

5.6.1

Vah

Х. А. КРУТОБ

**АНАЛИЗ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ
УДЕЛЬНОЙ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ
УВЛАЖНЕНИЯ МАТЕРИАЛА И ВЛИЯНИЯ
ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА**

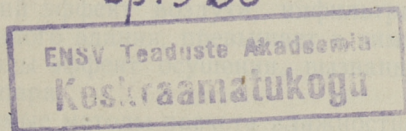
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

Ер. 6.7

Х. А. КРУТОБ

**АНАЛИЗ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ
УДЕЛЬНОЙ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ
УВЛАЖНЕНИЯ МАТЕРИАЛА И ВЛИЯНИЯ
ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА**

Ер. 920



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

АННОТАЦИЯ.

На основе лабораторных и теоретических исследований, а также измерений в натуре, выясняется, каким образом изменение коэффициента диффузии и движение воздуха влияют на влажностный режим ограждения. Предлагается метод учета этих факторов в теоретических расчетах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Удельная паропроницаемость строительных материалов в большой мере зависит от степени их увлажнения и должна быть учтена в расчетах влажностного режима ограждающих конструкций.

2. Интенсивность изменения удельной паропроницаемости $\bar{\mu}$ зависит от материалов и колеблется в пределах от 2 (красный кирпич) до 17 (древесина).

3. Для практических расчетов влажностного режима ограждающих конструкций целесообразно связать величину удельной паропроницаемости материала μ с относительной влажностью воздуха в его порах φ уравнением $\mu = k\varphi^n$, где k и n эмпирические коэффициенты.

4. Измерения влажностей стеновых панелей подтверждают, что учет зависимости удельной паропроницаемости от степени увлажнения дает более близкие совпадения с действительностью, чем расчеты на базе постоянной величины μ .

5. Методы расчета и принципиальный путь анализа влажностного режима ограждающих конструкций с учетом зависимости удельной паропроницаемости от степени увлажнения материала изложены в разделе 3 данной работы.

6. Влажностный режим ограждающих конструкций в сильной мере зависит от движения воздуха, и расчеты, учитывающие только законы диффузии, не могут дать правильного результата.

7. Осушающий эффект воздуха, инфильтрирующегося через стены жилого здания, превышает в зимний и даже весенний периоды эффект осушения, вызванного диффузией водяного пара.

8. Предлагаемые методы расчета влажностного режима с учетом влияния инфильтрации воздуха изложены в разделе 5 данной работы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование и внедрение новейших эффективных стеновых материалов и конструкций является одной из наиболее важных среди задач, поставленных перед строителями-проектировщиками быстрым ростом нашей строительной промышленности.

Проектирование таких конструкций требует анализа тепловлажностных режимов ограждающих конструкций, дающих наиболее правильные представления о работе конструкции в бытовых условиях. Результаты таких анализов, хорошо отражающие физическую действительность, позволяют заранее оценить эксплуатационные качества тех или иных новых конструкций, о которых отсутствуют данные многолетних наблюдений.

По сравнению с методами анализа теплового режима ограждающих конструкций, которые можно считать довольно усовершенствованными, существующие методы анализа влажностного режима являются еще мало развитыми. Часто встречаются случаи, где результаты теоретического анализа несходны или даже противоположны практическому опыту. В большинстве случаев влажность материалов в ограждающих конструкциях остается меньше расчетной. Особенно заметные расхождения наблюдаются при анализе влажностного режима ограждающих конструкций так называемым методом стационарного режима. Все это свидетельствует о необходимости усовершенствования методов расчета влажностного режима ограждающих конструкций зданий.

Физически правильно описывается перенос влаги в строительных материалах введенными А. В. Лыковым понятиями «влагопроводность» и «термовлагопроводность». Влагопроводность охватывает явления переноса влаги в материале в виде пара и жидкости при наличии градиента влажности, термовлагопроводность — переноса влаги в виде пара и жидкости при наличии температурного градиента. Соответствующие коэффициенты зависят

от температуры и в большей мере от влажности материала. В ограждающих конструкциях часто встречаются случаи, когда в некоторых зонах конструкции поток влаги идет в противоположных направлениях, а в других зонах в одном направлении. Изменчивость коэффициентов влагопроводности и термовлагопроводности, и вообще наличие двух таких коэффициентов переноса влаги, делает практические анализы влажностных режимов ограждающих конструкций очень трудоемкими и сложными. При низких влажностях материалов (в пределах сорбционных влажностей) перенос влаги довольно хорошо описывается и понятием паропроницаемости. В виду удобства метода, применяющего только один коэффициент переноса влаги, он нашел широкое применение в проектной практике.

Значительно усовершенствовал методы анализа влажностного режима ограждающих конструкций канд. техн. наук Ф. В. Ушков, который рационально связал методы стационарного и нестационарного влажностных режимов, и тем самым дал принципиально правильный путь для проведения круглогодичного анализа.

Все существующие методы не учитывают, однако, зависимости удельной паропроницаемости материалов от степени их увлажнения и влияния инфильтрации воздуха на влажностный режим ограждающих конструкций. В настоящей работе излагаются приближенные методы анализа влажностных режимов ограждающих конструкций с учетом этих факторов.

2. УДЕЛЬНАЯ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

По имеющимся представлениям движение влаги в материале происходит (в пределах сорбционного увлажнения), путем диффузии пара из области больших в область меньших парциальных давлений пара в порах материала. При этом жидкость, адсорбированная на поверхность пор, испаряется в зонах больших упругостей паров (над водяной поверхностью), затем диффундируется в виде пара и конденсируется в зонах меньших упругостей. Перенос влаги в материале таким образом происходит в виде пара, путем диффузии пара с одной адсорбированной капли на другую.

Уже давно известен факт увеличения удельной паропроницаемости многих материалов при повышении их влажности. Особенно велико это увеличение в зоне т. н. капиллярной конденсации. Такое явление увеличения удельной паропроницаемости можно теоретически объяснить следующим образом. Диффузия паров, вместе с последовательным конденсированием и испарением с одной сорбированной капли на другую, происходит тем быстрее, чем больше поверхность капель и чем короче расстояние между каплями. Эти капли, сорбированные в наиболее узких местах пор материала, находятся под влиянием больших междумолекулярных сил. Чем толще становится сорбированный слой воды (особенно в зоне капиллярной конденсации), тем слабее связаны молекулы воды сорбционными силами и тем лучше участвуют они в процессе испарения. Последним фактором, в основном, и объясняется увеличение удельной паропроницаемости с повышением степени сорбционного увлажнения материала вообще и в зоне капиллярной конденсации в особенности.

Некоторые экспериментальные данные о зависимости удельной паропроницаемости материалов от степени их увлажнения получены А. С. Эпштейном и В. К. Ганиным. Различные влажности испытываемых материалов при этих опытах были получены при помощи создания различных относительных влажностей воздуха на обеих сторонах образца. Результатом каждого такого опыта является только одна точка в кривой этой зависимости. Автором данной работы проделаны опыты по определению зависимости удельной паропроницаемости от влажности материала путем определения целой кривой этой зависимости непосредственно на основании одного опыта. Для этого был использован цилиндрический образец, установленный на металлическом сосуде, наполненном до половины водой. Образец был замазан с боковой поверхности водо- и паронепроницаемой замазкой. Этот образец был поставлен в специальный шкаф с температурой $+20 (\pm 0,1 - 0,2)^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха $32 (\pm 1)\%$. Путем периодического взвешивания образца (вместе с сосудом) определялось проходившее образец количество водяных паров. После установления стационарного влажностного режима в образце образец был разрезан на 5—8, по возможности равных слоев, перпендикулярно потоку паров. Затем была определена влажность каждого слоя. На осно-

вании влажностей слоев и при помощи изотерма сорбции были определены средние относительные влажности в порах каждого слоя. Далее была определена величина удельной паропроницаемости при относительной влажности в порах материала $\varphi_{\text{ср.}} = \frac{\varphi_n + \varphi_{n+1}}{2}$

$$\mu = \frac{Q}{F E} \cdot \frac{x_n - x_{n-1}}{\varphi_n - \varphi_{n-1}} \cdot \frac{\text{г}}{\text{м час мм рт. ст.}}$$

где Q — количество водяных паров, проходящее через образец в г/час,

F — площадь поперечного сечения образца в м^2 ,

E — максимальная упругость водяного пара при температуре опыта в мм рт. ст.,

x_n — координат центра слоя n в m ,

φ_n — относительная влажность в порах материала, соответствующая влажности n -ого слоя в долях единицы.

Описанный метод определения зависимости удельной паропроницаемости материала от степени его увлажнения (или от относительной влажности воздуха в его порах) имеет следующие преимущества:

1. Возможность построения целой кривой этой зависимости на основании лишь одного опыта.

2. Различия плотностей разных образцов, при однородности каждого образца в отдельности, оказывают влияние только на величины удельных паропроницаемостей, а не на интенсивность возрастания удельной паропроницаемости в зависимости от влажности.

3. Возможность обходить трудноопределяемые сопротивления поверхностей.

Отрицательными качествами этого метода являются:

1. Возможность определять зависимость удельной паропроницаемости от влажности только при относительно однородных материалах, так как определить относительные влажности воздуха в порах материала с изменяемой плотностью, пористостью и химическим составом при помощи изотермы сорбции является практически невозможным.

2. Трудно определить влажности тонких слоев материала, имеющих низкий предел сорбционного увлажнения, так как ошибки взвешивания слоя на аналитических весах

и возможные маленькие потери материала при высушивании слоя до постоянного веса в термостате оказывают большое влияние на достоверность результатов опыта.

Опыты по определению зависимости удельной паропроницаемости от степени сорбционного увлажнения материала проделаны над следующими материалами: древесина (вдоль и поперек волокон), силикатный кирпич, пеносиликальцит и опилки. Результаты опытов изображены в виде графиков на рисунках 1—5. На рисунке 1 дана также кривая зависимости удельной паропроницаемости древесины, полученная А. С. Эпштейном в 1937 г. (кривая 2). На рисунке видно, что результаты А. С. Эпштейна и автора близко совпадают.

Кроме определения зависимости удельной паропроницаемости от степени увлажнения материала в изотермических условиях, для определения той же зависимости при разнице температур между торцами образца проделаны опыты над опилками. Эти опыты были организованы следующим образом: Для создания перепада температуры между торцами образца от $+17$ до $+8^{\circ}\text{C}$ образцы были поставлены на крышке холодильного шкафа. Для создания перепада температуры между торцами образца от -3 до -16°C образцы были установлены на верхней поверхности горизонтального радиатора холодильного шкафа. Вся свободная поверхность крышки и радиатора была покрыта слоем опилок, толщина которого равна высоте цилиндров. Для получения соответствующих образцов были использованы сосуды, изготовленные из парафинированной бумаги в виде строго изолированных закрытых цилиндров диаметром в 4,8 см и длиной 5 см, заполненных опилками определенной влажности. Через определенный промежуток времени (от 20 до 72 часов, в зависимости от начальной влажности опилок и перепада температуры) сосуды открывались и были взяты пробы для определения изменений влажности вдоль оси образца. На основании интенсивности изменения влажности вдоль оси образца (т. е. по направлению перепада температуры) была определена величина удельной паропроницаемости опилок при данной влажности. Для этого были использованы известные формулы метода последовательного увлажнения. При постановке такого опыта были созданы условия для движения водяных паров по направлению перепада температуры, а также (в меньшей степени) про-

Зависимости удельных паропроницаемостей разных материалов от относительной влажности воздуха в их порах

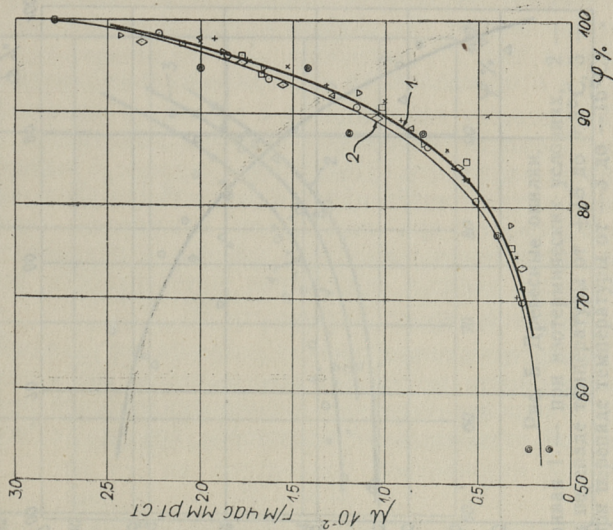


Рис. 1. Древесина поперек волокон.

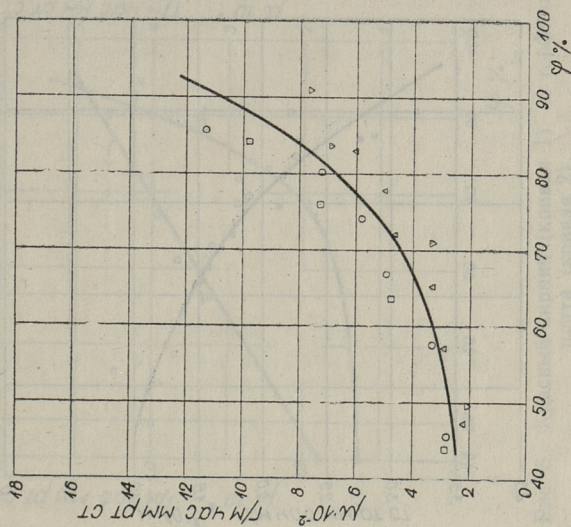


Рис. 2. Древесина вдоль волокон.

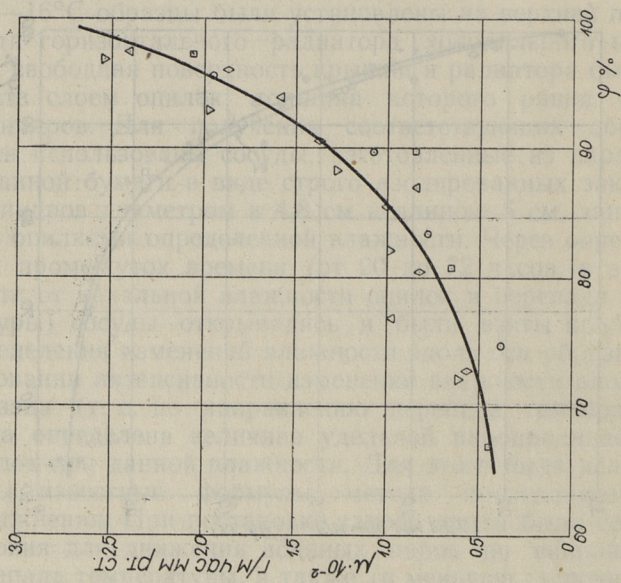


Рис. 3. Силикатный кирпич.

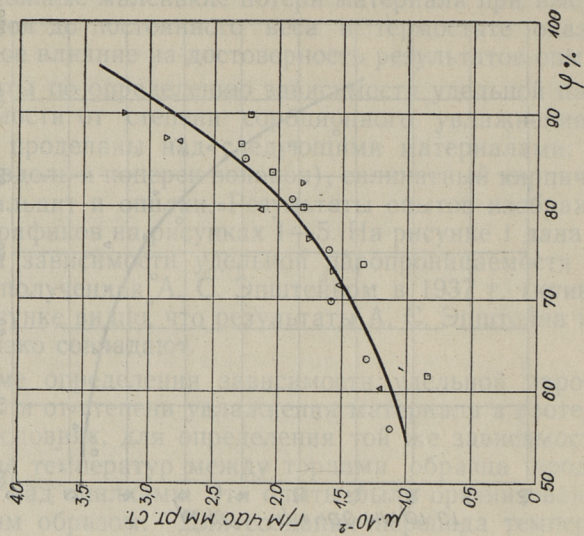


Рис. 4. Пеносиликатцит.

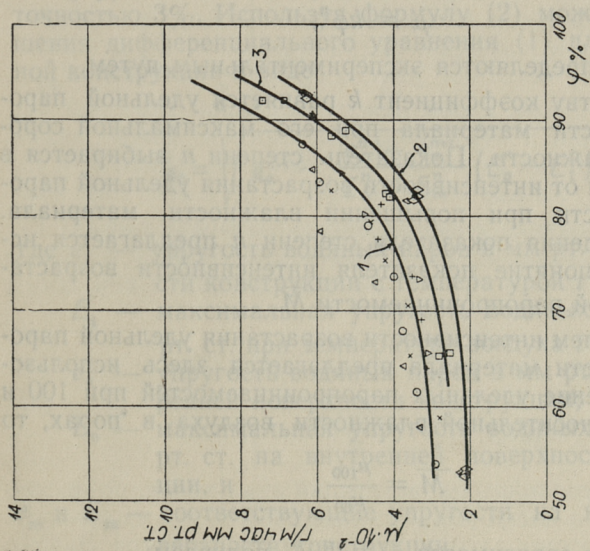


Рис. 5. Древесные опилки.
(кривая 1 — при изотермических условиях, 2 — при перепаде температуры от $+18$ до $+8^{\circ}\text{C}$, 3 — при перепаде температуры от -3 до -16°C).

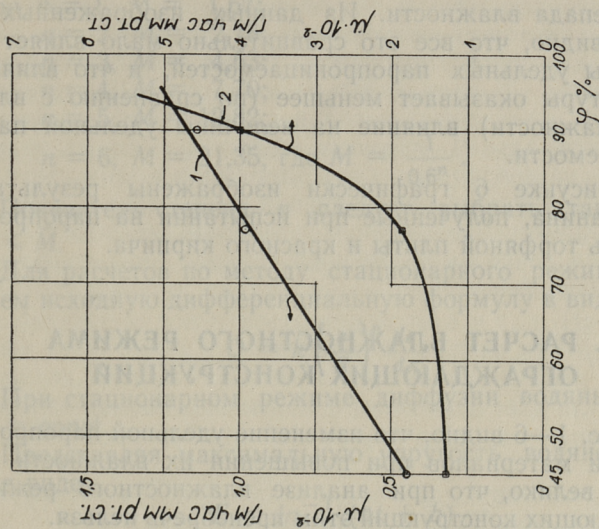


Рис. 6. Красный кирпич (кривая 1) и торфяная плита (кривая 2).

тив перепада влажности. Из данных, изображенных на рис. 5, видно, что все это сравнительно мало влияет на величины удельных паропроницаемостей, и что влияние температуры оказывает меньшее (по сравнению с влиянием влажности) влияние на величины удельной паропроницаемости.

На рисунке 6 графически изображены результаты В. К. Ганина, полученные при испытании на паропроницаемость торфяной плиты и красного кирпича.

3. РАСЧЕТ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Из рис. 1—6 видно, что изменение удельной паропроницаемости материалов при повышении их влажности настолько велико, что при анализе влажностного режима ограждающих конструкций этим пренебречь нельзя.

Для практических расчетов, по мнению автора, целесообразно связать величину удельной паропроницаемости материала с относительной влажностью воздуха в его порах φ уравнением

$$\mu = k\varphi^n,$$

где k и n определяются экспериментальным путем.

По существу коэффициент k равняется удельной паропроницаемости материала при его максимальной сорбционной влажности. Показатель степени n выбирается в зависимости от интенсивности возрастания удельной паропроницаемости при повышении влажности материала. Для нахождения показателя степени n предлагается использовать понятие показателя интенсивности возрастания удельной паропроницаемости $\bar{M}$.

Показателем интенсивности возрастания удельной паропроницаемости материала предлагается здесь использовать отношение удельных паропроницаемостей при 100 и 60%-ной относительной влажности воздуха в порах, то есть

$$\bar{M} = \frac{\mu_{100}}{\mu_{60}}.$$

Используя зависимости $\mu = k\varphi^n$, получаем:

При $n = 1, M = 1,67;$

$n = 2, M = 2,78;$

$n = 3, M = 4,63;$

$n = 4, M = 7,70;$

$n = 5, M = 12,82;$

$n = 6, M = 21,35,$ где $M = \frac{1}{0,6^n}.$

Показатель степени n следует выбрать так, чтобы $M \leq \bar{M}.$

Для расчетов по методу стационарного режима получаем исходную дифференциальную формулу в виде

$$Q = k \left(\frac{e}{E} \right)^n \frac{de}{dx}. \quad (1)$$

При стационарном режиме диффузии водяных паров $Q = \text{const}.$

Представляя максимальную упругость водяного пара E в виде

$$E = \ln^{-1} (at + b), \quad (2)$$

(используя здесь для ясности американское обозначение $\ln^{-1}x = e^x$, где e — основание натуральных логарифмов) возможно найти коэффициенты a и b , удовлетворяющие этому уравнению в определенном участке температур с точностью 3%. Используя формулу (2) можно найти решения дифференциального уравнения (1) для однослойной конструкции в виде

$$e_t = \sqrt[n+1]{e_0^{n+1} - \frac{e_0^{n+1} - e_m^{n+1}}{E_0^n - E_m^n} (E_0^n - E_t^n)} \quad (3)$$

где e_t — упругость водяных паров в мм рт. ст. в плоскости конструкции с температурой t в град.;

E_t — максимальная упругость водяных паров в мм рт. ст. при температуре воздуха t в град.;

e_0 — упругость водяных паров в мм рт. ст. на внутренней поверхности конструкции;

E_0 — максимальная упругость водяных паров в мм рт. ст. на внутренней поверхности конструкции, и

e_m и E_m — соответствующие упругости на наружной поверхности конструкции.

На основании данных, полученных при расчетах стационарных режимов некоторых конструкций точным итерационным методом, можно утверждать, что использование формулы (3) дает довольно точные ($\pm 2\%$) результаты. Если в некоторых слоях конструкции e получается выше максимальной упругости водяных паров E , то это указывает на конденсацию водяных паров в этом сечении ограждения. В таком случае кривая e перестает выражать действительные распределения упругостей водяных паров. Из баланса влаги на внутренней границе зоны конденсации получаем формулу

$$E_{\text{БК}}^{n+1} \left(\frac{n}{n+1} - 1 \right) + E_{\text{БК}} E_0^n = \frac{n}{n+1} e_0^{n+1}. \quad (4)$$

Эта формула дает возможность найти максимальную упругость водяных паров на внутренней границе зоны конденсации.

Для определения упругостей водяных паров на наружной границе зоны конденсации служит формула

$$E_{\text{НК}}^{n+1} \left(1 - \frac{n}{n+1} \right) - E_{\text{НК}} E_m^n = \frac{n}{n+1} e_m^{n+1}. \quad (5)$$

После определения $E_{\text{БК}}$ и $E_{\text{НК}}$ возможно найти действительные упругости водяных паров между внутренней поверхностью и внутренней границей зоны конденсации формулой (3), вставляя вместо e_m и E_m величину $E_{\text{БК}}$. Упругости водяных паров между наружной границей зоны конденсации и наружной поверхностью можно найти также при помощи формулы (3), вставляя вместо e_0 и E_0 величину $E_{\text{НК}}$. Между точками $E_{\text{БК}}$ и $E_{\text{НК}}$ т. е., в зоне конденсации, упругости водяных паров максимальные.

Количество водяных паров, конденсирующихся в толще ограждения, можно найти при помощи известной формулы:

$$q_{\text{конд.}} = kc \left(\frac{dE_{\text{БК}}}{dt} - \frac{dE_{\text{НК}}}{dt} \right) \frac{\tau}{\text{м}^2 \text{ час}}, \quad (6)$$

где $c = \frac{dt}{dx} \frac{\text{град.}}{\text{м}}.$

Расчет многослойных конструкций аналогичен, но прежде всего нужно найти упругости водяных паров на плоскостях, разделяющих слои из различных материалов. Здесь,

для упрощения расчета, является целесообразным выбрать для различных материалов такой расчетный показатель интенсивности возрастания удельной паропроницаемости M , который равняется M материала, преобладающего в конструкции. Тогда легко определить упругости водяных паров на плоскостях, разделяющих слои из различных материалов. Обозначаем внутреннюю поверхность конструкции индексом 0; при двухслойной конструкции плоскость, разделяющую слои, индексом 1 и наружную поверхность индексом 2; при трехслойной конструкции первую плоскость раздела индексом 1, вторую индексом 2 и наружную поверхность индексом 3 и т. д. Из баланса влаги в плоскостях, разделяющих слои из различных материалов, получим для нахождения упругостей паров в этих плоскостях следующие уравнения:

1. При двухслойной конструкции:

$$e_i^{n+1} = \frac{L_1 e_0^{n+1} + L_2 e_2^{n+1}}{L_1 + L_2}, \text{ где } L_i = \frac{k_{i-1,i} c_{i-1,i}}{E_{i-1}^n - E_i^n}. \quad (7)$$

2. При m -слойной конструкции:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_i^{n+1} = \frac{L_1 e_0^{n+1} + L_2 e_2^{n+1}}{L_1 + L_2} \\ e_2^{n+1} = \frac{L_2 e_1^{n+1} + L_3 e_3^{n+1}}{L_2 + L_3} \\ \dots \\ e_{m-1}^{n+1} = \frac{L_{m-1} e_{m-1}^{n+1} + L_m e_m^{n+1}}{L_{m-1} + L_m} \end{array} \right. \quad (8)$$

3. При конструкции с воздушной прослойкой, например, между вторым и третьим материальными слоями (то есть, в слое с индексами 2—3):

$$\left\{ \begin{array}{l} e_i^{n+1} = \frac{L_1 e_0^{n+1} + L_2 e_2^{n+1}}{L_1 + L_2} \\ e_2^{n+1} = \frac{L_2 e_1^{n+1} + L_4 e_4^{n+1}}{L_2 + L_4}, e_2 = e_3 \\ e_4^{n+1} = \frac{L_4 e_3^{n+1} + L_5 e_5^{n+1}}{L_4 + L_5} \\ \dots \end{array} \right. \quad (9)$$

Далее, чтобы найти действительные упругости водяных паров в первом слое, надо в формуле (3) вместо e_m и E_m вставить соответственно e_1 и E_1 ; во втором слое вместо e_0 и E_0 соответственно e_1 и E_1 , и вместо e_m и E_m величины e_2 и E_2 и т. д.

Если конденсация водяных паров происходит на плоскости раздела двух материалов i , количество конденсирующихся водяных паров можно найти формулой

$$q_{\text{конд.}} = \frac{a n}{n+1} \left| L_i (e_{i-1}^{n+1} - E_i^{n+1}) - L_{i+1} (E_i^{n+1} - e_{i+1}^{n+1}) \right| - \frac{\Gamma}{\text{м}^2 \text{ час}} \quad (10)$$

где $a \approx 0,072 \frac{1}{\text{град.}}$.

Предлагаемый расчет стационарного влажностного режима ограждающих конструкций, с учетом зависимости удельной паропроницаемости от влажности, сложнее того же расчета при $\mu = \text{const.}$, но при достаточном навыке использования логарифмов и логарифмической линейки больших затруднений не вызывает.

На рисунках 7 и 8 приведены примеры результатов расчетов стационарных влажностных режимов двух стеновых конструкций. На рис. 7а изображены результаты расчета методом стационарного режима сплошной деревянной стены толщиной 16 см.

$R_{\text{терм.}} = 1,251 \frac{\text{м}^2 \text{ град. час.}}{\text{ккал.}}$; $M = 16,88$; при $n = 5$, $M = 12,82$; $k = 2,05 \cdot 10^{-2} \frac{\text{г}}{\text{м час. мм рт. ст.}}$; $t_{\text{в}} = +18^\circ\text{C}$, $E_{\text{в}} = 15,48 \text{ мм рт. ст.}$, $\varphi_{\text{в}} = 60\%$, $e_{\text{в}} = e_0 = 9,29 \text{ мм рт. ст.}$; $t_{\text{н}} = -14^\circ\text{C}$; $E_{\text{н}} = 1,36 \text{ мм рт. ст.}$, $\varphi_{\text{н}} = 87\%$, $e_{\text{н}} = e_1 = 1,18 \text{ мм рт. ст.}$ При таких условиях конденсации влаги в толще стены не происходит. Расчет существующим до сих пор методом, при $\mu = \text{const.}$, дает конденсацию влаги в размере $0,036 \text{ г/м}^2\text{час}$. При учете зависимости удельной паропроницаемости от степени увлажнения материала средняя влажность конструкции получается меньше, чем при расчете без учета этой зависимости. Так, при первом случае средняя относительная влажность в порах материала стены получается $85,9\%$ ($15,7 \text{ кг}$ влаги в м^2 стены), а во втором случае к началу конденсации $91,7\%$ ($18,6 \text{ кг}$

влаги в м² стены). На рис. 76 изображены результаты анализа влажностного режима той самой стены при наружной температуре —18°С, причем относительные влаж-

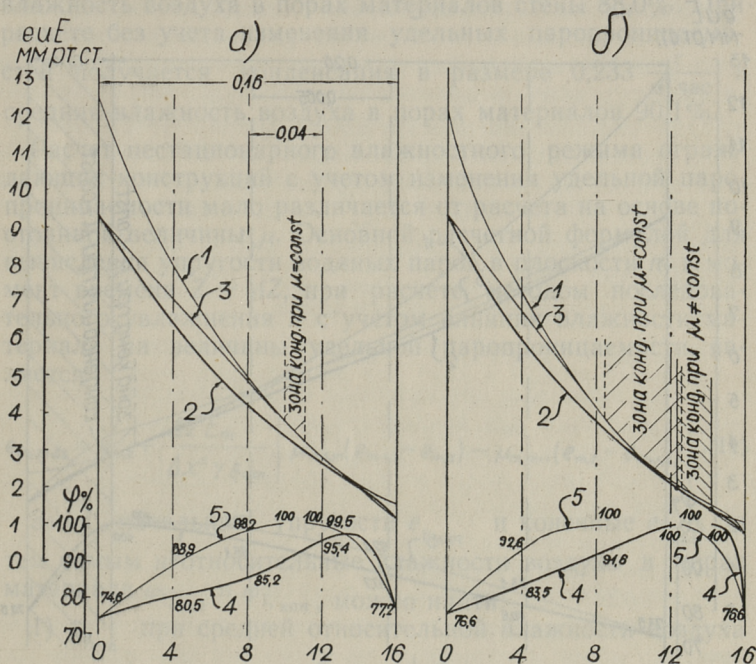


Рис. 7. Схема влажностного режима сплошной деревянной стены (кривая 1 — E , 2 и 4 e и φ при $\mu \neq \text{const.}$, 3 и 5 — e и φ при $\mu = \text{const.}$).

ности внутреннего и наружного воздуха не изменены. Расчет с учетом зависимости удельной паропроницаемости от степени увлажнения материала показывает конденсацию в толще ограждения в размере $0,150 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \text{ час.}}$, средняя относительная влажность воздуха в порах материала стен в начале конденсации равняется 90,3% (17,9 кг влаги в м² стены). Расчет влажностного режима без учета изменения удельной паропроницаемости дает конденсацию в размере $0,179 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \text{ час}}$ и средняя относительная влажность воздуха в порах материала стены в начале конденсации получается в размере 93,8% (20,0 кг влаги в м² стены).

На рис. 8 показаны результаты расчета стационарного влажностного режима стены из пеносиликальцитных стеновых блоков. Общая толщина стены 30 см, толщина пе-

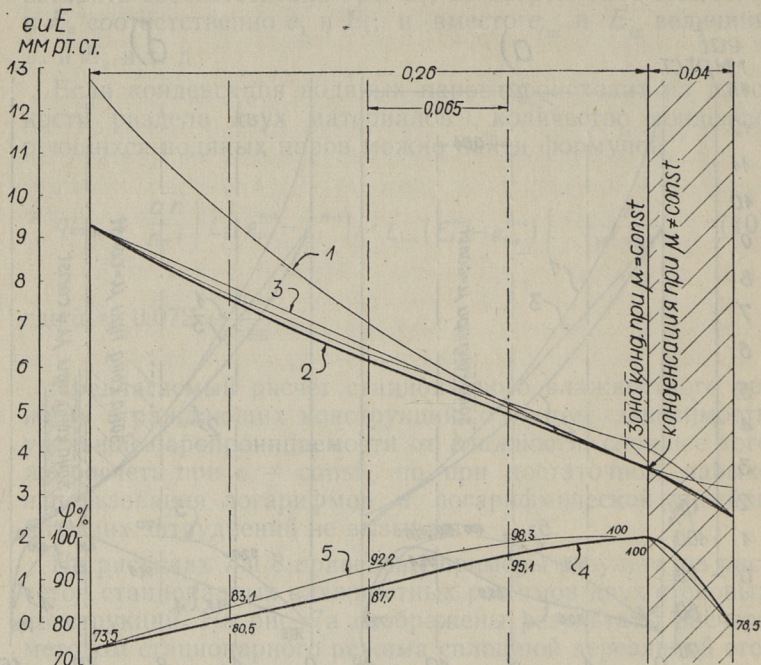


Рис. 8. Схема влажностного режима стены из пеносиликальцитных блоков (кривая 1 — E , 2 и 4 — e и φ при $\mu \neq \text{const}$, 3 и 5 — e и φ при $\mu = \text{const}$).

носиликальцита 26 см и силикатного защитного слоя 4 см.

Для пеносиликальцита $\lambda = 0,35 \frac{\text{ккал}}{\text{м час. град.}}$, для силиката

$\lambda = 0,6 \frac{\text{ккал}}{\text{м час. град.}}$. Условия расчета следующие:

$t_{\text{в}} = +18^\circ\text{C}$ и $\varphi_{\text{в}} = 60\%$; $t_{\text{н}} = -5,8^\circ\text{C}$ и $\varphi_{\text{н}} = 87\%$ (средние для самого холодного месяца в Таллине).

Для пеносиликальцита $\bar{M} = 3,64$ и для силиката $\bar{M} = 7,71$.

При расчете выбрано $M_{\text{общ.}} = 2,78$ (соответственно $n =$

$= 2$), где $k_{\text{силикальц.}} = 3,06 \cdot 10^{-2} \frac{\text{г}}{\text{м час мм рт. ст.}}$ и $k_{\text{силик.}} =$

$= 1,515 \cdot 10^{-2} \frac{\text{г}}{\text{м час мм рт. ст.}}$. Конденсация водяных паров

в плоскости раздела силикальцита и силиката получается по расчету в размере $0,118 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \text{ час}}$ и средняя относительная влажность воздуха в порах материалов стены 88,0%. При расчете без учета изменения удельных паропроницаемостей получается конденсация в размере $0,233 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \text{ час}}$ и средняя влажность воздуха в порах материалов 90,1%.

Расчет нестационарного влажностного режима ограждающих конструкций с учетом изменения удельной паропроницаемости мало различается от расчета на основе постоянной величины μ . Основной расчетной формулой для вычисления упругости водяных паров в плоскости m в момент времени $Z + \Delta Z$, при расчете методом последовательного увлажнения и с учетом влияния влажности материала на величины удельной паропроницаемости, является

$$e_{m,z+\Delta z} = e_{m,z} + \frac{\Delta z E_m}{\Delta x^2 \gamma \xi_{0,m}} \left| \mu_{m-1,m}(e_{m-1,z} - e_{m,z}) - \mu_{m,m+1}(e_{m,z} - e_{m+1,z}) \right|. \quad (11)$$

Зная начальные упругости $e_{i,\text{нач}}$ и конечные $e_{i,\text{кон}}$, а тем самым и относительные влажности воздуха в порах материала $\varphi_{i,\text{нач}}$ и $\varphi_{i,\text{кон}}$, можно найти:

1) $\xi_{0,m}$ при средней относительной влажности воздуха в порах материала $\varphi_m = \frac{\varphi_{m,\text{нач}} + \varphi_{m,\text{кон}}}{2}$,

$$2) \mu_{m-1,m} \text{ при } \varphi_{m-1,m} = \frac{\varphi_{m-1} + \varphi_m}{2}$$

и $\mu_{m,m+1}$ при $\varphi_{m,m+1} = \frac{\varphi_m + \varphi_{m+1}}{2}$. При том φ_{m-1} , φ_m и φ_{m+1} определяются следующим образом:

а) пока кривая e не достигнет среднего положения между начальным и конечным (т. е. стационарным) положениями — на основании начальных упругостей;

б) при продолжении расчета до наступления стационарного режима — на основании конечных упругостей.

Анализ влажностного режима ограждающих конструкций следует проводить следующим образом. Сначала определяется линия падения упругостей водяных паров в

зимний период методом стационарного влажностного режима. При возможной конденсации влаги в толще ограждения необходимо найти и стационарную линию падения упругостей в предыдущее время года (осенью). Далее нужно вести расчет методом нестационарного влажностного режима при зимних условиях влажности воздуха и температур для определения времени $Z_{\text{нст.}}$, истрачиваемого для увлажнения конструкции, начиная от стационарного состояния осенью до стационарного состояния зимой, или точнее, до начала конденсации водяных паров. Если $Z_{\text{нст.}}$ получается больше $Z_{\text{зим.}}$, т. е. продолжительности зимнего периода, то конденсация влаги, следовательно, невозможна. Если $Z_{\text{нст.}} < Z_{\text{зим.}}$, то в течение зимнего периода конденсируется в ограждении

$$Q_{\text{конд.}} = q_{\text{конд.}} (Z_{\text{зим.}} - Z_{\text{нст.}}) \text{ грамма влаги в м}^2. \quad (12)$$

Далее возможно аналогичным способом вычислять время, затраченное для высыхания конденсирующейся влаги в последующие времена года. При помощи установления годового баланса влаги можно получить данные о максимальных возможных влажностях материалов конструкции.

При установлении годового баланса влаги в ограждении без учета временей $Z_{\text{нст.}}$ получаем только ориентировочные представления о влажностном режиме конструкции.

4. ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЦЕССА ВЫСЫХАНИЯ И УВЛАЖНЕНИЯ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С целью изучения процесса увлажнения и высыхания стеновых конструкций в естественных условиях, автором были проведены опыты со стеновыми панелями. Панели были взяты размерами около $0,2 \times 0,4$ м и толщиной 17 см. Эти панели были сконструированы в виде фанерных ящиков, заполненных опилками. В эти ящики были поставлены перпендикулярно к плоскости стены 8 цилиндров из парафинированной тонкой чертежной бумаги диаметром в 5 см и длиной 17 см, заполненных опилками заранее установленной влажности. Благодаря своей тонкости стены цилиндров практически не могли служить мостиками холода и не могли иметь существенного влияния на рас-

пределение температур и влаги в панелях. У некоторых цилиндриков торцы были закрыты сеткой из тонкой медной проволоки, а у других тонкой герметичной бумагой из целлофана. Благодаря своей очень малой воздухопроницаемости и ничтожному сопротивлению паропрооницанию, целлофан существенно не мешает нормальному ходу увлажнения и высыхания материала в цилиндриках, но делает инфильтрацию воздуха через цилиндрики практически невозможной. Проволочная сетка никак не влияет на эти явления. Панели были вставлены в отверстие форточки кухни жилого дома. В кухне имеются обычная плита с двумя очагами и отверстие нормальной вытяжной вентиляции. Периодично были зарегистрированы температура и влажность внутреннего и наружного воздуха. Измерялась также разность давлений наружного и внутреннего воздуха при помощи микроманометра. Показания последнего доказывали, что (как и можно было ожидать), в кухне давления воздуха меньше, чем снаружи (особенно при топке плиты и открывании вентиляционного отверстия). Средние разницы давлений наружного и внутреннего воздуха колебались в пределах 0,2 до 0,4 мм вод. ст. Такая разница давлений обуславливает сильную инфильтрацию воздуха через ограждающие конструкции вообще и в частности через цилиндрики панели, закрытые с обоих концов сеткой. Через определенный промежуток времени (примерно через один месяц) цилиндрики раскрывались и из них сразу же вынимались пробы слоями, перпендикулярными оси цилиндриков, т. е. потоку тепла и влаги. В каждом слое влажность определялась путем высушивания опилок до постоянного веса. На основании влажностей слоев и довольно одинаковой плотности опилок в цилиндрике стало возможным определение распределения влажности в толще опилочной стены. Результаты опытов изображены на рисунках 9 и 10. Жирными линиями на этих рисунках изображены распределения влажности в опытной стеновой панели. Пунктирными линиями показаны результаты расчета методом последовательного увлажнения, сплошными тонкими линиями изображены распределения влаги в стене при теоретических стационарных условиях диффузии водяного пара и инфильтрации воздуха.

Кривая I показывает распределения влажности в материале стеновой панели с сеткой на внутренней и целло-

фаном на наружной торцовой поверхности; кривая 2 — с целлофаном на обеих поверхностях; кривая 3 — с сеткой на обеих поверхностях. Результаты расчетов методом последовательного увлажнения показаны линиями 11 (соответственно кривой 1), 4 (соответственно кривой 2) и 5 (соответственно кривой 3); линией 6 показаны результаты расчета без учета зависимости удельной паропроницаемости от влажности (соответственно линии 2). Линия 10 (на рисунке 9) показывает распределение влажности с сеткой на обеих поверхностях без инфильтрации воздуха;

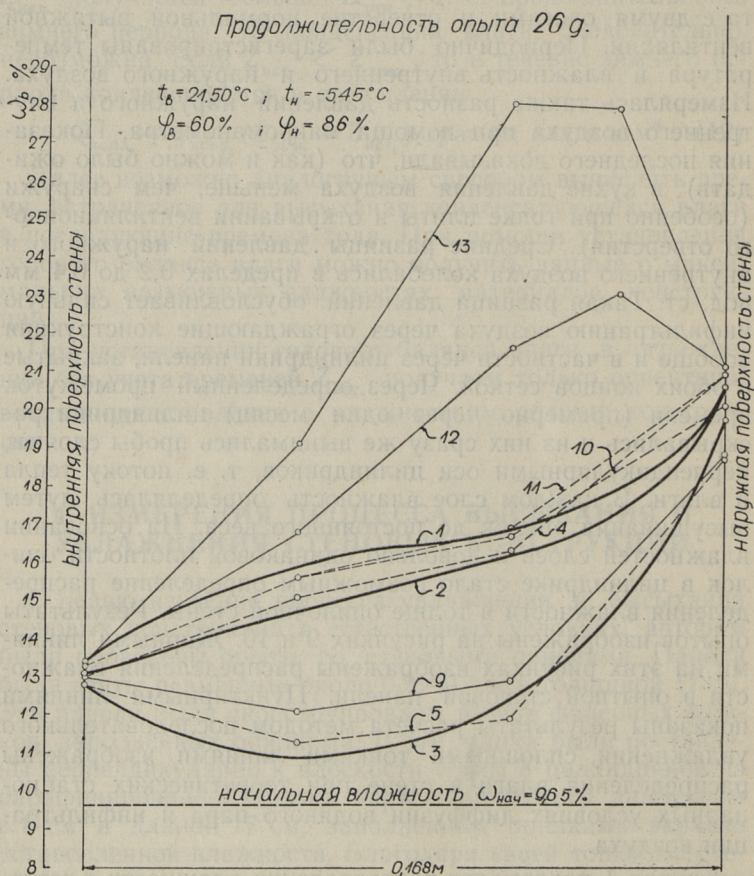


Рис. 9. Распределение влажности в первой стеновой панели.

стационарный режим при этих условиях показан линией 12 (при $\mu \neq \text{const.}$) и 13 (при $\mu = \text{const.}$). Стационарные условия при целлофане на обеих поверхностях изображают линии 7 (при $\mu = \text{const.}$) и 8 (при $\mu \neq \text{const.}$). Линией 9 изображены распределения влаги в панели при стационарных условиях диффузии водяного пара при инфильтрации воздуха.

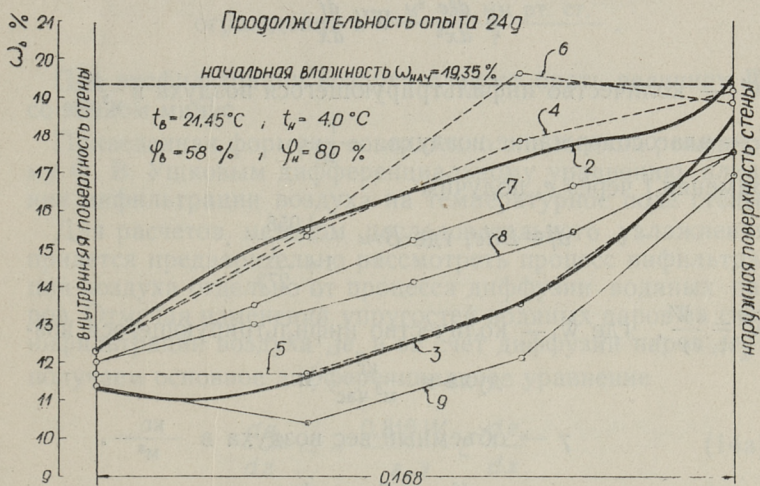


Рис. 10. Распределение влажности во второй стеновой панели.

5. РОЛЬ ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА В ВЛАЖНОСТНОМ РЕЖИМЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Наружный холодный воздух, абсолютное влагосодержание которого сравнительно низко, утепляется при инфильтрации через стеновой материал. Чем выше становится температура инфильтрирующегося воздуха, тем меньше будет его относительная влажность. Вода, сорбированная в материале, испаряется из-за уменьшения влажности воздуха в порах. Увлажненный воздух, двигаясь дальше против температурного перепада, утепляется больше и снова уменьшается его относительная влажность. Этим создаются в следующих порах условия дальнейшего высушивания влаги и т. д. Таким образом, при инфильтрации воздуха одновременно действуют два противоположных явления —

движение влаги в виде диффузии паров из внутреннего воздуха в наружный, и движение влаги вместе с средой инфильтрирующегося снаружи воздуха. Полагая, что в каждый момент времени влажность материала находится в равновесии с влажностью воздуха в порах, стационарный режим этих явлений можно математически описать в виде дифференциального уравнения

$$\mu \frac{d^2 e}{dx^2} - W' \frac{df}{dx}.$$

w' — количество инфильтрирующегося воздуха в $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \text{ час}}$,

f — влагосодержание воздуха $\frac{\text{г}}{\text{м}^3}$.

Заменяя f через e , получим

$$df = B de, \text{ где } B \approx \frac{1,058}{1 + \frac{t}{273}}.$$

$w' = \frac{W}{\gamma}$, где w — количество инфильтрирующегося воздуха в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{ час}}$ и

γ — объемный вес воздуха в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

$$W' \frac{df}{dx} = \frac{B}{\gamma} W \frac{de}{dx}.$$

B и γ зависят от температуры, но $\frac{B}{\gamma} \approx \text{const.}$, так как $\gamma \approx \frac{1,293}{1 + \frac{t}{273}}$ и $\frac{B}{\gamma} \approx \frac{1,058}{1,293} \approx 0,818$.

Таким образом получаем дифференциальное уравнение в виде:

$$\mu \frac{d^2 e}{dx^2} - 0,818 W \frac{de}{dx} = 0.$$

Это дифференциальное уравнение дает для плоской стены решение в виде формулы

$$e_x = e_n + (e_v - e_n) \frac{\ln^{-1} 0,818 W R_{nx} - 1}{\ln^{-1} 0,818 W R_{no} - 1}. \quad (13)$$

Здесь e_x — упругость паров в плоскости x в мм рт. ст.,

$R_{пх}$ — сопротивление паропроницанию ограждения от наружного воздуха до плоскости x

$$в \frac{\text{м}^2 \text{ час мм рт. ст.}}{\text{г}},$$

$R_{п0}$ — суммарное сопротивление паропроницанию ограждения в $\frac{\text{м}^2 \text{ час мм рт. ст.}}{\text{г}}$.

При эксфильтрации воздуха следует брать величину W со знаком минус.

Приведенная формула совершенно аналогична решенному Ф. В. Ушковым дифференциальному уравнению влияния инфильтрации воздуха на температурное поле стены.

Для расчетов методом последовательного увлажнения придется предварительно рассмотреть процесс инфильтрации воздуха отдельно от процесса диффузии водяных паров. Отмечая изменения упругостей водяных паров за счет инфильтрации воздуха Δe_n и за счет диффузии паров Δe_d , получаем основное дифференциальное уравнение

$$\frac{de_n}{dz} = - \frac{0,818 W}{\xi_0 \gamma} \varepsilon \frac{de_n}{dx} \quad (14a)$$

которое дает решение в конечных разностях в виде

$$\Delta e_{n,m} = \frac{0,818 W \varepsilon_m \Delta z}{2 \xi_{a,m} \gamma \Delta x} (e_{m+1,z} - e_{m-1,z}) \quad (14)$$

и на поверхности ограждения

$$\Delta e_{n,0} = \frac{2 \cdot 0,818 \varepsilon_0 \Delta z}{\xi_{0,0} \gamma \Delta x} (2 e_{0,z} - e_{1,z} - e_b) \quad (15)$$

В конечном счете получаем

$$\Delta e_m = \Delta e_{n,m} + \Delta e_{d,m}. \quad (16)$$

При начале расчета формула (15) может дать завышенные значения Δe_0 ; тогда нужно найти $\Delta e_{0,\max}$ при условии стационарного влажностного режима между плоскостью 1 и внутренним воздухом

$$\Delta e_{o, \max} = e_{i, z} + (e_b - e_{i, z}) \frac{\ln^{-1} 0,818 W R_{\Delta x} - 1}{\ln^{-1} 0,818 W (R_{\Delta x} + R_{\text{вп}}) - 1} - e_{o, z} \quad (17)$$

и аналогично для наружной поверхности

$$\Delta e_{m, \max} = e_n + (e_m - e_n) \frac{\ln^{-1} 0,818 W R_{\text{нп}} - 1}{\ln^{-1} 0,818 W (R_{\text{нп}} + R_{\Delta x}) - 1} - e_{m, z} \quad (18)$$

где $R_{\Delta x}$ — сопротивление паропроницанию первого (формула 17) или последнего (формула 18) слоя материала стены, толщиной Δx в $\frac{\text{м}^2 \text{ час мм рт. ст.}}{\text{г}}$

$R_{\text{вп}}$ и $R_{\text{нп}}$ — сопротивления влагопереходу у внутренней и наружной поверхности ограждения в $\frac{\text{м}^2 \text{ час мм рт. ст.}}{\text{г}}$

Таким же образом возможна проверка величины выбранного интеграла времени ΔZ . Когда Δe_x получается больше величины

$$\Delta e_{x, \max} = e_{x+1, z} + (e_{x-1, z} - e_{x+1, z}) \frac{\ln^{-1} 0,818 W R_{\Delta x_{x, x+1}} - 1}{\ln^{-1} 0,818 W (R_{\Delta x_{x, x+1}} + R_{\Delta x_{x-1, x+1}}) - 1} - e_{x, z} \quad (19)$$

необходимо уменьшить ΔZ так, чтобы $\Delta e_{x, \max} \leq \Delta e_x$.

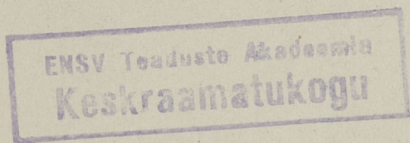
При расчете влажностного режима ограждающих конструкций с учетом влияния инфильтрации воздуха, нужно иметь в виду, что при инфильтрации изменяется и температурное поле:

$$t_x = t_n + (t_a - t_n) \frac{\ln^{-1} c W R_{\text{терм. х}} - 1}{\ln^{-1} c W R_{\text{терм. о}} - 1} \quad (20)$$

На рисунках 9 и 10 видно, что расчеты методом последовательного увлажнения дают результаты, довольно хорошо совпадающие с опытными данными. При неучете влияния зависимости удельной паропроницаемости от степени увлажнения материала получаются (особенно при высоких влажностях материала) результаты, несовпадающие с опытными данными (линия 6 на рис. 10).

Содержание

	Стр.
Основные выводы	3
1. Введение	4
2. Удельная паропроницаемость строительных материалов	5
3. Расчет влажностного режима ограждающих конструкций	12
4. Измерения процесса высыхания и увлажнения стеновых конструкций	20
5. Роль инфильтрации воздуха в влажностном режиме ограждающих конструкций	23



Х. А. Крутоб

АНАЛИЗ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОЙ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ УВЛАЖНЕНИЯ МАТЕРИАЛА И ВЛИЯНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА.

Издательство
Таллинского Политехнического Института

*

Редактор Х. А. Орувез.
Технический редактор А. Тамм.
Корректор Ж. Сольба.

Сдано в набор 5. 01. 1957. Подписано к печати 30. 01. 57. Бумага 54×84 1/16. Печатных листов 1,75. По формату 60×92 печатных листов 1,44. Учетно-издательских листов 1,11. Тираж 800. МВ-00861. Заказ № 110.

Типография «Коммунист». Таллин, ул. Пикк 2.

Цена 80 коп.

4.1-

Цена 80 коп.