Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений

В.Г. Гагарин¹, К.П. Зубарев²

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследованы известные методы оценки нестационарного влагопереноса в ограждающих конструкциях, предложенные К.Ф. Фокиным. Первый из них описывает влагоперенос в сорбционной зоне, а второй позволяет проводить расчет и в сверхсорбционной зоне. Описано введение В.Н. Богословским «термодинамического потенциала влажности» материалов ограждающих конструкций. Показано развитие В.Г. Гагариным и В.В. Козловым потенциала влажности F , который позволяет единообразно описывать движение водяного пара и жидкой влаги в материале. Научная новизна исследования заключается в разработке метода расчета, основанного на потенциале влажности F . Практическая значимость состоит в возможности получения расчетным путем значений эксплуатационной влажности материалов ограждений для практической инженерной работы.

Материалы и методы. На основе физических представлений о процессе выведено уравнение влагопереноса. Сформулирована математическая модель, состоящая из уравнения теплопроводности, полученного уравнения влагопереноса, пространственно-временной области, краевых и начальных условий. Распределение потенциала влажности в стенах зданий получено по методу конечных разностей.

Результаты. Проведены расчеты по разработанной математической модели для четырех видов ограждений: однослойной газобетонной стены; стены с основанием из газобетона и облицовкой из глиняного кирпича; стены с основанием из газобетона и утеплителем из минеральной ваты с тонким слоем штукатурки; стены с основанием из газобетона и утеплителем из пенополистирола с тонким слоем штукатурки.

Выводы. Полученная эксплуатационная влажность материалов ограждающих конструкций зданий по расчету оказалась ниже, чем указано в нормативных документах. Представленные результаты дают возможность уточнить определение тепловых потерь здания и проектирование системы отопления. В рамках разработанной теории доказаны ранее полученные данные по определению положения плоскости максимального увлажнения: для конструкций с основанием из газобетона и утеплителем из минеральной ваты положение максимума влаги приходится на стык слоев утеплителя и штукатурки; для конструкций с основанием из газобетона и утеплителем из пенополистирола положение максимума влаги находится в толще слоя утеплителя.

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

Благодарности. Авторы выражают благодарность кандидату технических наук В.В. Козлову и доктору технических наук, профессору В.К. Ахметову за обсуждение и полезные замечания в ходе выполнения работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495

Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime

Vladimir G. Gagarin¹, Kirill P. Zubarev²

¹ Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Science (NIISF RAACS), 21 Locomotive travel, Moscow, 127238, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavlshoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Known calculation methods for enclosing structure unsteady-state moisture regime proposed by K.F. Fokin, are examined. The first one describes moisture transfer in a sorption zone, and another allows calculation in oversorption zone also. "Thermodynamic moisture potential" of enclosing structure materials introduced by V.N. Bogoslovsky is described. Moisture potential F developed by V.G. Gagarin and V.V. Kozlov is shown. The moisture potential F allows describing water vapor and liquid moisture movement in material in a consistent way. The scientific novelty of the study is the development of calculation method based on moisture potential F . Practical relevance of the study is the possibility to obtain performance humidity values of enclosing structure materials by means of calculations for engineering practice.

Materials and methods. A moisture transfer equation is derived on the basis of process physical interpretation, A mathematical model, consisting of heat conductivity equation, derived moisture transfer equation, spatial-time domain, boundary and initial conditions, is formulated. Moisture potential in single-layer and multilayer enclosing structures is determined using finite difference method.

Results. Calculations for four types of enclosing structures are made on the basis of the proposed mathematical model: single-layer aerated concrete wall; a wall made of aerated concrete masonry base and clay brick cladding; a wall made of aerated concrete masonry base and mineral wool insulation with thin plaster layer; a wall made of aerated concrete masonry base and expanded polystyrene insulation with thin plaster layer.

Conclusions. Calculated performance humidity values of enclosing structure materials were lower than values stated in regulatory documents. The presented results allow to define building heat loss definition and heating system design more accurately. Specification data on maximum wetting plane position obtained earlier were proved within the framework of the developed theory: in enclosing structures with aerated concrete base and mineral wool insulation maximum moisture content is located at the joint of plaster and insulation layers; in enclosing structures with aerated concrete base and expanded polystyrene insulation maximum moisture content is located in the insulation layer.

KEYWORDS: energy saving, enclosing structure, mathematical model, heat moisture transfer, temperature and humidity conditions, humidity conditions, humidity, moisture transfer, moistening, mass transfer

Acknowledgements. Authors are deeply indebted to V.V. Kozlov, PhD in Technical Sciences, and V.K. Akhmetov, Doctor of Engineering Science, Professor, for discussion and useful comment in the course of study.

FOR CITATION: 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):484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных и актуальных направлений развития строительства является определение влажностного состояния ограждающих конструкций зданий. Проблематика влажностного режима представляет собой целый комплекс исследований.

Для определения количества влаги и характера ее качественного распределения в ограждениях разрабатываются методы расчета влажностного режима [1–9]. Для инженерной работы развиваются различные методы, основанные на балансе влагопереноса [10]. Отдельный интерес представляют уточнения граничных условий задачи тепловлагопереноса под действием различных эксплуатационных факторов [11].

Проверка результатов расчета влажностного режима проводится при натурных исследованиях ограждающих конструкций [12–14] и при лабораторных экспериментах [15]. Результаты расчета влажностного режима позволяют уточнить тепловые потери здания [16–19], его долговечность [20], защиту человека от электромагнитного излучения [21].

Влагоперенос в сорбционной зоне увлажнения

Первые представления о влагопереносе были связаны с движением парообразной влаги по толще ограждающей конструкции под действием градиента парциального давления водяного пара. Влагоперенос описывался уравнением [22]:

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

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

На краях ограждающей конструкции задаются краевые условия влагообмена третьего рода [22]:

$$-\mu \frac{\partial e}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{R_{в.н}} (e_n - e_1), \quad (2)$$

где $R_{в.н}$ — сопротивление влагообмену между наружным воздухом и поверхностью ограждающей конструкции, (м²·с·Па)/кг; e_n — парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па; e_1 — парциальное давление водяного пара, соприкасающегося с наружным воздухом сечения ограждающей конструкции, Па.

$$\mu \frac{\partial e}{\partial x} \Big|_{x=l} = \frac{1}{R_{в.в}} (e_b - e_N), \quad (3)$$

где $R_{в.в}$ — сопротивление влагообмену между внутренним воздухом и поверхностью ограждающей конструкции, (м²·с·Па)/кг; e_b — парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па; e_N — парциальное давление водяного пара, соприкасающегося с внутренним воздухом сечения ограждающей конструкции, Па; l — толщина ограждающей конструкции, м.

Для многослойной ограждающей конструкции между слоями материала задается условие непрерывности потока парообразной влаги [22]:

$$-\mu \frac{\partial e}{\partial x} \Big|_{x=v-0} = -\mu \frac{\partial e}{\partial x} \Big|_{x=v+0}, \quad (4)$$

где v — сечение ограждающей конструкции, где находится стык материалов.

Для упрощения расчета исследуется стационарная задача теплопроводности в течение выбранного периода времени:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) = 0. \quad (5)$$

На краях ограждающей конструкции задаются краевые условия теплообмена третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (t_n - t_1), \quad (6)$$

где α_n — коэффициент теплоотдачи между наружным воздухом и поверхностью ограждающей конструкции, Вт/(м² · °C); t_n — температура наружного воздуха, °C; t_1 — температура соприкасающегося с наружным воздухом сечения ограждающей конструкции, °C.

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha_b (t_b - t_N), \quad (7)$$

где α_b — коэффициент теплоотдачи между внутренним воздухом и поверхностью ограждающей конструкции, Вт/(м² · °C); t_b — температура внутреннего воздуха, °C; t_N — температура материала у соприкасающейся с внутренним воздухом поверхности ограждающей конструкции, °C.

Для многослойной ограждающей конструкции между слоями материала задаются условия непрерывности потока теплоты:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=v-0} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=v+0}. \quad (8)$$

Между временными периодами задается условие непрерывности влажности ограждающей конструкции.

Между температурным и влажностными полями связь может быть определена по известной зависимости:

$$E_i(t) = 1,84 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-5330 / (273 + t)). \quad (9)$$

Из физики процесса следует ограничение [22]:

$$e \leq E_i. \quad (10)$$

Совместный влагоперенос в сорбционной и сверхсорбционной зонах увлажнения

Изложенный метод может успешно использоваться для определения нестационарного влажностного режима в сорбционной зоне увлажнения. Однако на практике часто встречаются случаи, когда помимо движения парообразной влаги необходимо оценить еще движение жидкой влаги.

Для этого было предложено дифференциальное уравнение влагопереноса, которое использовалось в сверхсорбционной зоне [22]:

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta(w) \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial E_i(t)}{\partial x} \right), \quad (11)$$

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

На границе слоев материалов в сверхсорбционной зоне влага распределялась по соотношению:

$$\frac{1}{c_1} \cdot \frac{\partial (\gamma_{01} \cdot w_1)}{\partial \tau} \Big|_{x=v-0} = \frac{1}{c_2} \cdot \frac{\partial (\gamma_{02} \cdot w_2)}{\partial \tau} \Big|_{x=v+0}, \quad (12)$$

где γ_{01} , γ_{02} — плотности, соответственно, первого и второго материала, кг/м³; w_1 , w_2 — массовая влажность, соответственно, первого и второго материала, кг/кг; c_1 , c_2 — среднесуточные скорости капиллярного всасывания, соответственно, первого и второго материала, м/с.

Описанный метод предполагал перенос влаги в виде водяного пара в сорбционной зоне увлажнения по уравнению (1), а для сверхсорбционной зоны использовать уравнение (11).

Использование потенциала влажности для единообразного учета движения жидкой и парообразной влаги

В последующем были развиты методы, основанные на теории потенциала влажности, который позволял не рассчитывать изменение частных потенциалов переноса, а решать задачу относительно единого потенциала влажности. В строительную теплофизику впервые потенциал влажности введен В.Н. Богословским. Такой подход позволил сформулировать уравнение влагопереноса относительно потенциала влажности, не разделяя поток влаги на отдельные составляющие [23]. Сложность применения разработок В.Н. Богословского заключается в трудности получения экспериментальных данных [23].

Существовали и другие потенциалы влажности, например, потенциал А.В. Лыкова. А.В. Лыков разработал две основных математических модели. Первая представляла движение влаги в капиллярно-пористом теле под действием градиентов потенциала влажности и температуры, а вторая — движение влаги под действием градиентов потенциала влажности, температуры и потенциала фильтрационного

движения. Таким образом, применение уравнений влагопереноса А.В. Лыкова все равно приводит к расчету относительно нескольких потенциалов переноса [24]. Аналогичные трудности можно отметить при работе с зарубежными потенциалами влажности К. Kiessl [25], Н.М. Künzel [26].

В.Г. Гагариным и В.В. Козловым был разработан потенциал влажности F , позволяющий единообразно учитывать движение парообразной и жидкой влаги, и получен конкретный вид этого потенциала [27]:

$$F(w, t) = E_t(t) \cdot \varphi(w) + \frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta, \quad (13)$$

где F — потенциал влажности, Па.

Методами векторного анализа было показано, что функция (13) удовлетворяет необходимым условиям, являясь потенциалом векторного поля влагопереноса.

Фактически потенциал влажности (13) позволяет не использовать градиенты отдельных потенциалов переноса (влажности и парциального давления водяного пара). При использовании потенциала влажности (13) совместный влагоперенос пара и жидкости происходит под действием градиента потенциала влажности.

Плотность потока потенциала влажности [27]:

$$g = -\mu \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (14)$$

где g — плотность потока влаги, кг/(м²·с).

Для использования уравнения (13) необходимо для каждого материала исследуемого ограждения провести три эксперимента: определить коэффициент паропроницаемости¹, определить статическую влажностную проводимость², определить изотерму сорбции³, которые определяются по соответствующим ГОСТам.

ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка математической модели нестационарного влажностного режима ограждающей конструкции, основанная на потенциале влажности F .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вывод уравнения влагопереноса

Известно, что градиент влажности по времени связан с градиентом плотности потока влаги по координате [28]:

¹ ГОСТ 25898-2012. Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропрохождению.

² ГОСТ Р 56504-2015. Материалы строительные. Методы определения коэффициентов влажностной проводимости.

³ ГОСТ 24816-2014. Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности.

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = -\frac{\partial g}{\partial x}. \quad (15)$$

Используем известное соотношение между влажностью, потенциалом влажности и температурой [28]:

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \gamma_0 \cdot \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} + \gamma_0 \cdot \frac{\partial w}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (16)$$

В уравнении (16) пренебрежем влиянием производной влажности по температуре:

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \gamma_0 \cdot \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau}. \quad (17)$$

Подставляя (14), (17) в (15), получим:

$$\gamma_0 \cdot \frac{\partial w}{\partial F(w, t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial F(w, t)}{\partial x} \right). \quad (18)$$

Производную влажности по потенциалу влажности определяем из уравнения (13):

$$\frac{\partial w}{\partial F(w, T)} = \left(\frac{1}{\mu} \beta(w) + \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} E_t(t) \right)^{-1}. \quad (19)$$

Подставляем (19) в (18):

$$\begin{aligned} \gamma_0 \cdot \left(\frac{1}{\mu} \beta(w) + \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} E_t(t) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial F(w, t)}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Введем новую величину «относительная потенциальная емкость» ξ_F :

$$\xi_F(w, t) = \left(\frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} + \frac{1}{\mu \cdot E_t(t)} \beta(w) \right)^{-1}, \quad (21)$$

где ξ_F — относительная потенциальная емкость, кг/кг.

Относительная потенциальная емкость ξ_F является полным аналогом «относительной пароемкости» ξ_0 в уравнении (1). Однако значение относительной потенциальной емкости может быть определено как в сорбционной, так и в сверхсорбционной зонах.

Подставим (21) в (20):

$$\frac{\gamma_0 \cdot \xi_F(w, t)}{E_t(t)} \cdot \frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial F(w, t)}{\partial x} \right). \quad (22)$$

Дифференциальное уравнение влагопереноса (22) является полным аналогом уравнения (1), однако, работает единообразно как в сорбционной, так и в сверхсорбционной зонах.

В случае однослойной ограждающей конструкции уравнение (22) примет вид:

$$\frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\gamma_0 \cdot \xi_F(w, t)} \cdot E_i(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2}. \quad (23)$$

Введем новую величину «коэффициент относительной теплопроводности»:

$$\kappa_F(w, t) = \frac{\mu}{\gamma_0 \cdot \xi_F(w, t)}, \quad (24)$$

где κ_F — относительная теплопроводность, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$.

Подставляя (24) в (23), получим более компактную запись уравнения влагопереноса:

$$\frac{\partial F(w, t)}{\partial \tau} = \kappa_F(w, t) \cdot E_i(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, t)}{\partial x^2}. \quad (25)$$

Краевые условия

Для уравнения (25) задаются краевые условия влагообмена третьего рода. Для многослойных ограждающих конструкций на стыке материалов применяется непрерывность потока потенциала влажности. При этом в течение месяца исследуется стационарное распределение температуры, т.е. выполняется уравнение (5) с краевыми условиями (6), (7). Для многослойных ограждающих конструкций выполняется уравнение (8) на стыке слоев.

Принимаются постоянными в течение всего времени расчета: температура, потенциал влажности внутреннего воздуха. Температура наружного воздуха изменяется скачкообразно между месяцами и приравнивается к среднемесячным значениям температуры, а потенциал влажности наружного воздуха изменяется по кусочно-линейной функции между среднемесячными значениями парциального давления водяного пара в течение всего времени расчета:

$$F_n = m \cdot \tau + n, \quad (26)$$

где m — тангенс угла наклона прямой на графике зависимости потенциала влажности наружного воздуха от времени, Па/с ; n — подъем прямой на графике зависимости потенциала влажности наружного воздуха от времени, Па .

Математическая модель нестационарного влажностного режима, основанная на потенциале влажности F

Предлагаемая математическая модель нестационарного влажностного режима для однослойной ограждающей конструкции содержит уравнение теплопроводности, предложенное дифференциальное уравнение влагопереноса, уравнение зависимости парциального давления насыщенного водяного пара от температуры, пространственно-временную область, содержащую толщину ограждающей конструкции и время от начала расчета, начальные и краевые условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \text{ — уравнение теплопроводности;} \\ \frac{\partial F(w, T)}{\partial \tau} = \kappa_F(w, t) \cdot E_i(t) \cdot \frac{\partial^2 F(w, T)}{\partial x^2} \text{ — уравнение влагопереноса;} \\ E_i(t) = 1,84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273+t}\right) \text{ — связь давления насыщения и температуры;} \\ 0 \leq x \leq l, \tau > 0 \text{ — пространственно-временная область;} \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n(t_n - t_1) \text{ — краевое условие;} \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha_b(t_b - t_N) \text{ — краевое условие;} \\ -\mu \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{R_{b,n}}(F_n - F_1) \text{ — краевое условие;} \\ \mu \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=l} = \frac{1}{R_{b,b}}(F_b - F_N) \text{ — краевое условие;} \\ F(x, 0) = f(x), 0 \leq x \leq l \text{ — начальное условие.} \end{array} \right. \quad (27)$$

Для многослойной ограждающей конструкции к системе (27) добавляются еще условия непрерывности потока потенциала влажности и условие непрерывности потока теплоты.

Определение нестационарного влажностного режима ограждающих конструкций методом конечных разностей по явной разностной схеме

В случае двухслойной ограждающей конструкции распределение потенциала влажности по методу конечных разностей будет определено в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1^{k+1} = F_1^k + \Delta \tau \frac{\kappa_{F1}^k}{h_1^2} E_{t1}^k \left(-\left(1 + \frac{h_1}{\mu R_{b,n}}\right) F_1^k + F_2^k \right) + \\ + \Delta \tau \frac{\kappa_{F1}^k}{h_1^2} E_{t1}^k \frac{h_1}{\mu R_{b,n}} F_n^k; \\ F_i^{k+1} = F_i^k + \Delta \tau \frac{\kappa_{Fi}^k}{h_i^2} E_{ti}^k (F_{i+1}^k - 2 \cdot F_i^k + F_{i-1}^k), \\ i = 2, \dots, v-1, k = 0, 1, \dots; \\ F_v^{k+1} = F_v^k + 2 \cdot E_{tv}^k \times \\ \times \Delta \tau \frac{(F_{v-1}^k - F_v^k) \frac{\mu_1}{h_1} - (F_v^k - F_{v+1}^k) \frac{\mu_2}{h_2}}{h_1 \cdot \gamma_{01} \cdot \xi_{F1v}^k + h_2 \cdot \gamma_{02} \cdot \xi_{F2v}^k}; \\ F_i^{k+1} = F_i^k + \Delta \tau \frac{\kappa_{Fi}^k}{h_i^2} E_{ti}^k (F_{i+1}^k - 2 \cdot F_i^k + F_{i-1}^k), \\ i = v+1, \dots, N-1, k = 0, 1, \dots; \\ F_N^{k+1} = F_N^k + \Delta \tau \frac{\kappa_{FN}^k}{h_2^2} E_{tN}^k \left(F_{N-1}^k - \left(1 + \frac{h_2}{\mu R_{b,b}}\right) F_N^k \right) + \\ + \Delta \tau \frac{\kappa_{FN}^k}{h_2^2} E_{tN}^k \frac{h_2}{\mu R_{b,b}} F_b^k. \end{array} \right. \quad (28)$$

где F_1^k — потенциал влажности в первом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_2^k — потенциал влажности во втором сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_1^{k+1} — потенциал влажности в первом сечении ограждающей конструкции на $(k+1)$ -ом шаге по времени, Па; F_n^k — потенциал влажности наружного воздуха на k -ом шаге по времени, Па; κ_{F1}^k — коэффициент относительной теплопроводности в первом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, м²/(с·Па); E_{i1}^k — давление насыщенного водяного пара в первом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_{i-1}^k — потенциал влажности в $(i-1)$ -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_i^k — потенциал влажности в i -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_i^{k+1} — потенциал влажности в i -ом сечении ограждающей конструкции на $(k+1)$ -ом шаге по времени, Па; E_{ii}^k — давление насыщенного водяного пара в i -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_{N-1}^k — потенциал влажности в $(N-1)$ -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_N^k — потенциал влажности в N -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_N^{k+1} — потенциал влажности в N -ом сечении ограждающей конструкции на $(k+1)$ -ом шаге по времени, Па; F_b^k — потенциал влажности внутреннего воздуха на k -ом шаге по времени, Па; κ_{F2N}^k — коэффициент относительной теплопроводности в N -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, м²/(с·Па); E_{iN}^k — давление насыщенного водяного пара в N -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; Δt — шаг по времени, с; κ_{F1i}^k — коэффициент относительной теплопроводности первого материала (ближе к наружной поверхности ограждения) в i -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, м²/(с·Па); κ_{F2i}^k — коэффициент относительной теплопроводности второго материала (ближе к внутренней поверхности ограждения) в i -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, м²/(с·Па); h_1 — шаг по координате для первого материала, м; h_2 — шаг по координате для второго материала, м; γ_{01} — плотность первого материала в сухом состоянии, кг/м³; γ_{02} — плотность второго материала в сухом состоянии, кг/м³; ξ_{F1v}^k — относительная теплоемкость первого материала на стыке слоев v на k -ом шаге по времени, кг/кг; ξ_{F2v}^k — относительная теплоемкость второго материала на стыке слоев v на k -ом шаге по времени, кг/кг; E_{iv}^k — давление насыщенного водяного пара на стыке слоев v на k -ом шаге по времени, Па; F_v^k — потенциал влажности на стыке слоев v на k -ом шаге по вре-

мени, Па; F_{v-1}^k — потенциал влажности в $(v-1)$ -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_{v+1}^k — потенциал влажности в $(v+1)$ -ом сечении ограждающей конструкции на k -ом шаге по времени, Па; F_v^{k+1} — потенциал влажности на стыке слоев v на $(k+1)$ -ом шаге по времени, Па.

Устойчивость явной разностной схемы для (28) достигается введением ограничения на шаг по времени:

$$\Delta t \leq \frac{h^2}{2 \cdot \kappa_F \cdot E_i}. \quad (29)$$

Алгоритм расчета нестационарного влажностного режима

1. Задается начальное распределение потенциала влажности в ограждающей конструкции и выбирается начальный момент времени.
2. Производится расчет распределения потенциала влажности на конец месяца по системе (28).
3. Определяется влажностный режим ограждающей конструкции на конец месяца с помощью формулы (13).
4. По климатическим данным следующего месяца определяются параметры: температура, давление насыщенного водяного пара.
5. Определяется распределение потенциала влажности на начало следующего месяца с помощью формулы (13) по влажностному режиму ограждающей конструкции на конец предшествующего месяца.
6. Расчет по пунктам 2–5 повторяется в течение необходимого периода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По предложенному методу написана компьютерная программа для исследования нестационарного влажностного режима ограждающих конструкций. В качестве исходных данных для расчета взяты: стена из газобетона, оштукатуренная снаружи и внутри; стена с основанием из газобетона и облицовкой из кирпича, оштукатуренная с внутренней стороны; стена с основанием из газобетона и утеплителем из плит из минеральной ваты, оштукатуренная снаружи (тонким слоем штукатурки) и изнутри; стена с основанием из газобетона и утеплителем из плит из пенополистирола, оштукатуренная снаружи (тонким слоем штукатурки) и изнутри. Район строительства г. Москва, температура внутреннего воздуха 20 °С, относительная влажность внутреннего воздуха 55 %. Дано определение влажностного режима перечисленных ограждающих конструкций по представленному методу на период максимального влагонакопления (рис. 1).

Результаты расчета влажностного режима можно объединить в таблицу для сравнения значений

Рис. 1. Влажностный режим стен зданий, полученный по предложенному методу: *a* — стена из газобетона; *b* — стена с основанием из газобетона и облицовкой из глиняного кирпича; *c* — стена с основанием из газобетона и утеплителем из минеральной ваты; *d* — стена с основанием из газобетона и утеплителем из пенополистирола (*1* — распределение влаги по толще стены; *2* — максимальная сорбционная влажность)

Fig. 1. Moisture regime of the walls of buildings, obtained by the proposed method: *a* — a wall of aerated concrete; *b* — a wall with a base of aerated concrete and facing of clay brick; *c* — a wall with a base of aerated concrete and mineral wool insulation; *d* — a wall with a base of aerated concrete and foam polystyrene insulation (*1* — moisture distribution over the thickness of the wall; *2* — maximum sorption moisture)

Табл. 1. Сравнение значений эксплуатационной влажности и эксплуатационной теплопроводности по данным расчета нестационарного влажностного режима со значениями, приведенными в нормативных документах

Table. 1. Comparison of values of operating humidity and operating thermal conductivity according to the calculation of non-stationary humidity conditions with the values of regulatory documents

Ограждающая конструкция в соответствии с рис. 1 / Enclosing structure in accordance with Fig. 1	Материал / Material	Данные полученные по расчету нестационарного влажностного режима по предложенному методу / The data obtained from the calculation of the unsteady moisture regime by the proposed method		Данные по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» / Data for SP 50.13330.2012 «Thermal performance of the buildings»	
		Влажность, % по массе / Humidity, % by weight	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C) / Heat conductivity coefficient, W/(m · °C)	Влажность, % по массе / Humidity, % by weight	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C) / Heat conductivity coefficient, W/(m · °C)
A	Газобетон / Aerated concrete	4,29	0,126	12	0,15
B	Газобетон / Aerated concrete	4,70	0,128	12	0,15
	Глиняный кирпич / Clay brick	0,34	0,64	2	0,81
C	Газобетон / Aerated concrete	3,01	0,121	12	0,15
	Минеральная вата / Mineral wool insulation	0,48	0,038	5	0,045
D	Газобетон / Aerated concrete	3,44	0,123	12	0,15
	Пенополистирол / Polystyrene insulation	1,8	0,040	10	0,046

эксплуатационной влажности и эксплуатационной теплопроводности, полученных по расчету со значениями, приведенными в нормативных документах (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из табл. 1, эксплуатационная влажность материалов рассматриваемых конструкций по расчету получилась ниже, чем требуется принимать по нормативным документам. Данное обстоятельство объясняется учетом в настоящей математической модели экспериментальных данных (паропроницаемости, изотермы сорбции, статической теплопроводности), инерции процесса увлажнения, ежемесячного изменения температуры и парциального давления водяного пара наружного воздуха, совместной оценкой теплового и влажностного полей.

Влажность основания из блоков из газобетона, облицованного силикатным кирпичом, получается выше, чем при применении однослойного газобетона, что говорит о негативном влиянии облицовки на влажностный режим. Влажность основания из газобетона, утепленного минеральной ватой или же пе-

нополистиролом, напротив, ниже, чем у однослойного газобетона, что свидетельствует о положительном влиянии утепления на влажностное состояние.

В предыдущих работах нами было получено, что плоскость максимального увлажнения (максимум влаги в ограждающей конструкции) находится снаружи слоя утеплителя для ограждающих конструкций с основанием из кладки из газобетона и утеплителем из плит из минеральной ваты, а для конструкций с основанием из кладки из газобетона и утеплителем из плит из пенополистирола плоскость максимального увлажнения находится внутри слоя утеплителя [29]. Как видно из данных математического моделирования рассмотренных ограждающих конструкций, представление о максимумах влаги подтверждается (рис. 1, с, d). Более того, наличие плоскости максимального увлажнения внутри пенополистирола объясняет более высокую влажность основания из газобетона в сравнении с конструкцией с минеральной ватой, в которой плоскость максимального увлажнения находится снаружи конструкции (табл. 1). Таким образом, полученные результаты в рамках настоящей математической модели подтверждают применяемый метод

определения положения плоскости максимального увлажнения [29].

Использование полученных результатов расчета нестационарного влажностного режима позволит уточнить определение тепловых потерь здания, проектирование системы отопления.

Проиллюстрированное в настоящей работе уравнение влагопереноса (29), дополненное аналитическим выражением для потенциала влажности (14), является усовершенствованием предшествующей математической модели, основанной на уравнении (12). Основное достоинство предлагаемого дифференциального уравнения влагопереноса

(29) — его простота, с его помощью становится доступным возможность разработки приближенных методов оценки нестационарного влажностного режима. Например, авторы разработали дискретно-континуальный метод расчета [30]. Перспективой развития этого направления может быть создание и других похожих методов расчета, например, метода расчета, основанного на теории подобия.

С точки зрения теоретического развития предложенной модели интересным представляется оценить погрешность, получившуюся за счет пренебрежения производной влажности по температуре при переходе от уравнения (23) к уравнению (24).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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
2. 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
3. Guimarães 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. Pp. 1–14. DOI: 10.1080/23311916.2018.1459007
4. Guimarães A.S., Ribeiro I.M., Freitas T.S. 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. Pp. 1–17. DOI: 10.1080/23311916.2017.1365572
5. Ricardo M.S., Almeida R., Barreira E. Monte Carlo simulation to evaluate mould growth in walls: the effect of insulation, orientation, and finishing coating // Advances in civil engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2018/8532167
6. Hroudová 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
7. 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
8. 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
9. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3
10. Перехоженцев А.Г. Проектирование наружных стен высотных зданий с заданным температурно-влажностным режимом // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. : Строительство и архитектура. 2017. Т. 67. № 48. С. 48–60.
11. Ельчищева Т.Ф. Определение влажностного режима помещений зданий при наличии в стеновом материале гигроскопических солей // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 14–18. DOI: 10.31659/0585-430X-2017-749-6-14-18
12. 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
13. Алексеенко 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. Т. 17. № 1. С. 20–28.
14. Алексеенко В.Н., Михеева Ю.Л. Результаты исследования температурно-влажностного режима Петропавловского собора в городе Симферополе // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 46–51.
15. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Determination of humidity conditions of enclosing structures by the color indicator method // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064
16. 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

17. 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
18. 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
19. Belkharchouche 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
20. Wu Z., Wong H.S., Buenfeld N.R. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking // *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 98. Pp. 136–154. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.04.006
21. Kupriyanov V.N., Shafigullin R.I. Protective characteristics of enclosing structures exposed to electromagnetic radiation // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. P. 022061. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022061
22. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
23. Богословский В.Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий / под ред. В.Г. Гагарина. М.: МГСУ, 2013. 112 с.
24. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Изд-во Академии наук БССР, 1961. 520 с.
25. Kiessl K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Diss. Essen. 1983. 124 p.
26. Künzl H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters: PhD Thesis. Stuttgart, 1995. 65 p.
27. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Математическая модель и инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2006. № 2. С. 60–63.
28. Козлов В.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влагопроводности и фильтрации воздуха: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 155 с.
29. Гагарин В.Г., Зубарев К.П., Козлов В.В. Определение зоны наибольшего увлажнения в стенах с фасадными теплоизоляционными композиционными системами с наружными штукатурными слоями // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. Т. 54. № 1. С. 125–132.
30. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. 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

Поступила в редакцию 21 января 2019 г.

Принята в доработанном виде 24 февраля 2019 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: Гагарин Владимир Геннадьевич — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией строительной теплофизики, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21, gagarinvg@yandex.ru;

Зубарев Кирилл Павлович — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ov@mgsu.ru.

REFERENCES

1. 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
2. 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
3. Guimarães A.S., Ribeiro I.M., Freitas T.S. TRHUMIDADE — A water diffusivity model to predict moisture content profiles. *Cogent engineering*. 2018; 5(1):1-14. DOI: 10.1080/23311916.2018.1459007

4. Guimarães A.S., Ribeiro I.M., Freitas T.S. 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):1-17. DOI: 10.1080/23311916.2017.1365572
5. Ricardo M.S., Almeida R., Barreira E. Monte Carlo simulation to evaluate mould growth in walls: the effect of insulation, orientation, and finishing coating. *Advances in civil engineering*. 2018; 2018:1-12. DOI: 10.1155/2018/8532167
6. Hroudová J., Korjenic A., Zach J., Mitterböck M. Entwicklung eines Wärmedämmputzes mit Naturfasern und Untersuchung des Wärme- und Feuchteverhaltens. *Bauphysik*. 2017; 39(4):261-271. DOI: 10.1002/bapi.201710030
7. 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/mateconf/201710303020
8. 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
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. Perekhzhentsev A.G. Design of external walls of high-rise buildings with specified temperature and humidity conditions. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and Architecture*. 2017; 67(48):48-60. (rus.).
11. Elchishcheva T.F. Determination of humidity conditions in premises of buildings at presence of hygroscopic salts in wall material. *Construction materials*. 2017; 6:14-18. DOI: 10.31659/0585-430X-2017-749-6-14-18 (rus.).
12. Pastushkov P.P., Grinfel'd G.I., Pavlenko N.V., Bespalov 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.).
13. Alekseenko V.N., Miheeva Y.L. Effects of climatic factors on the temperature and humidity conditions fencing structures orthodox churches XVIII–XIX centuries. *Biosphere compatibility: man, region, technology*. 2017; 17(1):20-28. (rus.).
14. Alekseenko V.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.).
15. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Determination of humidity conditions of enclosing structures by the color indicator method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064
16. 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
17. 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
18. 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
19. Belkharouch 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
20. Wu Z., Wong H.S., Buenfeld N.R. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. *Cement and Concrete Research*. 2017; 98:136-154. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.04.006
21. Kupriyanov V.N., Shafigullin R.I. Protective characteristics of enclosing structures exposed to electromagnetic radiation. *IOP Conf. Ser. : Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022061. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022061
22. Fokin K.F. *Building heat engineering of enclosing parts of buildings*. Moscow, AVOKPRESS Publ., 2006; 256. (rus.).
23. Bogoslovskii V.N. *Fundamentals of material potential moisture theory in respect to the outer building envelope / ed. V.G. Gagarin*. Moscow, MGSU Publ., 2013; 112. (rus.).
24. Lykov A.V. *Theoretical foundations of building thermal physics*. Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR, 1961. 520. (rus.).
25. Kiessl K. *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung*. Diss. Essen. 1983; 124.
26. Künzle H.M. *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters : PhD Thesis*. Stuttgart, 1995; 65.
27. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Mathematical model and engineering method for calculating the moisture state of enclosing structures. *Academia. Architecture and construction*. 2006; 2:60-63. (rus.).
28. Kozlov V.V. *The method of engineering assessment of the humidity state of modern enclosing structures with a high level of thermal protection, taking into account vapor permeability, moisture conduction and air filtration*. Moscow, 2004; 155. (rus.).

29. Gagarin V.G., Zubarev K.P., Kozlov V.V. The highest moisture area in facade heat-insulation composite wall systems with external plastering. *Bulletin of Tomsk state architecture and construction university*. 2016; 54(1):125-132. (rus.).

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

Received January 21, 2019.

Adopted in a modified form on February 24, 2019.

Approved for publication March 29, 2019.

ABOUT THE AUTHORS: **Vladimir G. Gagarin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of laboratory thermal, **Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Science (NIISF RAACS)**, 21 Locomotive travel, Moscow, 127238, Russian Federation, gagarinvg@yandex.ru;

Kirill P. Zubarev — post graduate, Department of heat supply and ventilation, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, ov@mgsu.ru.