	33
	супер, битумизированный с песчаной посыпкой и алюминиевой фольгой 0,1 мм	2,2	2,9	140 000	308
	супер с алюминиевой фольгой толщиной 0,1 мм	0,8	0,75	300 000	240
9.2.8.	Алюминиевая фольга, дублированная	0,025	0,1	700 000	17,5
	То же	0,1	0,3	2 100 000	210

Примечание. Содержащиеся в данной таблице значения коэффициента сопротивления диффузии водяного пара  $\mu$  следует рассматривать как ориентировочные. У отдельных материалов может иметь место значительный разброс опытных значений, величина которого существенно превышает разброс значений коэффициента теплопроводности. От указания недостаточно надежных верхних и нижних предельных значений авторы сознательно отказались.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие	6
Введение	7
ЧАСТЬ I	7
1. Состав атмосферы Земли	7
2. Водяной пар в тропосфере	8
3. Давление насыщенного пара $p_{нас}$	8
4. Абсолютная влажность воздуха $f$	8
5. Относительная влажность воздуха $\varphi$	9
6. Парциальное давление водяного пара $p$	9
7. Точки росы водяного пара $\tau$	10
8. Образование конденсата на поверхностях конструкции	10
9. Диффузия водяного пара в воздухе	11
10. Диффузия водяного пара в пористых материалах	12
11. Конденсация водяного пара в толще однородных конструкций	13
12. Конденсация водяного пара в многослойных конструкциях	14
13. Применение пароизоляции, исключающей проникание пара или уменьшающей его количество	15
14. Влажность строительных материалов	16
15. Капиллярный перенос влаги в строительных конструкциях	17
16. Осмотический перенос влаги в строительных материалах	17
17. Электрокинетический эффект	18
18. Электроосмотическое высушивание строительных конструкций	18
19. Диффузия и конденсация водяного пара под влиянием капиллярного и осмотического переноса влаги	18
ЧАСТЬ II. Новый графический способ определения исходных данных для расчета диффузии и конденсации ("метод треугольников")	19
1. Описание способа	19
2. Расчет паропрооницания через конструкцию	21
3. Примеры применения метода треугольников	21
3.1. Определение допустимой относительной влажности на теплой стороне однородной конструкции	21
3.2. Проверка двухслойной конструкции с расположенным снаружи слоем теплоизоляции на возможность образования конденсата	23
3.3. Определение параметров пароизоляции двухслойной конструкции с расположенным изнутри слоем теплоизоляции	25
3.4. Определение параметров пароизоляции "сэндвич-конструкции"	25
3.5. Определение параметров внутренней пароизоляции трехслойной конструкции	28
3.6. Определение параметров дополнительного слоя пароизоляции трехслойной конструкции	28
3.7. Баланс влаги в однородной конструкции	28
3.8. Упрощенная оценка баланса влаги в однородной конструкции	33
3.9. Упрощенная оценка баланса влаги в многослойной конструкции	35
3.10. Диффузия водяного пара через экспериментальную конструкцию многослойной стены (дополнения к методу треугольника)	37
3.11. Построение треугольника с помощью криволинейной касательной	40
<i>Приложение.</i> Данные о важнейших строительных материалах для расчетов по строительной физике	43

Карл Шпайдель

ДИФфуЗИЯ И КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА  
В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Редакция переводных изданий  
Зав. редакцией Р.Л. Рощина  
Редактор Л.Г. Беглецова  
Младший редактор Е.Г. Ежова  
Технический редактор Н.Е. Поплавская  
Корректор Е.Р. Герасимюк

ИБ № 3467

-----  
Сдано в набор 29.06.84. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная №2. Печать офсетная. Набор  
машинописный. Печ. л. 6. Усл. кр. отт. 6,75. Уч.-изд.л. 7,66 (в т.ч. 0,25 рис. 2 кр.) Тираж 4000 экз.  
Изд. №АУ1-853 Зак.№129 Цена 50 коп.  
-----

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам изда-  
тельств, полиграфии и книжной торговли, г. Тула, пр. Ленина, 109