

УДК 692.23

Г.П. ВАСИЛЬЕВ, д-р техн. наук, В.А. ЛИЧМАН, канд. физ.-мат. наук, НИИ Мосстрой;
Н.В. ПЕСКОВ, д-р физ.-мат. наук, МГУ (Москва)

Моделирование процесса сушки ограждающих конструкций зданий

В период сдачи здания в эксплуатацию существует большая вероятность того, что здание, накопившее влагу в период строительства, еще не высохло и часть тепловой энергии, потребляемая им, тратится на сушку строительных конструкций. Для детального описания процессов тепловлагопереноса в строительных конструкциях и определения доли трансмиссионных потерь, затраченных на сушку, разработано программное обеспечение, основанное на усовершенствованной модели последовательного увлажнения К.Ф. Фокина [1], в которой учитывается конденсация и испарение жидкой влаги.

Ключевые слова: энергоаудит, трехслойная стена, теплопроводность, коэффициент паропроводности, непрерывность давления пара.

При проведении энергоаудита зданий, сдаваемых в эксплуатацию, важно вычислить долю тепловой энергии, которая тратится на сушку ограждающих конструкций. Эту энергию можно сопоставить с трансмиссионными потерями $Q_{суш} = \beta_{суш} \cdot Q_{тр}$, но тогда возникает необходимость вычисления величины коэффициента сушки $\beta_{суш}$. Используя возможности современных численных методов и вычислительной техники, для описания процессов тепловлагопереноса в многослойной стене авторами была модернизирована нестационарная модель последовательных увлажнений К.Ф. Фокина [1], в рамках которой и решалась поставленная задача.

Параметры модели. Для определенности будем рассматривать трехслойную стену, схема которой и основные характеристики материалов слоев и внешних условий показаны на рис. 1.

Стена состоит из трех слоев толщиной d_1 , d_2 и d_3 , м. Ось x направлена перпендикулярно поверхности стены. Внешняя поверхность стены, $x=0$; внутренняя поверхность, $x=L=d_1+d_2+d_3$. Материал каждого слоя стены характеризуется следующими параметрами: ρ , кг/м³ – плотность; c , Дж/(кг·°C) – удельная теплоемкость; λ , Вт/(м·°C) – коэффициент теплопроводности; μ , мг/(ч·м·Па) – коэффициент паропроводности; β , мг/(ч·м·%) – коэффициент влагопроводности.

Параметры ρ , c , μ предполагаются постоянными в рассматриваемом диапазоне значений температуры и влажности. Коэффициенты теплопроводности и влагопроводности в общем случае зависят от температуры T и влажности ω материала (влажность определяется как отноше-

ние массы влаги к массе сухого материала в единице объема, выраженное в процентах). Однако учитывается зависимость только от влажности, поскольку в рассматриваемых условиях она меняется в широких пределах, поэтому предполагается, что $\lambda = \lambda(\omega)$, $\beta = \beta(\omega)$. Конкретный вид зависимости определяется с помощью полиномиальной интерполяции экспериментальных данных. В модели также используется экспериментально определяемая зависимость равновесной (сорбционной) влажности материала от относительной влажности воздуха и температуры $\sigma(\varphi, T)$ (при фиксированной температуре $\sigma = \sigma(\varphi)$ – изотерма сорбции материала).

Теплопроводность. Перенос тепла в каждом слое стены описывается уравнением теплопроводности для температуры материала $T(t, x)$, t – время в часах:

$$c\rho \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\omega) \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \right) + Q(T, \omega), \quad (1)$$

где член Q учитывает скорость выделения и поглощения теплоты в фазовом переходе пар – вода (фазовый переход вода – лед в модели не учитывается).

Коэффициент теплопроводности $\lambda(\omega(x))$ является непрерывной функцией внутри каждого слоя и в общем случае имеет разрывы на границах слоев. Поэтому уравнение (1) определено внутри слоев, а на границах раздела налагается условие непрерывности температуры и потока тепла:

$$T(t, x)|_{x=L_i-0} = T(t, x)|_{x=L_i+0}, \quad \lambda \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_i-0} = \lambda \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_i+0}, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

На внешней поверхности стены предполагается конвективный теплообмен с внешним воздухом, температура которого заданная функция времени $T_{ex}(t)$:

$$-\lambda(\omega) \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{ex} (T(t, x) - T_{ex}(t)) \Big|_{x=0}; \quad (3)$$

α_{ex} , Вт/(м²·°C) – коэффициент теплообмена.

Аналогично на внутренней поверхности стены – теплообмен с внутренним воздухом:

$$-\lambda(\omega) \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_{in} (T(t, x) - T_{in}(t)) \Big|_{x=L}. \quad (4)$$

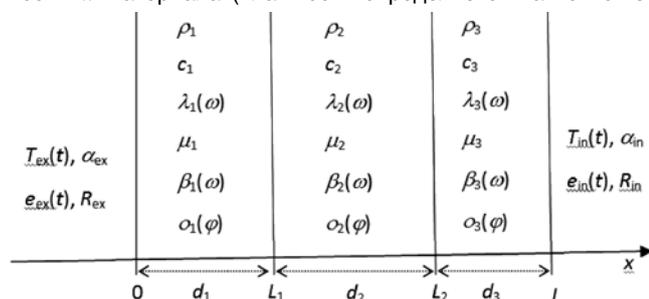


Рис. 1. Параметры модели трехслойной стены

Паропроводность и влагопроводность. Предполагается, что жидкость (вода) в материале стены может пребывать в трех видах (не считая льда): водяной пар и жидкая вода в порах материала и абсорбированная вода. Абсорбированная вода считается жестко связанной с частицами материала и не перемещается в пространстве. Количество абсорбированной воды в единице объема материала определяется относительной влажностью воздуха в порах и измеряется экспериментально.

Если относительная влажность воздуха в порах меньше 1, то в материале содержится только абсорбированная влага и водяной пар. При относительной влажности воздуха $\varphi < 1$ масса абсорбированной влаги в единице объема (1 м^3) материала равна $0,01 \omega \rho$, где ρ – плотность материала; ω – относительная влажность в процентах, причем $\omega = o(\varphi)$ определяется по изотерме сорбции для данного материала. В этом случае влага перемещается только в виде водяного пара, и это перемещение описывается уравнением диффузии для парциального давления водяного пара $e(t, x)$, Па:

$$\xi(\omega) \rho \frac{\partial e(t, x)}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 e(t, x)}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Термодиффузия пара, т. е. диффузия, обусловленная градиентом температуры, в модели не учитывается. Величина ξ , г/(кг·Па) характеризует «пароемкость» материала, ее численное значение можно оценить по формуле [1]:

$$\xi(\omega) = \frac{d o(\varphi)}{d \varphi}. \quad (6)$$

Как уже отмечалось, уравнение (5) определено на той части интервала $(0, L)$, на которой $\varphi < 1$, или, поскольку $\varphi = e(t, x)/E(T(t, x))$, на которой $e < E$, где $E = E(T)$ – давление насыщенного водяного пара при температуре T . Обозначим эту область через $D_e \subseteq (0, L)$. Если точки $x=0$ и/или $x=L$ являются граничными точками области D_e , то в этих точках задаются условия конвективного паробмена с внешним и/или внутренним воздухом:

$$-\mu \frac{\partial e(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{e(t, x) - e_{ex}(t)}{R_{ex}} \Big|_{x=0}; \quad (7)$$

$$-\mu \frac{\partial e(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{e(t, x) - e_{in}(t)}{R_{in}} \Big|_{x=L}, \quad (8)$$

где e_{ex} , e_{in} – давление водяного пара во внешнем и внутреннем воздухе; R_{ex} , R_{in} – сопротивление паропрооницанию внешней и внутренней поверхности стены.

Коэффициент паропроводности $\mu = \mu(x)$ предполагается постоянным внутри каждого слоя и может иметь разрывы на границах слоев. Поэтому если внутренние границы слоев являются граничными точками области D_e , то в них задаются условия непрерывности давления и потока пара:

$$e(t, x) \Big|_{x=L_1-0} = e(t, x) \Big|_{x=L_1+0}, \quad \mu \frac{\partial e(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_1-0} = \mu \frac{\partial e(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_1+0}, \quad i=1, 2. \quad (9)$$

Часть интервала $(0, L)$, которая не входит в область D_e , обозначим D_w , $D_w = (0, L) / D_e$. В области D_w в порах материала вместе с водяным паром содержится жидкая вода. Предполагается, что вода и пар находятся в состоянии равновесия, т. е. давление пара равно давлению насыщенного пара при данной температуре, $e(t, x) = E(T(t, x))$. Относительное количество жидкой влаги w , выраженное в процентах от массы материала, можно оценить по формуле:

$$w(t, x) = \omega(t, x) - o(1), \quad (10)$$

где $o(1)$ – максимальная сорбционная влажность материала, соответствующая относительной влажности воздуха $\varphi = 1$.

Распределение жидкой влаги в области D_w описывается уравнением:

$$10 \rho \frac{\partial w(t, x)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta(\omega) \frac{\partial w(t, x)}{\partial x} \right) + \mu \frac{\partial^2 E(T)}{\partial x^2}. \quad (11)$$

«Технический» коэффициент 10 появляется из-за размерности коэффициентов β и μ , в которых масса выражается в граммах, и из-за того что относительная влажность ω выражается в процентах.

Как уже отмечалось, в области D_w предполагается динамическое равновесие фаз воды, поэтому чтобы избежать существенного усложнения модели, на границе областей D_w и D_e , а также в точках $x=0$ и/или $x=L$, если они являются граничными точками D_w , задается условие непротекания жидкости:

$$\frac{\partial w(t, x)}{\partial x} \Big|_{x \in \partial D_w} = 0. \quad (12)$$

Если точки $x=L_1$ и/или $x=L_2$ являются граничными точками D_w , то в них задается условие непрерывности, аналогичное условиям (2), (9):

$$w(t, x) \Big|_{x=L_1-0} = w(t, x) \Big|_{x=L_1+0}, \quad \beta \frac{\partial w(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_1-0} = \beta \frac{\partial w(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_1+0}, \quad i=1, 2. \quad (13)$$

Пусть точка \bar{x} – граничная точка, разделяющая области D_e и D_w , причем для определенности полагаем, что область D_e лежит слева от \bar{x} , а D_w – справа. Тогда в \bar{x} задается условие непрерывности давления пара:

$$e(t, x) \Big|_{\bar{x}-0} = E(T(t, x)) \Big|_{\bar{x}+0}. \quad (14)$$

Учет теплоты фазового перехода пар – вода. В уравнении (11) член $\nu = \mu \frac{\partial^2 E(T)}{\partial x^2}$, г/(ч·м³), представляет собой скорость изменения концентрации жидкости в результате конденсации пара или испарения воды, т. е. в результате фазового перехода. Это изменение сопровождается выделением или поглощением (в зависимости от знака ν) теплоты фазового перехода, которая учитывается в уравнении (1) посредством члена Q , численное значение которого вычисляется по формуле:

$$Q = q_L \mu \frac{\partial^2 E(T)}{\partial x^2}, \quad (15)$$

где $q_L = 686$ Вт·ч/кг – удельная теплота фазового перехода.

Численные методы. Система дифференциальных уравнений для температуры $T(t, x)$, давления водяного пара $e(t, x)$ и процентной концентрации жидкой влаги $w(t, x)$ численно решается методом конечных разностей.

Для аппроксимации пространственных производных на интервале $(0, L)$ введем равномерную пространственную сетку: $x_k = (k-0,5)h$, $k=1, 2, \dots, N$, $h=L/N$. При этом для простоты полагаем, что границы слоев (точки L_1 и L_2) лежат ровно посередине между соседними узлами x_{N_1} , x_{N_1+1} и x_{N_2} , x_{N_2+1} соответственно. Ясно, что при достаточно большом N это предположение не влияет на результат. Таким образом, узлы x_1, \dots, x_{N_1} лежат в слое 1; узлы $x_{N_1+1}, \dots, x_{N_2}$ – в слое 2; узлы x_{N_2+1}, \dots, x_N – в слое 3. Производные по време-

ни аппроксимируются на сетке $t_0=0, t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$ с переменным шагом $\tau_n = t_{n+1} - t_n, n \geq 0$. Коэффициенты уравнений и неизвестные функции аппроксимируются сеточными функциями по формуле $f_k^m = f(t_n, x_k)$. В дальнейшем для краткости значения сеточных функций при $t=t_n$ будем обозначать без верхнего индекса, f_k , а значения на следующем временном слое $t=t_{n+1}$ будем обозначать со знаком \wedge над символом функции, f_k^\wedge .

Разностная схема. Система разностных уравнений модели выводится из дифференциальных уравнений с помощью метода баланса:

$$h c_k \rho_k \frac{\hat{T}_k - T_k}{\tau} = \hat{A}_k^- \times (\hat{T}_{k-1} - \hat{T}_k) - \hat{A}_k^+ \times (\hat{T}_k - \hat{T}_{k+1}) + \hat{Q}_k, \quad k=1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

$$h \hat{\xi}_k \rho_k \frac{\hat{e}_k - e_k}{\tau} = M_k^- \times (\hat{e}_{k-1} - \hat{e}_k) - M_k^+ \times (\hat{e}_k - \hat{e}_{k+1}), \quad x_k \in D_e. \quad (17)$$

$$h \times 10 \rho_k \frac{\hat{w}_k - w_k}{\tau} = \hat{B}_k^- \times (\hat{w}_{k-1} - \hat{w}_k) - \hat{B}_k^+ \times (\hat{w}_k - \hat{w}_{k+1}) + \hat{V}_k, \quad x_k \in D_w. \quad (18)$$

Коэффициенты A, M и B вычисляются по следующим формулам:

$$A_1^- = \frac{2\alpha_{ex} \lambda_1}{\alpha_{ex} h + 2\lambda_1}, \quad A_k^- = \frac{2\lambda_{k-1} \lambda_k}{h(\lambda_{k-1} + \lambda_k)}, \quad k=2, 3, \dots, N;$$

$$A_k^+ = \frac{2\lambda_k \lambda_{k+1}}{h(\lambda_k + \lambda_{k+1})}, \quad k=1, 2, \dots, N-1, \quad A_N^+ = \frac{2\lambda_N \alpha_{in}}{2\lambda_N + \alpha_{in} h}. \quad (19)$$

$$M_1^- = \frac{2\mu_1}{h + 2R_{ex} \mu_1}, \quad M_k^- = \frac{2\mu_{k-1} \mu_k}{h(\mu_{k-1} + \mu_k)}, \quad k=2, 3, \dots, N;$$

$$M_k^+ = \frac{2\mu_k \mu_{k+1}}{h(\mu_k + \mu_{k+1})}, \quad k=1, 2, \dots, N-1, \quad M_N^+ = \frac{2\mu_N}{2\mu_N R_{in} + h}. \quad (20)$$

$$B_k^- = \frac{2\beta_{k-1} \beta_k}{h(\beta_{k-1} + \beta_k)}, \quad \text{если } (x_{k-1}, x_k) \in D_w;$$

$$B_k^+ = \frac{2\beta_k \beta_{k+1}}{h(\beta_k + \beta_{k+1})}, \quad \text{если } (x_k, x_{k+1}) \in D_w. \quad (21)$$

и $B_k^- = 0; B_k^+ = 0$ для остальных k , в частности $B_1^- = 0, B_N^+ = 0$.

Член V_k в уравнении (18) представляет скорость изменения концентрации жидкости за счет конденсации пара и испарения воды:

$$V_k = M_k^- \times (E_{k-1} - E_k) - M_k^+ \times (E_k - E_{k+1}), \quad (22)$$

где $E_k = E(T_k)$, если $x_k \in D_w$; $E_k = e_k$, если $x_k \in D_e$; $E_0 = e_{ex}(t_n)$, $E_{N+1} = e_{in}(t_n)$. Теплота фазового перехода учитывается Q_k :

$$Q_k = \begin{cases} q_l V_k, & x_k \in D_w; \\ 0, & x_k \in D_e. \end{cases} \quad (23)$$

Полагая, что $T_0 = T_{ex}(t_n)$; $T_{N+1} = T_{in}(t_n)$; $e_0 = e_{ex}(t_n)$; $e_{N+1} = e_{in}(t_n)$, получаем замкнутую систему $2N$ уравнений относительно $2N$ неизвестных. Первые N неизвестных – это значения температуры в узлах сетки \hat{T}_k в следующий момент времени t_{n+1} . Остальные N неизвестных – это парциальное давление водяного пара \hat{e}_k в узлах, лежащих в области D_e , и концентрация жидкой воды \hat{w}_k в узлах области D_w в момент времени t_{n+1} . При этом считаем, что $e_k = E_k = E(T_k)$ в области D_w и $w_k = 0$ в области D_e .

Решение методом итераций. В уравнениях (16)–(18) для аппроксимации временных производных использует-

ся неявная схема, кроме того, переменные коэффициенты λ и β зависят от решения. Таким образом, система (16)–(18) представляет собой систему нелинейных уравнений. Для решения нелинейной системы применяется метод итераций, который в данном случае состоит в следующем.

Пусть известно решение на n -м временном слое, т. е. при $t=t_n$ (для $t=0$ – это начальное условие). По известному решению вычисляем коэффициенты $(A_k^\pm)^{(1)}, (B_k^\pm)^{(1)}$ и источники членов $(V_k^0)^{(1)}, (Q_k^0)^{(1)}$ и подставляем их в (16)–(18) на место $A_k^\pm, B_k^\pm, V_k, Q_k$. Решая полученную систему линейных уравнений, находим первое приближение $T_k^{(1)}, e_k^{(1)}, w_k^{(1)}$ к решению при $t=t_{n+1}$, $\hat{T}_k, \hat{e}_k, \hat{w}_k$, которое в свою очередь используем для вычисления коэффициентов и источников членов и, наконец, для получения второго приближения $T_k^{(2)}, e_k^{(2)}, w_k^{(2)}$. Повторяя эту процедуру, получаем последовательность приближенных решений $T_k^{(m)}, e_k^{(m)}, w_k^{(m)}, m=1, 2$. Итерации прекращаются при выполнении условия сходимости:

$$\sum_{k=1}^N |T_k^{(m)} - T_k^{(m-1)}| < \delta_T, \quad \sum_{k=1}^N |e_k^{(m)} - e_k^{(m-1)}| < \delta_e, \quad \sum_{k=1}^N |w_k^{(m)} - w_k^{(m-1)}| < \delta_w; \quad (24)$$

для заданных (достаточно малых) констант $\delta_T, \delta_e, \delta_w$ и значения неизвестных на последней итерации принимаются как решения системы в момент t_{n+1} .

Определение области D_w и выбор величины шага по времени. В начальный момент ($t_0=0$) в область D_w включаются все узлы, в которых относительная влажность не меньше максимальной сорбционной влажности. Затем область переопределяется после каждого успешного шага по времени. К D_w добавляются те узлы области D_e , в которых давление пара не меньше давления насыщенного пара ($e_k \geq E(T_k)$). Из D_w исключаются те узлы $x_k \in D_w$, в которых концентрация воды меньше нуля ($w_k < 0$). Никаких ограничений на форму и размеры области D_w в программе не налагается.

В программе применяется стандартная процедура выбора величины шага по времени τ . В начальный момент величина τ выбирается достаточно малой по сравнению с заданной максимальной величиной шага τ_{max} , например можно взять $\tau=0,001\tau_{max}$. Шаг по времени с заданным τ считается «успешным», если число итераций до выполнения условия сходимости (24) не больше максимального числа итераций и относительные изменения решения за шаг не превосходят заданные величины, т. е. выполнены следующие неравенства:

$$\begin{aligned} |\hat{T}_k - T_k| &\leq \varepsilon_T |T_k| + \varepsilon_a^T, & |\hat{e}_k - e_k| &\leq \varepsilon_e |e_k| + \varepsilon_a^e, & |\hat{w}_k - w_k| &\leq \varepsilon_w |w_k| + \varepsilon_a^w, \\ & & & & k=1, 2, \dots, N. & \end{aligned} \quad (25)$$

Если шаг не является «успешным», то величина τ уменьшается в заданном отношении и делается новая попытка шага с новым значением τ . Этот процесс продолжается до тех пор, пока шаг не станет «успешным» либо пока величина τ не станет меньше заданной минимальной величины, в последнем случае работа программы прекращается. Увеличение шага происходит в том случае, если текущее $\tau < \tau_{max}$ и если количество последовательных «успешных» шагов превосходит заданное число.

Граничные условия и характеристики материалов. На внутренней стороне стены (в помещении) задаются постоянная температура воздуха $T_{in}=20^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $\phi_{in}=0,6$. Постоянное давление водяного пара в помещении вычисляется с помощью формулы (29) (см. ниже). Коэффициент теплообмена между стеной и вну-

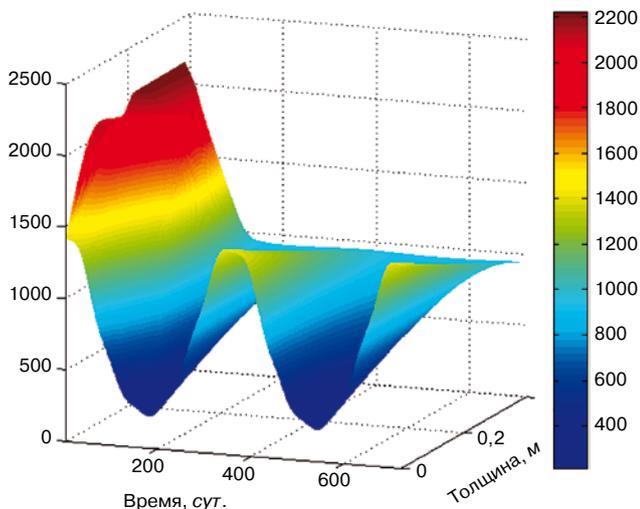


Рис. 2. Распределение парциального давления водяного пара в стене: минвата (1-й слой толщиной 0,1 м) – минвата (2-й слой толщиной 0,1 м) – бетон (3-й слой толщиной 0,2 м) в течение двух лет эксплуатации

треним воздухом $\alpha_{in}=8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Сопротивление паропрооницанию $R_{in}=0,1 \cdot 133,322 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{г}$.

Условия на внешней поверхности стены моделируют сезонные изменения температуры и влажности воздуха согласно «Каталогу температурных полей узлов типовых ограждающих конструкций» (М.: Стройиздат, 1980).

Для простоты будем считать, что в каждом месяце 30 дней, а в году соответственно 360 дней. Среднемесячные значения температуры и влажности интерполируются на среднесуточные значения с помощью интерполяции Фурье. Коэффициент теплообмена между стеной и внешним воздухом $\alpha_{ex}=23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Сопротивление паропрооницанию на внешней поверхности стены $R_{ex}=0,01 \cdot 133,322 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{г}$.

Основные теплотехнические характеристики материалов стены выбираются согласно СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий». Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности предполагается линейной. Изотермы сорбции материалов аппроксимируют

Таблица 1

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
T_{cp}	-9,4	-8,5	-3,6	4,9	12,9	17	19,3	17,4	11,7	5	-1,6	-6,9
Φ_{cp}	0,84	0,81	0,78	0,65	0,58	0,59	0,63	0,68	0,73	0,78	0,82	0,85

Таблица 2

$W_3, \%$	$W_3 - O_3, \%$	Энергия на испарение, Вт·ч/м ²			Энергия на конденсацию, Вт·ч/м ²		
		1-й слой, минвата	2-й слой, минвата	3-й слой, железобетон	1-й слой	2-й слой	3-й слой
1,2	0	0	0	0	0	0	0
2	0,8	0	0	2808	0	0	0
3	1,8	0	0	6240	0	0	0
4	2,8	115	110	9672	115	106	0
5	3,8	139	222	13087	138	215	0
6	4,8	418	667	16512	398	672	0
7	5,8	504	967	19920	437	984	0

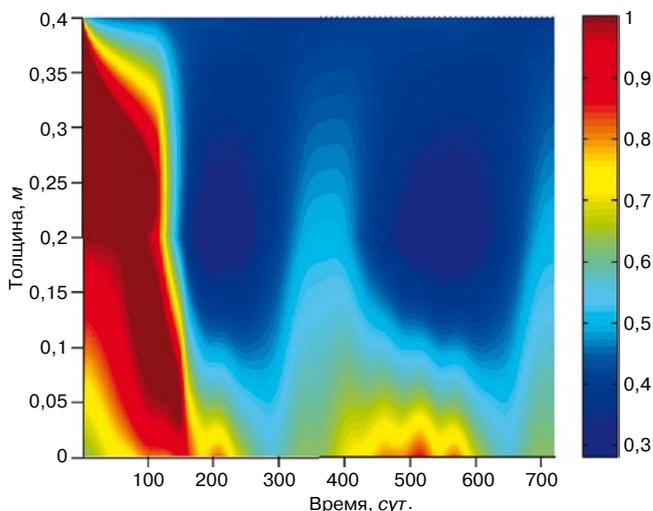


Рис. 3. Результаты расчетов распределения парообразной влаги в порах материала стены: минвата (1-й слой толщиной 0,1 м) – минвата (2-й слой толщиной 0,1 м) – бетон (3-й слой толщиной 0,2 м) в течение двух лет эксплуатации

ся многочленом четвертого порядка. Сорбционная весовая влажность материалов, коэффициенты влагопроводности взяты из «Руководства по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий» (М.: Стройиздат, 1984).

Расчет начинается с середины июля. Предполагается, что в начальный момент температура стены представлена линейной функцией, которая изменяется от температуры на внешней поверхности 19,3°С до температуры на внутренней поверхности 20°С. Заметим, что начальное распределение температуры достаточно быстро «забывается», поэтому выбор начальной температуры не влияет на результаты расчетов, которые обычно проводятся для периода в несколько лет. Однако для облегчения сходимости итераций начальное распределение температуры должно быть достаточно близким к естественному распределению, соответствующему начальному моменту времени.

В начальный момент задается относительная влажность материала каждого слоя. Если начальная влажность слоя больше максимальной сорбционной влажности, то слой лежит в области D_w и начальное давление водяного пара полагается равным давлению насыщенного пара при данной начальной температуре. Если начальная влажность не больше максимальной сорбционной влажности материала, то по изотерме сорбции определяется начальная относительная влажность воздуха в порах материала.

Результаты моделирования влажностного режима.

Рассмотрим конструкцию наружной стены в виде: минвата (1-й слой толщиной 0,1 м) – минвата (2-й слой толщиной 0,1 м) – бетон (3-й слой толщиной 0,2 м). Утеплитель условно разбит на два слоя. Пусть начальная массовая влажность минеральной ваты равна максимальной сорбционной влажности 1,9%. Начальная массовая влажность бетона 5%. Максимальная сорбционная влажность бетона равна 1,2%, следовательно, жидкой влаги в бетоне вначале было: $m_3 = \rho_3 \cdot d_3 \cdot (w_3 - o_3) = 19 \text{ кг}/\text{м}^2$.

Результаты расчетов представлены в виде пространственно-временных диаграмм. По горизонтальной оси отложено время в сутках, по вертикальной – расстояние, отсчитываемое от внешнего слоя стены. Начало отсчета – середина июля.

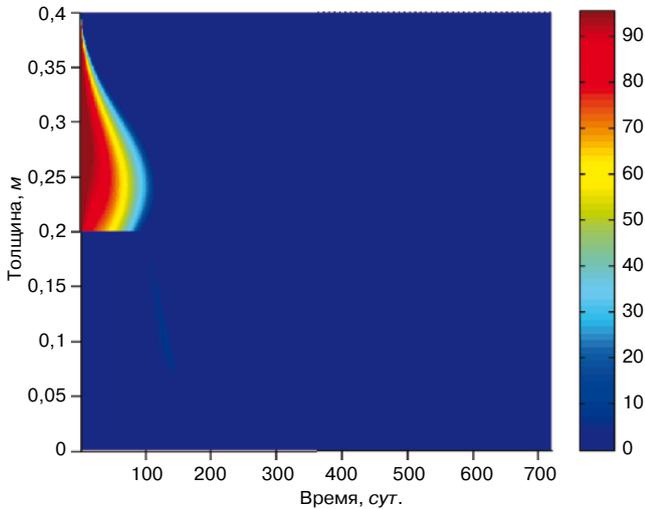


Рис. 4. Результаты расчетов распределения жидкой влаги ($\text{кг}/\text{м}^3$) в порах материала в течение двух лет эксплуатации для конструкции стены: минвата (1-й слой толщиной 0,1 м) – минвата (2-й слой толщиной 0,1 м) – бетон (3-й слой толщиной 0,2 м)

На рис. 2 представлены распределения парциально-го давления водяного пара в стене в течение двух лет эксплуатации. В начальный период парциальное давление водяного пара вдоль всей конструкции было 2200 Па. В зимний период на внешней стороне стены, в минвате парциальное давление водяного пара снижается до 200 Па, парообразная влага диффундирует изнутри помещения наружу. В летний период, наоборот, давление снаружи выше и направленность процесса диффузии изменяется.

Результаты расчетов распределения парообразной влаги в порах материала стены в течение двух лет эксплуатации приведены на рис. 3. Парообразная влага на второй год накапливается только в холодной части минеральной ваты. В бетоне ее нет.

На рис. 4 результаты расчетов жидкой влаги в порах материала стены в течение двух лет эксплуатации. Первоначальная, строительная влага в бетоне испаряется за первые 115 сут. В минеральной вате жидкая влага конденсируется в первый год эксплуатации (80–150 сут), на второй же год эксплуатации ее уже нет.

Распределения удельной теплоты фазовых переходов в каждом слое стены в течение первых 200 сут приведены на рис. 5. Отрицательные значения энергии – скрытая теплота испарения, положительные – конденсации. Во внутреннем бетонном слое вся жидкая влага испаряется за 115 сут начиная с середины июля. Накопление влаги в утеплителе незначительно. Сначала высыхает второй слой минваты, затем первый.

Рассмотрим поведение удельных тепловых потоков (рис. 6), вычисленных на внутренней и внешней поверхностях стены (входящего и выходящего удельных тепловых потоков) в течение отопительного периода. В первые 115 сут удельный тепловой поток на внутренней поверхности значительно превышает поток на внешней: часть энергии, поступающей из теплого помещения, тратится на испарение жидкой влаги во внутреннем бетонном слое. А затем (115–150 сут) происходит высыхание жидкой влаги, накопившейся в утеплителе.

В табл. 2 занесены значения энергии Q , $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, затрачиваемой на испарение и конденсацию в каждом слое кон-

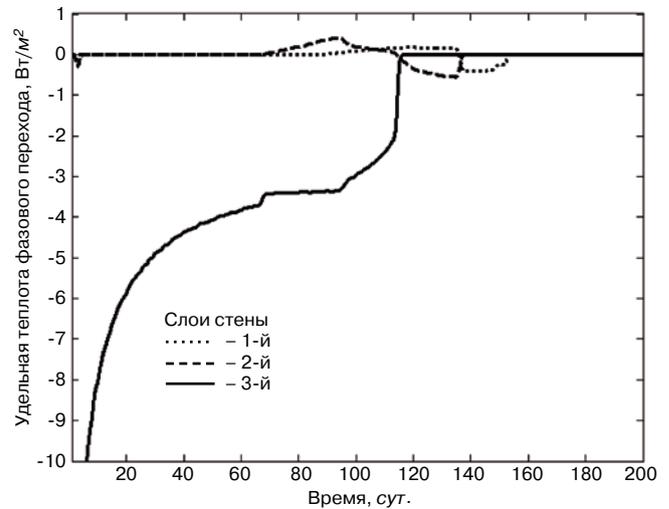


Рис. 5. Результаты расчетов распределений удельной теплоты фазовых переходов в каждом слое стены в течение первых 200 сут. Отрицательные значения энергии – скрытая теплота испарения, положительные – конденсации

струкции стены: минвата (0,1 м) – минвата (0,1 м) – бетон (0,2 м). Значения величин Q , $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ получены путем интегрирования распределений удельной теплоты фазовых переходов (рис. 5). С увеличением доли жидкой влаги в слое бетона w_3 , %, возрастает энергия, идущая на испарение в каждом из слоев. Причем сумма энергий в 1-м и 2-м слоях, идущих на конденсацию жидкой влаги в минеральной вате, равна сумме энергий, истраченных на испарение. Энергия, затрачиваемая на испарение жидкой влаги, в 3-м бетонном слое равномерно возрастает в среднем на $3430 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ при увеличении жидкой влаги на 1%. Действительно, $\Delta Q = \rho \cdot d_3 \cdot 0,01 \cdot 686 = 3430 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, где $\Delta I_L = 686 = \text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$ – удельная теплота фазового перехода вода – пар.

При вычислении коэффициента сушки целесообразно начало отсчета времени сместить к началу отопительного периода – середине октября. В табл. 3 приведены результаты расчетов средних значений величин входящего и выходящего удельных тепловых потоков $q_{\text{вх}}$, $q_{\text{вых}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$, и их разницы: $\Delta q = q_{\text{вх}} - q_{\text{вых}}$, в пределах времени высыхания кон-

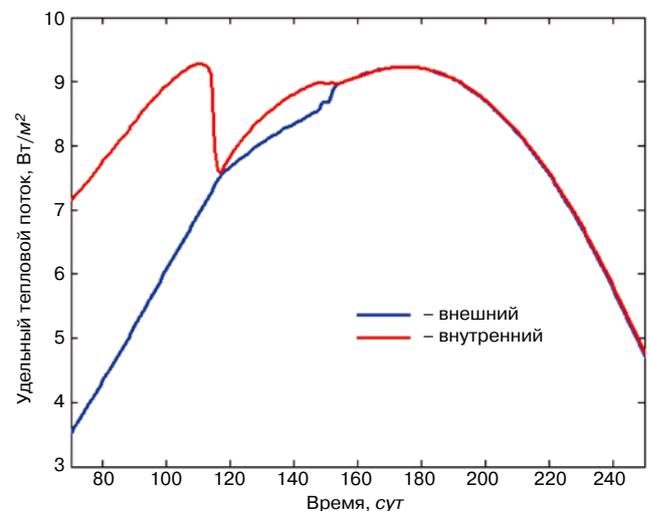


Рис. 6. Удельные тепловые потоки, вычисленные на внутренней и внешней поверхностях стены в течение отопительного периода

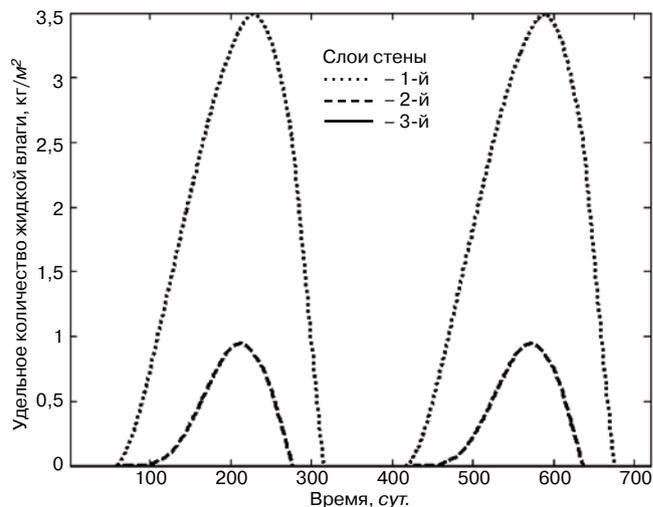
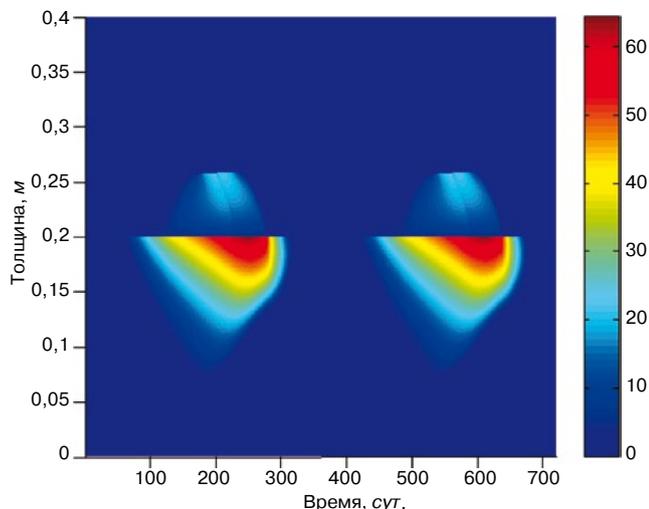


Рис. 7. Результаты расчетов распределения жидкой влаги ($\text{кг}/\text{м}^3$) в порах материала в течение двух лет эксплуатации для конструкции, построенной инверсно: бетон (1-й слой толщиной 0,2 м) – минвата (2-й слой толщиной 0,1 м) – минвата (3-й слой толщиной 0,1 м). Начальное содержание влаги в каждом слое 0,6% от максимальной сорбционной влажности

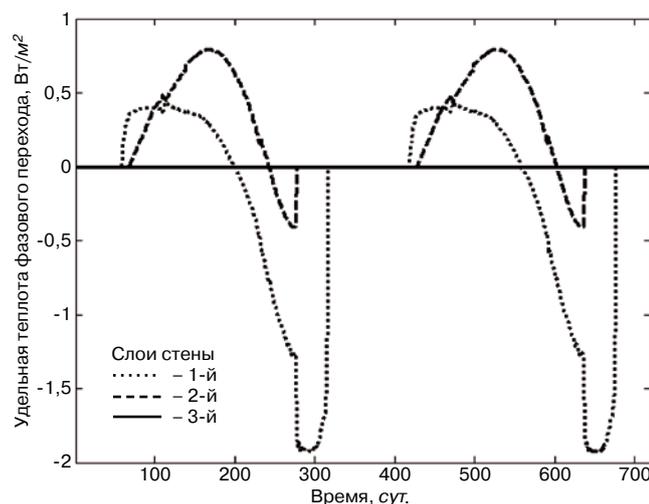


Рис. 8. Распределения удельной теплоты фазовых переходов в каждом слое стены, построенной инверсно: бетон (1-й слой толщиной 0,2 м) – минвата (2-й слой толщиной 0,1 м) – минвата (3-й слой толщиной 0,1 м). Отрицательные значения энергии – скрытая теплота испарения, положительные – конденсации

струкции ($0 \div z_d$), и значения коэффициента сушки: $\beta_{\text{суш}} = \Delta q / q_{\text{вых}}$ для стены минвата (0,1 м) – минвата (0,1 м) – бетон (0,2 м). Время высыхания возрастает до одного месяца при содержании жидкой влаги в бетоне $w_3 - o_3 = 0,8\%$, до трех месяцев ($z_d = 99$ сут) при $w_3 - o_3 = 3,8\%$. Коэффициент сушки при этом возрастает от величины 0,68 до 0,78.

В табл. 4 для сравнения приведены результаты расчетов коэффициента сушки для стены из газобетона: минвата (0,1 м) – минвата (0,1 м) – газобетон (0,3 м). Величина коэффициента сушки в такой конструкции изменяется от 0,05 до 0,24 при увеличении массового содержания жидкой влаги от 0,5 до 4,5%. При этом время сушки газобетонного слоя (4–5 мес) больше, чем время сушки бетонного слоя в ранее рассмотренной конструкции.

Кроме того, для сравнения на рис. 7 приведено распределение жидкой влаги в порах материала в течение двух лет эксплуатации для конструкции, построенной не «по правилам»: бетон (1-й слой толщиной 0,2 м) – минвата (2-й слой толщиной 0,1 м) – минвата (3-й слой толщиной 0,1 м). На рис. 8 приведены для этой конструкции стены распределения удельной теплоты фазовых переходов в каждом слое стены. Положительные значения энергии – энергия, выделяемая при конденсации, отрицательные – при испарении. Начальное содержание влаги в каждом слое: 0,6% от максимальной сорбционной влажности. Начало отсчета – середина июля. Видно, что в стене, построенной не «по правилам», жидкая влага, которой вначале не было, ежегодно накапливается в слое бетона и прилегающем к нему слое минваты. В весенне-летний период она испаряется. Таким образом, разработанная модель позволяет детально анализировать процессы тепловлагопереноса в многослойных строительных конструкциях [2].

Таблица 3

$w_{3r}, \%$	$w_3 - o_3, \%$	$q_{\text{вх}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	$q_{\text{вых}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	$\Delta q, \text{Вт}/\text{м}^2$	$z_d, \text{сут}$	$\beta_{\text{суш}}$
2	0,8	9,53	5,69	3,84	32	0,68
3	1,8	11,36	6,66	4,7	58	0,71
4	2,8	12,59	7,24	5,35	79	0,74
5	3,8	13,44	7,57	5,87	99	0,78

Таблица 4

$w_{3r}, \%$	$w_3 - o_3, \%$	$q_{\text{вх}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	$q_{\text{вых}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	$\Delta q, \text{Вт}/\text{м}^2$	$z_d, \text{сут}$	$\beta_{\text{суш}}$
17	0,5	5,06	4,84	0,22	118	0,05
18	1,5	5,35	4,85	0,5	127	0,1
19	2,5	5,58	4,84	0,74	135	0,15
20	3,5	5,76	4,82	0,94	145	0,2
21	4,5	5,89	4,76	1,13	155	0,24

Список литературы

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
2. Голубев С.С., Личман В.А. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче трехслойной стеновой панели // Жилищное строительство. 2012. № 7. С. 13–15.