

Расчет тепловлажностного режима в краевых зонах неоднородных участков ограждающих конструкций

Канд. техн. наук С.В. КОРНИЕНКО

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

This abstract is devoted to the decision of three-dimensional problem of simultaneous nonstationary heat and moisture transmission for enclosures based on moisture potential. The usage of two arguments as temperature and absolute moisture potential, determining moisture transmission in nonisothermal conditions, allows to simplify materially physical and mathematical model of simultaneous heat and moisture transmission. The method mentioned above is realized in computer program. There are results of calculation of heat and moisture transmission for three-layers wall panel with the keyed joint. This method is the convenient instrument for forecast of heat and moisture condition of enclosures while designing.

При проектировании холодильников большое значение имеет правильный расчет тепловлажностного режима ограждающих конструкций.

В конструкциях наружных ограждений современных зданий фактически нельзя выделить участок, в пределах которого перенос тепла и влаги происходит по одномерной схеме [1]. Наличие в конструкциях неоднородных участков в виде конструктивных связей, угловых сопряжений наружных стен, примыканий внутренних конструкций приводит к образованию в них сложных трехмерных температурных и влажностных полей.

В настоящей работе рассматривается метод решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий. Приводится расчет тепловлажностного режима трехслойной стеновой панели.

Для моделирования процессов влагопереноса в материалах ограждающих конструкций необходимо иметь параметр, определяющий влажностное состояние материалов и воздушной среды. В качестве такого параметра удобно использовать потенциал влажности [1].

В [2] предложена новая шкала потенциала влажности для материалов ограждающих конструкций. Абсолютный потенциал влажности Θ_p (кДж/кг) показывает изменение энергии системы влажный материал—воздух при изменении парциального давления водяного пара p в материале по сравнению с давлением насыщенного водяного пара p_s свободной жидкости при эталонной температуре ($t_0 = 20^\circ\text{C}$):

$$\Theta_p = -135,3 \ln(1 - p/p_s), \quad (1)$$

где p/p_s — относительное парциальное давление водяного пара в материале.

Показано [2], что влажностное состояние материалов в неизотермических условиях характеризуется абсолютным

потенциалом влажности Θ_p , а влагоперенос определяется градиентом Θ_p .

Использование в качестве движущих сил двух независимых переменных — температуры и абсолютного потенциала влажности — позволяет существенно упростить физико-математическую модель совместного тепло- и влагопереноса. Уравнение влагопроводности можно принять без дополнительных источников (стоков) влаги. Теплоту фазовых переходов влаги в уравнении теплопроводности можно также не учитывать, так как вклад этой теплоты в температурное поле будет сравним с ошибкой из-за осреднения многолетних климатических данных.

Математическая модель совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для трехмерных неоднородных участков наружных ограждений зданий может быть представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений [3]:

$$\left. \begin{aligned} c_n(t, \Theta_p) \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \text{div} [\lambda_n(t, \Theta_p) \nabla t]; \\ c_m(t, \Theta_p) \frac{\partial \Theta_p}{\partial \tau} &= \text{div} [\lambda_m(t, \Theta_p) \nabla \Theta_p], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где t — температура;

Θ_p — абсолютный потенциал влажности;

τ — время;

$\lambda_n(t, \Theta_p)$ и $\lambda_m(t, \Theta_p)$ — коэффициенты тепло- и влагопроводности;

$c_n(t, \Theta_p)$ и $c_m(t, \Theta_p)$ — объемные тепло- и влагоемкость.

Тепло- и влагообмен на границе поверхности ограждения с окружающей средой описываются граничными условиями третьего рода:

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_n(t, \Theta_p) \nabla t_s + \alpha_n [t(\tau) - t_s(\tau)] &= 0; \\ \lambda_m(t, \Theta_p) \nabla \Theta_p^s + \alpha_m [\Theta_p^s(\tau) - \Theta_p(\tau)] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где α_h и α_m – коэффициенты тепло- и влагообмена;
 $t(\tau)$ и $\Theta_p(\tau)$ – соответственно температура и абсолютный потенциал влажности среды;
 $t_s(\tau)$ и $\Theta_p^s(\tau)$ – соответственно температура и абсолютный потенциал влажности на поверхности ограждения.

Тепло- и влагообмен на стыках материалов ограждения описывается граничными условиями четвертого рода:

$$t_1(\tau) = t_2(\tau), \quad q_{h1}(\tau) = q_{h2}(\tau); \quad (4)$$

$$\Theta_{p1}(\tau) = \Theta_{p2}(\tau), \quad q_{m1}(\tau) = q_{m2}(\tau). \quad (5)$$

Распределение температуры и абсолютного потенциала влажности в начальный момент времени ($\tau = 0$) задается начальным условием:

$$t(x, 0) = t_0(x), \quad \Theta_p(x, 0) = \Theta_{p0}(x), \quad x = (x_1, x_2, x_3). \quad (6)$$

Численное решение системы (2) с краевыми условиями (3) – (6) осуществляется методом конечных разностей [6] с использованием локально-одномерной схемы аппроксимации исходных дифференциальных уравнений тепло- и влагопроводности. Полученные одномерные уравнения тепло- и влагопроводности решаются по неявной схеме методом прогонки с пересчетом теплофизических характеристик на каждом временном слое. В результате решения получены распределения температуры и абсолютного потенциала влажности в конструкции, по которому с помощью известных зависимостей определяются равновесные влагосодержания материалов.

Рассмотренный метод решения задачи реализован в компьютерной программе, написанной в системе визуального объектно-ориентированного программирования Delphi 3.0 – 7.0. Программа позволяет производить расчеты трехмерных нестационарных температурных и влажностных полей в краевых зонах неоднородных участков ограждающих конструкций зданий, что дает возможность прогнозирования и всестороннего анализа тепловлажностного состояния наружных ограждений при их многолетней эксплуатации.

Разработанный метод использован для оценки тепловлажностного состояния трехслойной стеновой панели со шпуночным соединением. Внутренний конструктивный слой панели толщиной 120 мм и наружный защитно-отделочный слой толщиной 80 мм, выполненные из керамзитобетона ($\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$), соединены между собой шпонкой $150 \times 150 \times 150 \text{ мм}$, выполненной из того же материала. В качестве утеплителя используются пенополистирольные плиты ($\rho_0 = 40 \text{ кг/м}^3$) толщиной 150 мм. Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{int} = 55 \%$, $\Theta_p^{int} = 95,9 \text{ кДж/кг}$. Параметры климата (t_{ext} , φ_{ext} , Θ_p^{ext}) приняты по соответствующим среднемесячным значениям для г. Волгограда [5], теплофизические характеристики материалов (c_h , c_m , λ_h , λ_m) – в зависимости от абсолютного потенциала влажности и температуры. Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности $\alpha_h^{int} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{C)}$, $\alpha_m^{int} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$; у наружной поверхности $\alpha_h^{ext} = 23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{C)}$, $\alpha_m^{ext} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$. Начальные условия соответствуют мо-

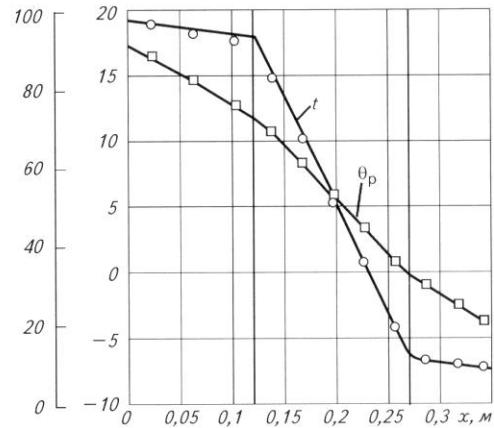


Рис. 1. Профили температуры $t(x)$ и абсолютного потенциала влажности $Q_p(x)$ по глади стены при установившихся условиях тепло- и влагопереноса

менту ввода конструкции в эксплуатацию (октябрь): $t_0 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Theta_{p0} = 34 \text{ кДж/кг}$.

Требуется определить тепловлажностное состояние ограждающей конструкции.

Для решения задачи использована неравномерная пространственная сетка с шагом $0,03 \dots 0,05 \text{ м}$. Общее число узлов 2197. Временной шаг принят равным 2 сут. Указанные параметры обеспечивают необходимую точность и скорость вычислений.

Результаты расчета тепловлажностного состояния по глади стены, полученные по компьютерной программе при установившихся условиях тепло- и влагопередачи, представлены на рис. 1 в виде распределения температуры и абсолютного потенциала влажности в узлах сетки. На том же рисунке сплошными линиями показаны результаты аналитического решения [4] в виде профилей температуры $t(x)$ и $\Theta_p(x)$ (здесь x – координата по глади стены). Расчеты выполнены при следующих исходных данных: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $Q_p^{int} = 95,9 \text{ кДж/кг}$; $t_{ext} = -7,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_p^{ext} = 18,8 \text{ кДж/кг}$ (январь); для керамзитобетона $\lambda_{h1} = 0,67 \text{ Вт/(м} \cdot \text{C)}$, $\lambda_{m1} = 1,19 \cdot 10^{-10} \text{ кг/[м} \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$; для пенополистирола $\lambda_{h2} = 0,041 \text{ Вт/(м} \cdot \text{C)}$, $\lambda_{m2} = 6,62 \cdot 10^{-11} \text{ кг/[м} \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$.

Сравнение результатов численного решения задачи с аналитическим решением показывает их хорошую сходимость. Максимальная относительная ошибка (по отношению к аналитическому решению) по температуре – $7,1 \%$ в сечении $x = 0,195 \text{ м}$, по абсолютному потенциалу влажности $3,6 \%$ в сечении $x = 0,285 \text{ м}$.

Расчет показывает, что квазистационарный влажностный режим наступает спустя $2,5 - 3$ года с момента ввода конструкции в эксплуатацию.

Результаты расчета тепловлажностного состояния по глади стены, полученные по компьютерной программе при нестационарных условиях тепло- и влагопереноса, представлены на рис. 2 в виде профилей температуры $t(x)$ и влагосодержания $w(x)$. Анализ результатов показывает,

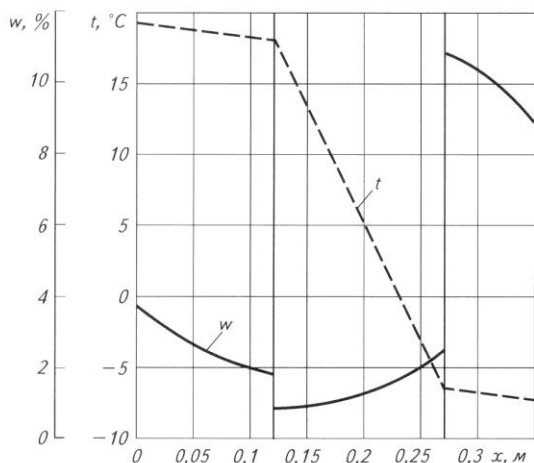


Рис. 2. Профили температуры $t(x)$ и влагосодержания $w(x)$ по глади стены при нестационарных условиях тепло- и влагопереноса (январь, 2-й год эксплуатации)

что плоскость наибольшего увлажнения лежит на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем. Температура в этой плоскости $t = -6,5$ °С, равновесное влагосодержание (по массе) пенополистирола $w_1 = 2,5$ %, керамзитобетона $w_2 = 12$ % при максимальном сорбционном влагосодержании пенополистирола $w_1^{m.s} = 2,6$ %, керамзитобетона $w_2^{m.s} = 12,2$ %. Приближение равновесного влагосодержания материалов к максимальному сорбционному в плоскости наибольшего увлажнения создает опасность накопления влаги в этой зоне в наиболее холодный месяц года.

Поля температуры и влагосодержания по стволу шпонки получены расчетом по компьютерной программе при нестационарных условиях тепло- и влагопереноса. Вдали от шпонки конструкция наружной стены является теплофизически однородной. Изотермы в ней расположены параллельно поверхности стены, а тепловой поток направлен перпендикулярно изотермам изнутри помещения наружу.

По мере приближения к шпонке параллельные изотермы изгибаются к внутренней и наружной поверхностям конструкции, что указывает на более интенсивный тепловой поток по шпонке. При этом шпонка оказывается почти полностью в зоне положительных температур.

Так же как и в случае температурного поля, в зоне шпонки отмечается локализация влагосодержания. Преобладающий изгиб изопотенциальных поверхностей влагосодержания по шпонке в сторону внутренней поверхности конструкции указывает на большее увлажнение шпонки изнутри.

Таким образом, размещение шпонки в ограждающей конструкции нарушает однородность температурного и влажностного полей и приводит к локализации тепла и влаги в зоне шпонки. Процессы тепло- и влагопереноса протекают совместно и влияют друг на друга. Понижение температуры в зоне шпонки, примыкающей к внут-

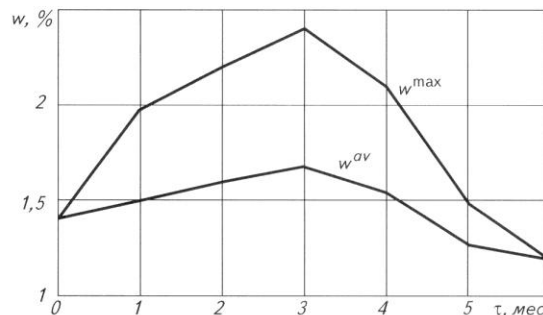


Рис. 3. Динамика изменения максимального $w^{max}(t)$ и среднего $w^{av}(t)$ влагосодержания в утеплителе в течение первого года эксплуатации (с октября по апрель).

ренней поверхности конструкции, приводит к некоторому накоплению влаги в этой краевой зоне.

На рис. 3 приведена динамика изменения максимального и среднего влагосодержания в утеплителе в течение первого года эксплуатации (с октября по апрель). Из рисунка видно, что при переходе к холодному периоду года происходит накопление влаги в утеплителе. Максимальное влагонакопление отмечается в конце января. В дальнейшем происходит сушка утеплителя. Приращение максимального влагосодержания в утеплителе за период влагонакопления $\Delta w^{max} = 1$ %, среднего влагосодержания $\Delta w^{av} = 0,68$ %.

Приведенный пример для наружной стены отапливаемого здания показывает возможность применения разработанного метода и компьютерной программы. Расчет тепловлажностного режима ограждающих конструкций холодильников принципиально не отличается от изложенного, только в этом случае параметры внутреннего воздуха берутся соответствующими параметрам воздуха в холодильных камерах.

Список литературы

1. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. — М.: Стройиздат, 1979.
2. Корниенко С.В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях // Строительные материалы. 2006. № 4.
3. Корниенко С.В. Метод решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий // Известия вузов: Строительство. 2006. № 2.
4. Корниенко С.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния ограждающих конструкций // Материалы 2-й Международной науч.-практ. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». — М.: МГСУ, 2007.
5. СНиП 23–01–99*. Строительная климатология. — М.: Госстрой России. 2004.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — М.: Наука. 1977.