Математическое моделирование нестационарного влажностного режима ограждений с применением дискретно-континуального подхода

В.Г. Гагарин^{1,2}, К.П. Зубарев^{2,1}

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены математические модели влажностного режима, которые разработаны К.Ф. Фокиным, А.В. Лыковым, В.И. Лукьяновым, В.Н. Богословским, Х.М. Кюнцелем. Показаны преимущества использования потенциала влажности по сравнению с раздельным учетом потенциалов переноса. Приведено выражение для потенциала влажности F , разработанное В.Г. Гагариным и В.В. Козловым.

Материалы и методы. Сформулировано дифференциальное уравнение влагопереноса с постоянными во времени коэффициентами и описаны краевые условия. Получено аналитическое выражение для определения потенциала влажности с помощью дискретно-континуального подхода.

Результаты. Проведено сравнение отдельных методов расчета по теории потенциала влажности F для однослойной ограждающей конструкции из газобетона, двухслойной кирпичной стены, а также двух систем фасадных теплоизоляционных композиционных с наружными штукатурными слоями с утеплителем из минеральной ваты и пенополистирола. Рассмотрено решение нестационарного уравнения влагопереноса методом конечных разностей по явной разностной схеме, решение стационарного уравнения влагопереноса, решение нестационарного уравнения влагопереноса дискретно-континуальным методом.

Выводы. Распределение влажности, получаемое с помощью дискретно-континуального подхода и количественно, и качественно совпадает с распределением влажности по методу конечных разностей, однако данное распределение получается по конечной формуле без использования численного метода, что упрощает расчет. Научная новизна исследования заключается в разработке математической модели, основанной на потенциале влажности F , а также в решении уравнения нестационарного влагопереноса с помощью дискретно-континуального подхода. Практическая значимость состоит в возможности получения распределения влаги по толще ограждающей конструкции по полученной формуле.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергосбережение, ограждающая конструкция, математическая модель, дискретно-континуальный метод, тепло-влагоперенос, влажностный режим, влажность, влагоперенос, увлажнение, массоперенос

Благодарности: Авторы выражают благодарность к.т.н. В.В. Козлову и д.т.н., проф. В.К. Ахметову за обсуждение и полезные замечания в ходе выполнения работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Математическое моделирование нестационарного влажностного режима ограждений с применением дискретно-континуального подхода // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 244–256. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256

Mathematical modeling of the unsteady moisture condition of enclosures with application of the discrete-continuous approach

Vladimir G. Gagarin^{1,2}, Kirill P. Zubarev^{2,1}

¹ Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Science (NIISF RAACS); Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper considers mathematical models developed by K.F. Fokin, A.V. Lykov, V.I. Lukyanov, V.N. Bogoslovskiy, and H.M. Künzel and shows the advantages of using the moisture potential as compared with separate consideration of the transfer potentials. An analytical expression for the moisture potential F developed by V.G. Gagarin and V.V. Kozlov is given.

Materials and methods. The article formulated a differential moisture transfer equation with time-constant coefficients and described boundary conditions. An analytical expression determining the moisture potential using the discrete-continuous approach was obtained.

Results. The article compares some calculation methods on the theory of moisture potential F for the single-layer aerated concrete enclosure, the two-layer brick wall, as well as two composite facade heat-insulation systems with external plaster layers with heat-insulation of mineral wool and foamed polystyrene. The solution of the unsteady equation of moisture transfer by the finite difference method using an explicit difference scheme and by the discrete-continuous method, the solution of the stationary equation of moisture transfer are considered.

Conclusions. The moisture distribution obtained using the discrete-continuous approach, both quantitatively and qualitatively, coincides with the moisture distribution by the finite difference method. However, this distribution is obtained by the final formula without using the numerical method, which simplifies the calculation. The scientific novelty of the research consists in the development of a mathematical model based on the moisture potential F as well as in solving the equation of the unsteady moisture transfer through the discrete-continuous approach. The possibility of obtaining moisture distribution over the thickness of the enclosure according to the obtained formula is the practical relevance of the research.

KEYWORDS: energy saving, enclosure, mathematical model, discrete-continuous method, heat moisture transfer, moisture condition, moisture, moisture transfer, moistening, mass transfer

Acknowledgements: Authors are deeply indebted to V.V. Kozlov, Candidate of Engineering Sciences, and V.K. Akhmetov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, for discussion and useful remarks in the course of the study.

FOR CITATION: Gagarin V.G., Zubarev K.P. Mathematical modeling of the unsteady moisture condition of enclosures with application of the discrete-continuous approach. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2):244-256. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В XXI в. строительство все больше сталкивается с необходимостью расчетов нестационарных процессов [1–4]. Одной из наиболее сложных задач является влагоперенос в толще ограждающей конструкции [5–8]. Данная проблема осложняется тем, что до сих пор не известно уравнение переноса влаги, поэтому современные исследователи работают в рамках отдельных теорий [9–17].

Исследования влажностного режима ограждений позволяют уточнить тепловые потери здания [18–21] и выработать решения по повышению энергосбережения [22–25]. Новые направления развития влажностного режима — исследования в области ослабления электромагнитных волн влажностью строительных материалов [26]; возможность экспериментального определения характера увлажнения ограждающих конструкций методом цветовой индикации [27, 28]; влияние солей, содержащихся во внутреннем воздухе, на формирование граничного условия на внутренней поверхности ограждающей конструкции [29, 30].

Представление влагопереноса с помощью частных потенциалов переноса

Одна из самых первых математических моделей влагопереноса была основана на дифференциальном уравнении переноса водяного пара [31]:

$$\gamma_0 \cdot \frac{\xi_0(w)}{E_i(t)} \cdot \frac{\partial e(w,t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial e(w,t)}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где γ_0 — плотность сухого материала, кг/м³; ξ_0 — относительная пароемкость материала, кг/кг; w — массовая влажность, кг/кг (1 кг/кг = 100 % по массе); E_i — давление насыщенного водяного пара, Па; t — температура, °C; e — парциальное давление водяного пара, Па; τ — время, с; x — координата, м; μ — коэффициент паропроницаемости, кг/(м·с·Па).

На краях ограждающей конструкции используются граничные условия влагообмена третьего рода, между слоями применялось условие постоянства парциального давления водяного пара. Для вычисления давления насыщенного водяного пара в уравнении (1) дополнительно исследовалась задача стационарной теплопроводности [31].

Основным недостатком настоящей математической модели являлось ограничение, следующее из физики процесса [31]:

$$e \leq E_i. \quad (2)$$

Данное обстоятельство делало невозможным использовать настоящую теорию для расчета сверхсорбционного увлажнения.

Совместный влагоперенос в сорбционной и сверхсорбционной зонах увлажнения учитывался в другой математической модели с помощью дифференциального уравнения [31]:

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta(w) \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial E_t(t)}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где β — коэффициент влагопроводности, кг/(м·с·кг/кг).

Уравнение (3) давало больше возможностей по сравнению с уравнением (1), однако в его правой части под знаками частных производных находятся сразу два потенциала переноса: массовая влажность и давление насыщенного водяного пара, что сильно затрудняет возможность разработки на его основе упрощенных инженерных методов.

Более детальный подход к влажностному режиму предложили А.В. Лыков [32], J.R. Phillip и D.A. de Vries [33]. Влагоперенос представлялся с помощью градиентов влагосодержания и температуры [33]:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \nabla (k_w \cdot \nabla W + k_t \cdot \nabla t), \quad (4)$$

где W — объемное влагосодержание, кг/м³; k_w — коэффициент переноса влаги под действием градиента влагосодержания, который зависит от влагосодержания и температуры, м²/с; k_t — коэффициент переноса влаги под действием градиента температуры, который зависит от влагосодержания и температуры, кг/(м·с·°C).

Более физически проработанное представление процесса переноса влаги создано В.И. Лукьяновым и основано на уравнении [34]:

$$10 \frac{\partial u}{\partial \tau} = \operatorname{div} \left(10K(u_b, t) \nabla u_b + K_t(u_b, t) \nabla t + D(u) \nabla (E_t \varphi(u_b)) + \frac{E_t \varphi(u_b)}{P_A} i'(u) \nabla P_A \right), \quad (5)$$

где u — полное влагосодержание материала, % по объему; K — коэффициент влагопроводности, м²/с; u_b — количество влаги в материале в жидкой фазе, % по объему; K_t — коэффициент термовлагопроводности, м²/(м·с·°C); D — коэффициент диффузии водяного пара в порах материала, кг/(м·Па·с); φ — относительная влажность воздуха; P_A — давление воздуха в порах материала, гПа; i' — коэффициент фильтрации воздуха в порах материала, кг/(Па·м·с).

Существуют и другие метаматематические модели, основанные на раздельном учете потенциалов переноса. Их отличительной особенностью является либо недостаточный учет физики процессов, либо сложная математическая постановка, затрудняющая преобразования и получение аналитических решений.

Представление влагопереноса с помощью потенциала влажности

Принципиально другой подход к формированию математической модели предлагают методы, основанные на теории потенциала влажности.

Впервые такой подход был предложен В.Н. Богословским. Дифференциальное уравнение влагопереноса сформулировано относительно единого потенциала переноса, который получил название «потенциал влажности», а поток влажности не разделялся на отдельные составляющие [35]:

$$\eta(\Theta, t) \cdot \gamma_0 \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(\Theta, t) \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right), \quad (6)$$

где η — удельная влагоемкость, кг/(кг·°В); Θ — потенциал влажности Богословского, °В (градус влажности); κ — коэффициент влагопроводности, введенный В.Н. Богословским, кг/(м·ч·°В).

Сложность применения подхода В.Н. Богословского заключалась в очень трудоемком и длительном эксперименте с помощью которого производилось построение шкалы потенциала влажности.

Другой потенциал влажности предложил Н.М. Künzel [33]:

$$\frac{dW}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \nabla (D_\varphi \nabla \varphi + \mu \cdot \nabla (\varphi E_t)), \quad (7)$$

где D_φ — коэффициент переноса жидкой влаги, кг/(м·с).

Данный потенциал влажности в настоящее время активно развивается за рубежом и является основой программы WUFI.

Математическая модель, основанная на потенциале влажности В.Г. Гагарина и В.В. Козлова

В.Г. Гагарин и В.В. Козлов предложили потенциал влажности F , который единообразно учитывает влагоперенос в сорбционной и сверхсорбционной зонах [36]:

$$F(w, t) = E_t(t) \cdot \varphi(w) + \frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta. \quad (8)$$

где F — потенциал влажности, Па.

На основании потенциала влажности F сформулировано дифференциальное уравнение влагопереноса [37]:

$$\frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \kappa_F(w, t) \cdot E_t(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2}, \quad (9)$$

где κ_F — коэффициент тепловлажностных свойств материала, м²/(с·Па).

Изменение потенциала влажности наружного воздуха (наружного краевого условия) во времени в течение каждого месяца предполагается по зависимости [37]:

$$F_n = m \cdot \tau + n, \quad (10)$$

где m — производная к графику зависимости потенциала влажности наружного воздуха от времени, Па/с; n — подъем прямой на графике зависимости потенциала влажности наружного воздуха от времени, Па.

Реализация метода расчета влажностного режима по выражению (9) проводилась методом конечных разностей по явной разностной схеме [37].

ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка математической модели нестационарного влажностного режима ограждающей конструкции, основанной на потенциале влажности F и решения уравнения влагопереноса с помощью дискретно-континуального подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Приведение уравнения влагопереноса к виду, требуемому при дискретно-континуальном подходе

В уравнении влагопереноса (9) коэффициент κ_F — переменный и требует уточнения на каждом временном шаге расчета во всех сечениях ограждения, однако, числовой порядок этого коэффициента для многих строительных материалов очень мал. Поэтому представляется возможной замена коэффициента κ_F на «осредненный коэффициент тепло-влажностных свойств материала» κ_{F0} , который будет константой в течение рассматриваемого месяца. Давление насыщенного водяного пара E_t зависит от пространственной координаты в ограждении, но не зависит от времени, так как в течение месяца распределение температуры в конструкции — постоянно. Таким образом, появляется возможность сформулировать дифференциальное уравнение влагопереноса с постоянными во времени коэффициентами.

Подставляя коэффициент тепловлажностных свойств материала [37] в уравнение (9), получим:

$$\frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\gamma_0 \cdot \xi_F(w, t)} \cdot E_t(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2}, \quad (11)$$

где ξ_F — относительная потенциалоёмкость, кг/кг [37].

Введена величина «осредненная постоянная относительная потенциалоёмкость» ξ_{F0} . Заменяем в уравнении (10) ξ_F на ξ_{F0} :

$$\frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\gamma_0 \cdot \xi_{F0}} \cdot E_t(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2}, \quad (12)$$

где ξ_{F0} — осредненная постоянная относительная потенциалоёмкость, кг/кг.

Тогда осредненный коэффициент тепловлажностных свойств материала κ_{F0} примет вид:

$$\kappa_{F0} = \frac{\mu}{\gamma_0 \cdot \xi_{F0}}, \quad (13)$$

где κ_{F0} — осредненный коэффициент тепловлажностных свойств материала, м²/(с·Па).

Подставляя уравнение (13) в (12), получим окончательно формулировку уравнения влагопереноса:

$$\frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \kappa_{F0} \cdot E_t(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Математическая постановка задачи тепловлагопереноса в течение месяца будет состоять из пространственно-временной области, уравнения стационарной теплопроводности, дифференциального уравнения влагопереноса, зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры, краевых и начальных условий.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \text{ — уравнение теплопроводности;} \\ \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \kappa_{F0} \cdot E_t(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2} \text{ — уравнение} \\ \text{влагопереноса;} \\ E_t(t) = 1,84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273+t}\right) \text{ — уравнение} \\ \text{зависимости} \\ E_t(t) \text{ от } t; \\ 0 \leq x \leq l, \tau > 0 \text{ — пространственно-временная} \\ \text{область;} \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (t_n - t_1) \text{ — краевое условие;} \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha_b (t_b - t_N) \text{ — краевое условие;} \\ -\mu \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{R_{b,n}} (F_n - F_1) \text{ — краевое условие;} \\ \mu \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=l} = \frac{1}{R_{b,b}} (F_b - F_N) \text{ — краевое условие;} \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \text{ — начальное условие,} \end{array} \right. \quad (15)$$

где α_n — коэффициент теплоотдачи между поверхностью ограждающей конструкции и наружным воздухом, Вт/(м²·°C); t_n — температура наружного воздуха, °C; t_1 — температура первого сечения ограждающей конструкции, °C; α_b — коэффициент теплоотдачи между поверхностью ограждающей конструкции и внутренним воздухом, Вт/(м²·°C); t_b — температура внутреннего воздуха, °C; t_N — температура материала в N -м сечении ограждающей конструкции, °C; $R_{b,n}$ — сопротивление влагообмену между поверхностью ограждающей конструкции и наружным воздухом, (м²·с·Па)/кг; F_n — потенциал влажности наружного воздуха, Па; F_1 — потенциал влажности материала первого сечения ограждающей конструкции, Па; $R_{b,b}$ — сопротивление

влагообмену между поверхностью ограждающей конструкции и внутренним воздухом, $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})/\text{кг}$; F_B — потенциал влажности внутреннего воздуха, Па; F_N — потенциал влажности материала в N -м сечении ограждающей конструкции, Па.

В случае многослойной ограждающей конструкции на стыке материалов имеет место неразрывность потока теплоты:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=v-0} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=v+0}, \quad (16)$$

где v — сечение ограждающей конструкции, содержащее стык материалов.

А также неразрывность потока потенциала влажности:

$$-\mu \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=v-0} = -\mu \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=v+0}. \quad (17)$$

Между временными периодами (месяцами) задается неразрывность массовой влажности:

$$w|_{\tau=\sigma-0} = w|_{\tau=\sigma+0}, \quad (18)$$

где σ — момент времени, содержащий разрыв между временными периодами, с.

Краевые условия

Температура и потенциал влажности внутреннего воздуха принимаются неизменными. Изменение температуры и потенциала влажности наружного воздуха представлено на рис. 1.

Решение уравнения нестационарного влагопереноса с помощью дискретно-континуального подхода

Для двухслойной ограждающей конструкции проведем дискретно-континуальную аппроксима-

Рис. 1. Граничные условия для влажностного и температурного полей снаружи конструкции: a — граничное условие для температурного поля; b — граничное условие для влажностного поля

Fig. 1. Boundary conditions for outside temperature and moisture distributions: a — boundary condition for temperature distribution; b — boundary condition for moisture distribution

цию пространственно-временной области [38–40]: по оси x частные производные заменяются конечными разностями, а по времени τ ищется решение в виде функций (рис. 2).

В результате получена система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\kappa_{F01}}{h_1^2} \cdot E_{t1} \left(- \left(1 + \frac{h_1}{R_{b,h} \cdot \mu_1} \right) F_1(\tau) + F_2(\tau) \right) + \\ + \frac{\kappa_{F01}}{h_1^2} \cdot E_{t1} \cdot \frac{h_1}{R_{b,h} \cdot \mu_1} \cdot F_H(\tau); \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\kappa_{F01}}{h_1^2} \cdot E_{ti} (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), \\ i = 2, 3, 4, \dots, v-1; \\ \frac{\partial F_v(\tau)}{\partial \tau} = d_{v-1} \cdot F_{v-1}(\tau) - d_v \cdot F_v(\tau) + d_{v+1} \cdot F_{v+1}(\tau); \\ \frac{\partial F_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\kappa_{F02}}{h_2^2} \cdot E_{ti} (F_{i-1}(\tau) - 2 \cdot F_i(\tau) + F_{i+1}(\tau)), \\ i = v+1, v+2, \dots, N-1; \\ \frac{\partial F_N(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\kappa_{F02}}{h_2^2} \cdot E_{tN} \left(F_{N-1}(\tau) - \left(1 + \frac{h_2}{R_{b,b} \cdot \mu_2} \right) F_N(\tau) \right) + \\ + \frac{\kappa_{F02}}{h_2^2} \cdot E_{tN} \cdot \frac{h_2}{R_{b,b} \cdot \mu_2} \cdot F_B; \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (19)$$

$$d_{v-1} = 2 \cdot E_{tv} \cdot \mu_1 / (h_1 (h_1 \cdot \gamma_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \gamma_{02} \cdot \xi_{F02})). \quad (20)$$

$$d_v = 2 \cdot E_{tv} \cdot \frac{\mu_1/h_1 + \mu_2/h_2}{h_1 \cdot \gamma_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \gamma_{02} \cdot \xi_{F02}}. \quad (21)$$

$$d_{v+1} = 2 \cdot E_{tv} \cdot \mu_2 / (h_2 (h_1 \cdot \gamma_{01} \cdot \xi_{F01} + h_2 \cdot \gamma_{02} \cdot \xi_{F02})). \quad (22)$$

где F_1 — потенциал влажности в первом сечении ограждающей конструкции, Па; κ_{F01} — осредненный коэффициент тепловлажностных свойств материала № 1, м²/(с·Па); E_{t1} — давление насыщенного водяного пара в сечении № 1 в ограждающей кон-

струкции, Па; h_1 — шаг по координате в материале № 1 ограждающей конструкции, м; μ_1 — коэффициент паропроницаемости материала № 1, кг/(м·с·Па); F_2 — потенциал влажности в сечении № 2 в ограждающей конструкции, Па; F_i — потенциал влажности в сечении № i в ограждающей конструкции, Па; E_{ti} — давление насыщенного водяного пара в сечении № i в ограждающей конструкции, Па; F_{i-1} — потенциал влажности в сечении № $(i-1)$ в ограждающей конструкции, Па; F_{i+1} — потенциал влажности в сечении № $(i+1)$ в ограждающей конструкции, Па; h_1 — шаг по координате материала № 1 в ограждающей конструкции, м; F_v — потенциал влажности в сечении № v в ограждающей конструкции, Па; d_{v-1} — коэффициент перед потенциалом влажности в сечении № $(v-1)$ в ограждающей конструкции, 1/с; F_{v-1} — потенциал влажности в сечении № $(v-1)$ в ограждающей конструкции, Па; d_v — коэффициент перед потенциалом влажности в сечении № v в ограждающей конструкции, 1/с; d_{v+1} — коэффициент перед потенциалом влажности в сечении № $(v+1)$ в ограждающей конструкции, 1/с; F_{v+1} — потенциал влажности в сечении № $(v+1)$ в ограждающей конструкции, Па; F_N — потенциал влажности в сечении № N в ограждающей конструкции, Па; κ_{F02} — осредненный коэффициент тепловлажностных свойств материала № 2, м²/(с·Па); F_{N-1} — потенциал влажности в сечении № $(N-1)$ в ограждающей конструкции, Па; h_2 — шаг по координате в материале № 2 в ограждающей конструкции, м; μ_2 — коэффициент паропроницаемости материала № 2, кг/(м·с·Па); E_{tv} — давление насыщенного водяного пара в сечении № v в ограждающей конструкции; γ_{01} — плотность материала № 1 в сухом состоянии, кг/м³; ξ_{F01} — осредненная постоянная относительная потенциальность ма-

Рис. 2. Дискретно-континуальная аппроксимация пространственно-временной области двухслойной ограждающей конструкции

Fig. 2. Discrete-continuous approximation of spatial-time domain of a two-layer enclosure

териала № 1, кг/кг; γ_{02} — плотность материала № 2 в сухом состоянии, кг/м³; ξ_{F02} — осредненная постоянная относительная потенциальность материала № 2, кг/кг.

Система уравнений (19) в матричном виде является задачей Коши:

$$\begin{cases} \bar{F}'_{\tau} = (G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}}) \cdot \bar{F} + p_{\text{мн}} \cdot \tau \cdot \bar{L} + \bar{B}_{\text{мн}}; \\ \bar{F}(0) = \bar{F}_0, \quad 0 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (23)$$

где

$$p_{\text{мн}} = \kappa_{F01} \cdot E_{\text{т1}} \cdot h_1 \cdot m / (R_{\text{в.н}} \cdot h_1^2 \cdot \mu_1). \quad (24)$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{v-1} & d_v & d_{v+1} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$K = \begin{pmatrix} \kappa_{F01}/h_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_{F01}/h_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \kappa_{F02}/h_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_{F02}/h_2^2 \end{pmatrix}.$$

$$E_{\text{тм}} = \begin{pmatrix} E_{\text{т1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{\text{т2}} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & E_{\text{т(N-1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{\text{тN}} \end{pmatrix} \cdot \bar{F}_0 = \begin{pmatrix} F_1(0) \\ F_2(0) \\ \dots \\ F_{N-1}(0) \\ F_N(0) \end{pmatrix}.$$

$$A_{\text{мн}} = \begin{pmatrix} -\frac{1+h_1}{R_{\text{в.н}} \cdot \mu_1} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1+h_2}{R_{\text{в.н}} \cdot \mu_2} \end{pmatrix}.$$

$$\bar{B}_{\text{мн}} = \begin{pmatrix} \kappa_{F01} \cdot E_{\text{т1}} \cdot h_1 \cdot n / (R_{\text{в.н}} \cdot h_1^2 \cdot \mu_1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \kappa_{F02} \cdot E_{\text{тN}} \cdot h_2 \cdot F_{\text{в}} / (R_{\text{в.н}} \cdot h_2^2 \cdot \mu_2) \end{pmatrix} \cdot \bar{L} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_{N-1} \\ F_N \end{pmatrix}, \quad \bar{F}'_{\tau} = \begin{pmatrix} F'_1(\tau) \\ F'_2(\tau) \\ \dots \\ F'_{N-1}(\tau) \\ F'_N(\tau) \end{pmatrix}.$$

Решение системы уравнений (23) приводит к аналитическому выражению:

$$\begin{aligned} \bar{F} = p_{\text{мн}} & \left((G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}})^{-2} e^{(G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}}) \cdot \tau} - \right. \\ & \left. - \tau (G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}})^{-1} - (G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}})^{-2} \right) \times \\ & \times \bar{L} + (G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}})^{-1} \left(e^{(G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}}) \cdot \tau} - E \right) \cdot \bar{B}_{\text{мн}} + \\ & + e^{(G + K \cdot E_{\text{тм}} \cdot A_{\text{мн}}) \cdot \tau} \cdot \bar{F}_0. \end{aligned} \quad (25)$$

Полученная формула (25) позволяет определять распределение потенциала влажности во всех сечениях ограждающей конструкции, на любой момент времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено сравнение результатов расчетов влажностного режима отдельных методов теории потенциала влажности F . Написаны три программы, которые позволяют рассчитывать влажностное состояние ограждающих конструкций на языке MATLAB. В основу первой программы заложено решение уравнения нестационарного влагопереноса методом конечных разностей по явной разностной схеме [37]; в основу второй — решение уравнения нестационарного влагопереноса дискретно-континуальным методом по выведенной формуле (25); третья программа основана на решении уравнения стационарного влагопереноса [36].

Исследование проводилось для четырех ограждающих конструкций: однослойная газобетонная стена, оштукатуренная снаружи и внутри; газобетонная стена, оштукатуренная с внутренней стороны; система фасадная теплоизоляционная композиционная из газобетона, утепленная минераловатными плитами, оштукатуренная снаружи и изнутри; система фасадная теплоизоляционная композиционная из газобетона, утепленная пенополистирольными плитами, оштукатуренная снаружи и изнутри. Ограждение возведено в г. Москве. Внутри поддерживаются постоянными: относительная влажность 55 % и температура 20 °С. Представлены результаты расчета влажностного состояния ограждающих конструкций на период максимального влагонакопления (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Из графиков видно, что наибольшая влажность для всех рассчитанных ограждающих конструкций достигается при решении стационарного уравнения влагопереноса. Фактически, решение стационарного уравнения влагопереноса показывает максимальное возможное влагонакопление в рамках существующей математической модели.

Рис. 3. Сравнение влажностного режима стен зданий, полученного отдельными методами теории потенциала влажности: *a* — стена из газобетона и глиняного кирпича; *b* — стена из газобетона и минеральной ваты; *c* — стена из газобетона и пенополистирола (1 — использование метода конечных разностей; 2 — использование дискретно-континуального метода; 3 — аналитическое решение стационарного уравнения влагопереноса; 4 — максимальная сорбиционная влажность)

Fig. 3. Comparison of building wall moisture conditions obtained by different moisture potential theory methods: *a* — wall of aerated concrete and clay bricks; *c* — wall of aerated concrete and mineral wool; *d* — wall of aerated concrete and foamed polystyrene (1 — use of finite difference method; 2 — use of discrete-continuous method; 3 — analytical solution of stationary equation of moisture transfer; 4 — maximum sorption moisture)

Распределение влажности, полученное при решении нестационарного уравнения влагопереноса методом конечных разностей, учитывает инерционность увлажнения. Однако для его использования необходимо применять численный метод. Полученные результаты демонстрируют, что с течением времени ограждение не успевает увлажниться до стационарного состояния.

Предложенное решение уравнения влагопереноса с помощью дискретно-континуального подхода дает возможность определить распределение влажности и количественно, и качественно совпадающее с решением уравнения влагопереноса методом конечных разностей, однако, данное распределение получается по аналитическому выражению (25), что упрощает расчет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования нестационарного влажностного режима ограждающих конструкций зданий разработан новый эффективный метод с применением дискретно-континуального подхода. Выведена формула для определения потенциала влажности по толще ограждающей конструкции.

Перспективой развития этого направления является исследование влияния граничных условий на влагоперенос и развитие других аналитических способов определения нестационарного влажностного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мусорина Т.А., Заборова Д.Д., Петриченко М.Р. Математический аппарат для определения термического сопротивления однородной скалярной среды // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 8. С. 1037–1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045
2. Poddaeva O., Kubenin A., Gribach D. Measures of improving the accuracy of the calculation of energy efficiency and energy saving of construction transport infrastructure // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 692. Pp. 490–497. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_52
3. Козлов В.В. Вопросы точности расчета приведенного сопротивления теплопередаче и температурных полей // Строительство и реконструкция. 2018. № 3 (77). С. 62–74.
4. Иванов В.В., Карасева Л.В., Тухомиров С.А. Теплообмен в пограничных слоях на излучающих поверхностях при градиентном течении // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46). С. 10.
5. Дацюк Т.А., Анишукова Е.А. Влияние тепло-влажностного режима теплых чердаков на состояние ограждающих конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5 (76). С. 160–165. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-160-165
6. Перехоженцев А.Г. Проектирование наружных стен высотных зданий с заданным температурно-влажностным режимом // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2017. № 48 (67). С. 48–60.
7. Береговой А.М., Береговой В.А. Температурно-влажностное состояние наружных ограждений в условиях фазовых переходов влаги и агрессивных воздействий среды // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 3 (32). С. 99–104.
8. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами // Лесной журнал. 2018. № 2 (362). С. 88–96. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88
9. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3
10. Kaczmarek A., Wesolowska M. Factors affecting humidity conditions of a face wall layer of a heated building // Procedia Engineering. 2017. Vol. 193. Pp. 205–210. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.205
11. Latif E., Wijeyesekera D.C., Mohammad S. Impact of moistened bio-insulation on whole building energy use // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 103. P. 03020. DOI: 10.1051/mateconf/201710303020
12. Hroudova J., Korjenic A., Zach J., Mitterböck M. Entwicklung eines Wärmedämmputzes mit Naturfasern und Untersuchung des Wärme- und Feuchteverhaltens // Bauphysik. 2017. Vol. 39. Issue 4. Pp. 261–271. DOI: 10.1002/bapi.201710030
13. Almeida R.M.S.F., Barreira E. Monte Carlo simulation to evaluate mould growth in walls: The effect of insulation, orientation, and finishing coating // Advances in Civil Engineering. 2018. P. 8532167. DOI: 10.1155/2018/8532167
14. Guimaraes A.S., Ribeiro I.M., de Freitas V.P. Numerical models performance to predict drying liquid water in porous building materials: Comparison of experimental and simulated drying water content profiles //

Cogent engineering. 2017. Vol. 4. Issue 1. P. 1365572. DOI: 10.1080/23311916.2017.1365572

15. *Guimaraes A.S., Ribeiro I.M., Freitas T.S.* TRHUMIDADE — A water diffusivity model to predict moisture content profiles // Cogent engineering. 2018. Vol. 5. Issue 1. P. 1459007. DOI: 10.1080/23311916.2018.1459007

16. *Melin C.B., Hagentoft C.E., Holl K., Nik V.M., Kilian R.* Simulations of moisture gradients in wood subjected to changes in relative humidity and temperature due to climate change // Geosciences. 2018. Vol. 8. Issue 10. P. 378. DOI: 10.3390/geosciences8100378

17. *Gamayunova O., Musorina T., Ishkov A.* Humidity distributions in multilayered walls of high-rise buildings // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. P. 02045. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302045

18. *Belkharouch D., Chaker A.* Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. Issue 17. Pp. 7119–7125. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.160

19. *Jin H.Q., Yao X.-L., Fan L.-W., Xu X., Yu Z.-T.* Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 92. Pp. 589–602. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.103

20. *Hoseini A., Bahrami A.* Effects of humidity on thermal performance of aerogel insulation blankets // Journal of Building Engineering. 2017. Vol. 13. Pp. 107–115. DOI: 10.1016/j.jobbe.2017.07.001

21. *Georget F., Prevost J.H., Huet B.* Impact of the microstructure model on coupled simulation of drying and accelerated carbonation // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 104. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.11.008

22. *Пастушков П.П., Гринфельд Г.И., Павленко Н.В., Беспалов А.Е., Коркина Е.В.* Расчетное определение эксплуатационной влажности автоклавного газобетона в различных климатических зонах строительства // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 60–69. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.60-69

23. *Пастушков П.П.* Влияние влажностного режима ограждающих конструкций с наружными штукатурными слоями на энергоэффективность теплоизоляционных материалов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 169 с.

24. *Алексеев В.Н., Михеева Ю.Л.* Воздействия климатических факторов на температурно-влажностный режим ограждающих конструкций православных храмов XVIII–XIX веков // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 1 (17). С. 20–28.

25. *Алексеев В.Н., Михеева Ю.Л.* Результаты исследования температурно-влажностного режима Петропавловского собора в городе Симферополе //

Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 46–51.

26. *Kupriyanov V.N., Shafigullin R.I.* Protective characteristics of enclosing structures exposed to electromagnetic radiation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022061. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022061

27. *Petrov A.S., Kupriyanov V.N.* Determination of humidity conditions of enclosing structures by the color indicator method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064

28. *Петров А.С., Юзмухаметов А.М., Куприянов В.Н., Андрейцева К.С.* Определение характера увлажнения ограждающих конструкций экспериментальным методом цветовой индикации // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 24–28. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28

29. *Ельчищева Т.Ф.* Безопасная эксплуатация наружных ограждающих конструкций зданий при неблагоприятном воздействии среды // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 5 (128). С. 570–588. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588

30. *Ельчищева Т.Ф., Ерофеев В.Т., Лобанов В.А.* Определение солевого содержания в материале наружных стен здания промышленного предприятия // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 34–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-34-39

31. *Фокин К.Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

32. *Лыков А.В.* Теоретические основы строительной теплофизики. Минск : Изд-во академии наук БССР, 1961. 525 с.

33. *Künzel H.M.* Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart : IRB Verlag, 1995. 65 p.

34. *Лукьянов В.И.* Нестационарный массоперенос в строительных материалах и конструкциях при решении проблемы повышения защитных качеств ограждающих конструкций зданий с влажным и мокрым режимом : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 653 с.

35. *Богословский В.Н.* Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий : мон. М. : МГСУ, 2013. 112 с.

36. *Гагарин В.Г., Козлов В.В., Зубарев К.П.* Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной толщиной теплоизоляционного слоя // Жилищное строительство. 2016. № 6. С. 8–12.

37. *Гагарин В.Г., Зубарев К.П.* Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений //

Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4 (127). С. 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495

38. Gagarin V., Akhmetov V., Zubarev K. Assessment of enclosing structure moisture regime using moisture potential theory // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 03053. DOI: 10.1051/matec-conf/201819303053

39. Gagarin V., Akhmetov V., Zubarev K. Moisture behavior calculation of single-layer enclosing struc-

ture by means of discrete-continuous method // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 170. P. 03014. DOI: 10.1051/matecconf/201817003014

40. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Unsteady-state moisture behavior calculation for multilayer enclosing structure made of capillary-porous materials // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 177. P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012021

Поступила в редакцию 31 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 2 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 31 января 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Геннадьевич Гагарин — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией строительной теплофизики, член-корреспондент РААСН; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; РИНЦ ID: 292976, Scopus: 7003607376, Researcher ID: A-6011-2016, ORCID: 0000-0002-4810-6432; gagarinv@gmail.com; yandex.ru;

Кирилл Павлович Зубарев — преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 831037, Scopus: 57202815810, Researcher ID: F-6850-2019, ORCID: 0000-0002-7609-8521; ZubarevKP@gic.mgsu.ru.

REFERENCES

1. Musorina T.A., Zaborova D.D., Petrichenko M.R. Mathematical apparatus for determination of homogenous scalar medium thermal resistance. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(8):1037-1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045 (rus.).

2. Poddaeva O., Kubenin A., Gribach D. Measures of improving the accuracy of the calculation of energy efficiency and energy saving of construction transport infrastructure. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 692:490-497. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_52

3. Kozlov V.V. Accuracy of calculation of the resistant resistance of heat transfer and temperature fields. *Building and reconstruction*. 2018; 3(77):62-74. (rus.).

4. Ivanov V.V., Karaseva L.V., Tikhomirov S.A. Heat transfer in boundary layers on radiating surfaces with gradient flow. *Engineering Journal of Don*. 2017; 3(46):10. (rus.).

5. Datciuk T.A., Anshukova E.A. Impact of the heat-humidity regime of warm attics on the condition of enclosing structures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 5(76):160-165. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-160-165 (rus.).

6. Perekhozhentsev A.G. Design of external walls of high-rise buildings with specified temperature and humidity conditions. *Bulletin of Volgograd State Univer-*

sity of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2017; 48(67):48-60. (rus.).

7. Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. Temperature-moisture state of external enclosure structures in the conditions of phase transitions of moisture and aggressive impact of the environment. *Regional Architecture and Engineering*. 2017; 3(32):99-104. (rus.).

8. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Starova E.V., Mikov A.A. Wood drying processes under essentially nonisothermal conditions. *Russian Forestry Journal*. 2018; 2(362):88-96. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88 (rus.).

9. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: Science and Education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

10. Kaczmarek A., Wesolowska M. Factors affecting humidity conditions of a face wall layer of a heated building. *Procedia Engineering*. 2017; 193:205-210. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.205

11. Latif E., Wijeyesekera D.C., Mohammad S. Impact of moistened bio-insulation on whole building energy use. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 103:03020. DOI: 10.1051/matecconf/201710303020

12. Hroudova J., Korjenic A., Zach J., Mitterböck M. Development of a thermal insulation plaster with natural fibres and the investigation of its heat and

moisture behaviour. *Bauphysik*. 2017; 39(4):261-271. DOI: 10.1002/bapi.201710030 (ger.).

13. Almeida R.M.S.F., Barreira E. Monte Carlo simulation to evaluate mould growth in walls: The effect of insulation, orientation, and finishing coating. *Advances in Civil Engineering*. 2018; 8532167. DOI: 10.1155/2018/8532167

14. Guimaraes A.S., Ribeiro I.M., de Freitas V.P. Numerical models performance to predict drying liquid water in porous building materials: Comparison of experimental and simulated drying water content profiles. *Cogent engineering*. 2017; 4(1):1365572. DOI: 10.1080/23311916.2017.1365572

15. Guimaraes A.S., Ribeiro I.M., Freitas T.S. TRHUMIDADE — A water diffusivity model to predict moisture content profiles. *Cogent engineering*. 2018; 5(1):1459007. DOI: 10.1080/23311916.2018.1459007

16. Melin C.B., Hagentoft C.E., Holl K., Nik V.M., Kilian R. Simulations of moisture gradients in wood subjected to changes in relative humidity and temperature due to climate change. *Geosciences*. 2018; 8(10):378. DOI: 10.3390/geosciences8100378

17. Gamayunova O., Musorina T., Ishkov A. Humidity distributions in multilayered walls of high-rise buildings. *E3S Web of Conferences*. 2018; 33:02045. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302045

18. Belkharchouche D., Chaker A. Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41(17):7119-7125. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.160

19. Jin H.Q., Yao X.-L., Fan L.-W., Xu X., Yu Z.-T. Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 92:589-602. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.103

20. Hoseini A., Bahrami A. Effects of humidity on thermal performance of aerogel insulation blankets. *Journal of Building Engineering*. 2017; 13:107-115. DOI: 10.1016/j.jobbe.2017.07.001

21. Georget F., Prevost J.H., Huet B. Impact of the microstructure model on coupled simulation of drying and accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*. 2018; 104:1-12. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.11.008

22. Pastushkov P.P., Grinfel'd G.I., Pavlenko N.V., Beshpalov A.E., Korkina E.V. Settlement determination of operating moisture of autoclaved aerated concrete in different climatic zones. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 2:60-69. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.60-69 (rus.).

23. Pastushkov P.P. *Influence of the moisture regime of enclosing structures with external plaster layers to the energy efficiency of heat-insulating materials : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2013; 169. (rus.).

24. Alekseenko V.N., Mikheyeva Yu.L. Effects of climatic factors on the temperature and humidity conditions enclosing structures orthodox churches XVIII–XIX centuries. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2017; 1(17):20-28. (rus.).

25. Alekseenko B.N., Miheeva Y.L. Results of the study of temperature-humidity regime of the cathedral of St. Peter and Paul in the city of Simferopol. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 7:46-51. (rus.).

26. Kupriyanov V.N., Shafigullin R.I. Protective characteristics of enclosing structures exposed to electromagnetic radiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022061. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022061

27. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Determination of humidity conditions of enclosing structures by the color indicator method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064

28. Petrov A.S., Yuzmuhametov A.M., Kupriyanov V.N., Andreitseva K.S. Determination of the nature of humidification of enclosing structures by experimental method of color indication. *Construction Materials Russia*. 2019; 6:24-28. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28 (rus.).

29. Elchishcheva T.F. Safe usage of external enclosures under adverse environmental exposure. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14:5(128):570-588. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588 (rus.).

30. Elchishcheva T.F., Erofeev V.T., Lobanov V.A. Determination of salt content in the material of external walls of the building of an industrial enterprise. *Construction materials Russia*. 2019; 6:34-39. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-34-39 (rus.).

31. Fokin K.F. *Building heat engineering of enclosing parts of buildings*. Moscow, ABOK-PRESS Publ., 2006; 256. (rus.).

32. Lykov A.V. *Theoretical foundations of building thermal physics*. Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR, 1961; 525. (rus.).

33. Künzle H.M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart, IRB Verlag, 1995; 65.

34. Lukyanov V.I. *Unsteady-state mass transfer in building materials and structures when the problem of improving the protective properties of enclosing structures of buildings with moist and wet conditions is solved : diss. ... dr. tech. sciences*. Moscow, 1993; 653. (rus.).

35. Bogoslovskiy V.N. *Fundamentals of material potential moisture theory in respect to the outer building envelope: monograph*. Moscow, MGSU, 2013; 112. (rus.).

36. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P. Analysis of the zone location of maximum moistening

in the wall system with different thickness of insulation layer. *Housing construction*. 2016; 6:8-12. (rus.).

37. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:4(127):484-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495 (rus.).

38. Gagarin V., Akhmetov V., Zubarev K. Assessment of enclosing structure moisture regime using moisture potential theory. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03053. DOI: 10.1051/mateconf/201819303053

39. Gagarin V., Akhmetov V., Zubarev K. Moisture behavior calculation of single-layer enclosing structure by means of discrete-continuous method. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:03014. DOI: 10.1051/mateconf/201817003014

40. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Unsteady-state moisture behavior calculation for multilayer enclosing structure made of capillary-porous materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 177:012021. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012021

Received October 31, 2019.

Adopted in a revised form on November 2, 2019.

Approved for publication on January 31, 2020.

BIONOTES: **Vladimir G. Gagarin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of thermal laboratory, Corresponding Member of RAACS; **Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Science (NIISF RAACS)**; 21 Lokomotivnyy travel, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RISC: 292976, Scopus: 7003607376, Researcher ID: A-6011-2016, ORCID: 0000-0002-4810-6432; gagarinv@yandex.ru;

Kirill P. Zubarev — teacher of the Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 831037, Scopus: 57202815810, Researcher ID: F-6850-2019, ORCID: 0000-0002-7609-8521; ZubarevKP@gic.mgsu.ru.