

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК (691:539.217.2/.3):53.081.2

### МЕТОД ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЛАГОПЕРЕНОСА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*д-р техн. наук, проф. В.И. НИКИТИН, В.А. КОФАНОВ*  
(Брестский государственный технический университет)

*Рассматривается коэффициент, характеризующий механизм переноса влаги в строительных материалах при капиллярном впитывании. Даны понятия этого коэффициента. Анализируется ряд существующих экспериментальных и вычислительных методов его определения в капиллярно-пористых материалах. Показано, что при определении коэффициента переноса влаги существующими методами необходимо выполнять довольно длительные и трудоемкие эксперименты, использовать дорогостоящую аппаратуру и непростые вычислительные процедуры. В связи с этим предлагается новый, наименее трудоемкий, достаточно точный и теоретически обоснованный метод определения коэффициента влагопереноса в строительных материалах. Выполнено сравнение коэффициентов влагопереноса, полученных различными методами для образцов керамического материала и газобетона.*

**Введение.** Под воздействием окружающей среды в капиллярно-пористых материалах ограждающих конструкций протекают сопряженные нестационарные процессы переноса тепла и влаги, для описания которых разработано немало моделей разнообразной сложности. Однако сопоставление результатов экспериментальных исследований эксплуатируемых ограждающих конструкций с результатами расчетов, полученных с использованием этих моделей, показывает, что реальное влагосодержание материалов конструкций в несколько раз превышает расчетное. При повышенной влажности ограждений в здании резко увеличиваются потери тепла, интенсифицируются процессы коррозии материалов и снижается их долговечность, ухудшаются санитарно-гигиенические условия в помещении.

Существенное расхождение результатов расчета и эксперимента, по нашему мнению, связано с тем, что при расчете не в полной мере учитывается воздействие окружающей среды. Прежде всего это относится к атмосферным осадкам в виде дождя, смачивающего наружную поверхность ограждения. За счет капиллярного впитывания жидкая влага с поверхности проникает вглубь конструкции. Уравнение плотности одномерного нестационарного потока этой влаги можно записать следующим образом:

$$j = -D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $j$  – плотность потока влаги вдоль оси  $x$ , кг/(м<sup>2</sup>·с);  $w$  – влагосодержание материала, кг/м<sup>3</sup>;  $D_w$  – коэффициент переноса жидкой влаги, м<sup>2</sup>/с.

В соответствии с законом сохранения массы

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(j) = 0 \quad (2)$$

получаем

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где  $t$  – время, с.

Значения коэффициента  $D_w$  в общем случае зависят от пористой структуры материала, его влагосодержания и свойств жидкости. В научно-технической литературе встречаются различные названия этого коэффициента. Так, в Европейской норме ISO 9346:2007 «Hydrothermal performance of buildings and building materials – Physical quantities for mass transfer. – Vocabulary» его называют коэффициентом выравнивания влаги, зависящим от влажности  $w$ . В советской и российской литературе при описании процесса переноса жидкой влаги обычно используется коэффициент влагопроводности материала  $\beta(u)$ , кг/(м·с·кг/кг), зависящий от влажности  $u$ , кг/кг.

Отметим, что влажность материала часто характеризуется величиной  $\psi$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Величины  $w$ ,  $u$ ,  $\psi$  связаны соотношением:

$$w = u \cdot \rho = \psi \cdot \rho_{ж}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность сухого материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости (воды),  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Поскольку плотность потока влаги можно выразить тремя способами:

$$j = -D_w(w) \cdot \frac{\partial w}{\partial x} = -\beta(u) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = -D_\psi(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (5)$$

то с учетом (4) получаем

$$D_w(w) = \frac{\beta(u)}{\rho} = \frac{D_\psi(\psi)}{\rho_{ж}}. \quad (6)$$

Из уравнения (3) следует, что для количественного описания процесса переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых строительных материалах необходимо иметь достаточно точные значения коэффициента влагопереноса. Решение этой сложной задачи известными методами приводит к существенно отличающимся результатам.

Целью данной работы является разработка научно обоснованного и достаточно точного метода определения коэффициента переноса жидкой влаги.

**Некоторые методы оценки коэффициента влагопереноса.** В настоящее время отсутствует единая общепризнанная методика оценки зависимости значений коэффициента  $\beta$  или  $D_w$  от влажности материала. Эту зависимость можно установить несколькими методами, при реализации которых необходимо выполнять довольно длительные и трудоемкие эксперименты, используя дорогостоящую аппаратуру и непростые вычислительные процедуры. Коэффициент переноса влаги  $D_w$  можно вычислить с помощью профилей влажности  $w(x, t)$ , измеренных в испытываемых образцах в различные моменты времени после начала капиллярного всасывания воды. При определении этих профилей могут использоваться непосредственные и косвенные методы измерения влажности (весовой, диэлектрический, гамма-просвечивания, ядерно-магнитного резонанса и др.), описанные, например, в работах [1; 2]. При наличии профилей влажности  $w(x, t)$  коэффициент  $D_w$  может определяться путем решения уравнения (3), методом Больцмана – Матано, методом профилей и др. [1; 3].

В 1894 году Больцманом показано (в частности, в работах [4; 5]), что при одномерном всасывании воды образцом материала, характеризуемого однородной и изотропной пористостью, имеющим постоянное начальное влагосодержание  $w_n$  ( $w = w_n$ , при  $x > 0$  и  $t = 0$ ) и постоянное влагосодержание на поверхности контакта с водой  $w_k$  ( $w = w_k$ , при  $x = 0$  и  $t > 0$ ), дифференциальное уравнение (3) имеет одно единственное решение. Это решение описывается характеристической кривой или  $w$ - $\lambda$ -профилем, где  $\lambda$  – переменная Больцмана, определяемая из соотношения  $\lambda = x/\sqrt{t}$ . Если материал однородный и изотропный, то профили влажности, полученные в различные моменты времени и пересчитанные с помощью переменной  $\lambda$ , совпадут с одной единственной кривой  $w$ - $\lambda$ . Тогда коэффициент переноса влаги  $D_w$  определяется по формуле:

$$D_w(w_i) = -\frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial \lambda} \cdot \int_{w_n}^{w_i} \lambda dw, \quad (7)$$

которая проиллюстрирована на рисунке 1.

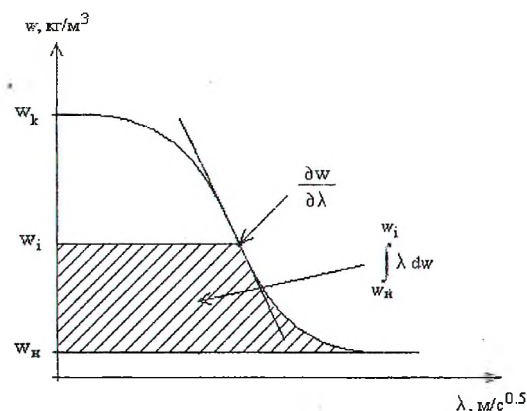


Рис. 1. Графическая иллюстрация вычислительной процедуры Больцмана

В случае если профили влажности не сводятся к характеристической кривой (материал испытываемого образца не является однородным и изотропным), можно воспользоваться методом профилей.

Для иллюстрации покажем вычисление коэффициента  $D_w$  методом профилей, выполняемое с помощью формулы [1], поясняемой на рисунке 2:

$$D_w = -\frac{1}{dt} \frac{\int_{x=x_0}^{x=l} [w(x, t+dt) - w(x, t)] dx}{\frac{\partial w_0}{\partial x_0}}, \quad (8)$$

где  $l$  – длина образца, м;  $t$  – временная координата, с.

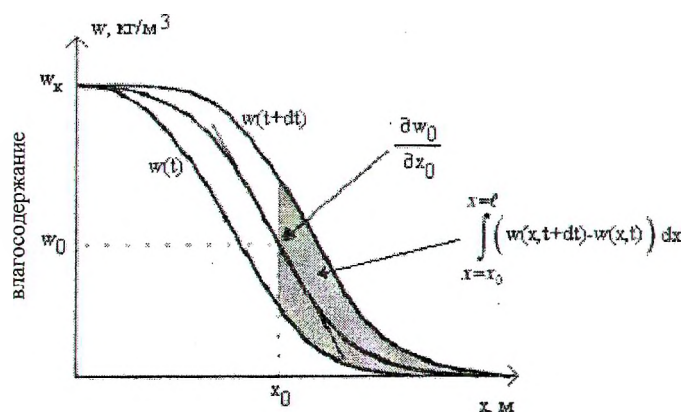


Рис. 2. Графическая интерпретация метода профилей

Из рисунка 2 видно, что при вычислении коэффициента  $D_w$  используется дополнительный профиль, полученный усреднением двух измеренных профилей. Очевидно, что при практической реализации этих методов необходимо преодолевать значительные трудности.

По известному методу Брилинга [6] определяется только один профиль влажности, который сформировался в образце после того, как плотность потока влаги и профиль влажности перестали зависеть от времени.

Можно отметить еще один метод (метод моментов), описанный в работе [7], при реализации которого не нужно определять профили влажности, но требуется большой опыт при выполнении трудоемкого эксперимента.

Нами также был разработан метод определения коэффициента влагопереноса [8], экспериментальная часть которого состояла лишь в получении данных о кинетике одномерного водопоглощения образцами строительного материала  $m(t)_{\text{эк}}$ . Согласно этому методу необходимо задать вид функции  $\beta(u)$  и, решая уравнение (3), определить  $m(t)$ . Путем численного эксперимента подбирается функция  $\beta(u)$ , при которой вычисленные значения  $m(t)$  удовлетворительно совпадают с опытными  $m(t)_{\text{эк}}$ . Благодаря оригинальной вычислительной процедуре удалось определить не только коэффициент влагопереноса материала, но и профили влажности от начала и до конца процесса капиллярного впитывания, а также функцию распределения объема пор по радиусам. К недостаткам метода следует отнести высокую математическую сложность модели и обязательное наличие вычислительной техники для обработки опытных данных.

**Предлагаемый метод.** Для преодоления вычислительных и экспериментальных трудностей упомянутых методов предлагается воспользоваться представленным в работе [9] аналитическим выражением для вычисления коэффициента влагопроводности  $\beta(u)$  капиллярно-пористого материала на основе данных о функции распределения объема пор по их радиусам  $f_v(r)$ , краевом угле смачивания материала жидкостью  $\Theta$ , объемной массе материала  $\rho$  и его сорбционном увлажнении  $u_c$ ; кроме того должны быть известными плотность  $\rho_{ж}$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  и вязкости  $\eta$  жидкости. При отсутствии данных о функции  $f_v(r)$  можно воспользоваться аналитическим выражением для этой функции, полученным в [9] на основе принципа максимальной энтропии.

При малых значениях  $u_c$  зависимость коэффициента влагопроводности  $\beta(u)$  от параметров жидкости и материала имеет вид [9]:

$$\beta(u) = \frac{\rho \cdot \sigma \cdot \cos(\Theta) \cdot r_{cp}}{\eta \cdot \xi(u)} \cdot b(s), \quad (9)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\Theta$  – краевой угол смачивания материала жидкостью, град;  $r_{cp}$  – радиус капилляра (поры) со средним объемом, м;  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости;  $\xi(u)$  – извилистость капилляров, заполненных подвижной жидкостью, м;  $b(s)$  – безразмерная функция, зависящая от степени насыщения пор подвижной жидкостью  $s$ :

$$s = \frac{\rho \cdot (u - u_c)}{\rho_{жс} \cdot P - \rho \cdot u_c}, \quad (10)$$

где  $u_c$  – сорбционная влажность материала;  $P$  – открытая пористость материала.

Значение  $P$  можно определить по значению водопоглощения материала  $B$ , кг/кг, определяемому стандартным методом:

$$P = \frac{\rho \cdot B}{\rho_{жс}}. \quad (11)$$

Сорбционная влага  $u_c$ , удерживаемая силами Ван-дер-Ваальса на стенках капилляров и пор в виде тонких сорбционных пленок, считается неподвижной и зависящей от температуры и относительной влажности воздуха порового пространства. В качестве величины  $u_c$  можно использовать значение сорбционной влажности материала при относительной влажности воздуха, равной 80 %. При известном значении  $s$  по графику, изображенному на рисунке 3, можно определить значение безразмерной функции  $b(s)$ .

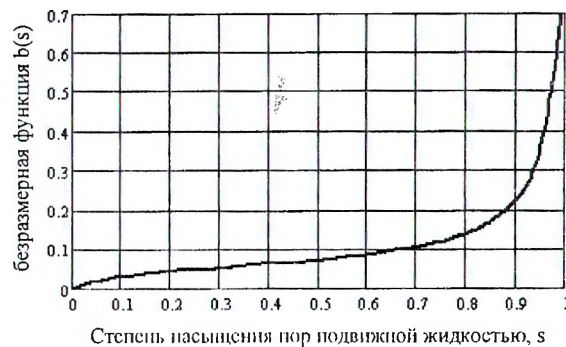


Рис. 3. График функции  $b(s)$

Извилистость  $\xi(u)$  можно найти по формуле [9]:

$$\xi(u) = \frac{P(u)}{\left[ \frac{1}{2} + \sin\left( \frac{\arcsin(2 \cdot P(u) - 1)}{3} \right) \right]^2}, \quad (12)$$

где  $P(u) = \frac{\rho}{\rho_{жс}} \cdot (u - u_c)$  представляет собой относительный объем подвижной жидкости.

Для оценки среднего радиуса  $r_{cp}$  предлагается воспользоваться формулой, полученной на основе теории переноса влаги в цилиндрическом капилляре и приведенной в работе [10]:

$$r_{cp} = \frac{2 \cdot \eta \cdot h^2 \cdot \xi^2(u_k)}{t_k \cdot \sigma \cdot \cos(\Theta)}, \quad (13)$$

где  $t_k$  – продолжительность процесса одномерного капиллярного впитывания жидкости воздушно-сухим образцом высотой  $h$  с постоянным поперечным сечением от момента соприкосновения нижней поверхности образца с жидкостью;  $u_k$  – влагосодержание материала образца к моменту  $t = t_k$ .

Согласно работе [10] имеем:

$$\frac{h^2}{t_k} = \left( \frac{A}{w_k} \right)^2, \quad (14)$$

где  $A$  – коэффициента сорбции жидкости (воды),  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{0.5})$ ;  $w_k = \rho \cdot (u_k - u_c)$  – масса подвижной жидкости в единице объема материала образца к моменту  $t = t_k$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Часть открытой пористости материала, заполненная подвижной жидкостью, часто называется активной пористостью  $\Phi_a$ .

Значения  $A$ ,  $t_k$ ,  $u_k$  определяются с помощью данных о кинетике одномерного капиллярного впитывания жидкости испытываемыми образцами, полученных по методике, описанной в работах [1; 11].

После учета (13), (14) из (9) получаем выражение для определения коэффициента влагопроводности:

$$\beta(u) = \frac{2 \cdot \rho \cdot A^2 \cdot \xi^2(u_k) \cdot b(s)}{w_k^2 \cdot \xi(u)}. \quad (15)$$

Следует отметить, что отношение  $A/w_k$  является определяющим в известной эмпирической формуле [12]:

$$\beta(u) = 3,8 \cdot \rho \cdot \frac{A^2}{w_k^2} \cdot 1000^{\frac{w}{w_k} - 1}, \quad (16)$$

и теперь становится теоретически обоснованным.

Для верификации предложенного метода были выполнены расчеты коэффициента влагопроводности  $\beta(u)$  по формулам (15) и (16), а также экспериментально-вычислительного метода [8] с использованием данных, полученных путем экспериментирования на образцах керамического материала, характеризуемого следующими параметрами:  $\rho = 1750 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $A = 0,132 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{0.5})$ ;  $\Phi_a = 0,288$ ;  $P = 0,297$ ;  $u_c = 0,0024 \text{ кг}/\text{кг}$ . Результаты этого расчета представлены на рисунке 4.

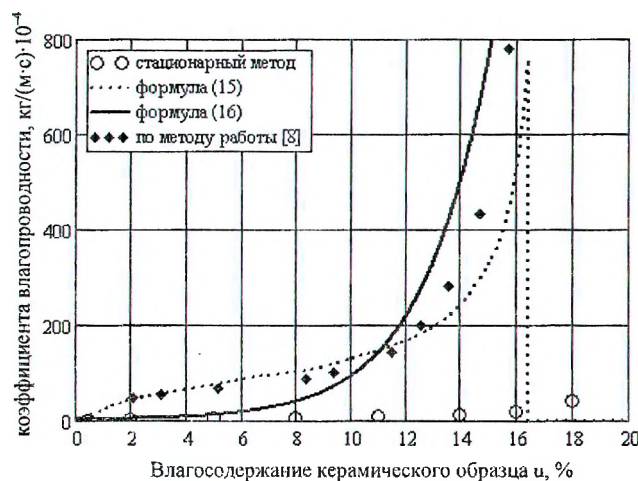


Рис. 4. Зависимости коэффициента влагопроводности  $\beta(u)$  от влагосодержания керамического материала, определенные различными методами

На рисунке 4 также представлены данные, приведенные в работе [6], которые были получены стационарным методом (методом Брилинга) для образцов глиняного кирпича плотностью  $1700 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Из рисунка видно, что результаты расчета по формуле (15) и методу работы [8] близки друг другу. Это означает, что результаты расчета по формуле (15) могут быть использованы в методе [8] в качестве первого приближения. Значения коэффициента  $\beta(u)$ , полученные стационарным методом, оказались в десятки раз меньше, чем вычисленные по всем остальным сравниваемым методам.

Такую большую разницу можно объяснить тем, что стационарный метод оценивает влажностное состояние образца материала после завершения процесса капиллярного впитывания, когда профиль

влажности не меняется во времени, а стационарный поток влаги определяется диффузией водяного пара в верхней части образцы.

Для дополнительной проверки предсказательной способности предлагаемого метода были использованы результаты исследования влагопереноса в газобетоне плотностью 600 и 520 кг/м<sup>3</sup>, полученные с использованием метода моментов [13], метода «гамма-просвечивания» и решения уравнения (3) методом Митани [14], а также данные работы [15], полученные для полистиролбетона плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> стационарным методом. При расчете по предложенной формуле (15) и известной формуле (16) использовались опытные данные, полученные нами для газобетона плотностью 565 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты этой проверки показаны на рисунке 5.

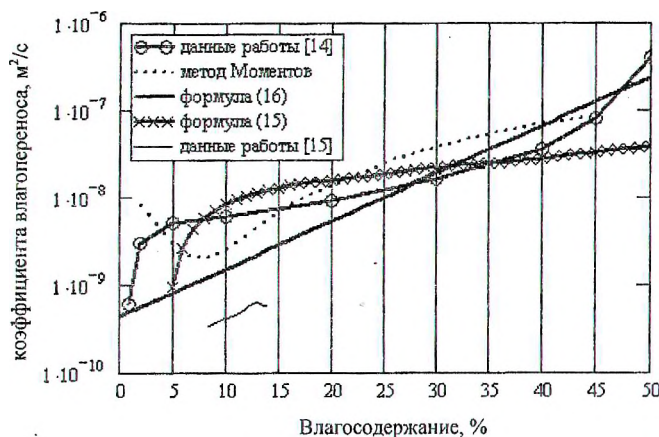


Рис. 5. Зависимость коэффициента переноса жидкой влаги от влагосодержания газобетона

Видно, что рассмотренные методы дают результаты, которые отличаются как количественно, так и качественно. Следует отметить, что предложенный метод удовлетворительно согласуется со всеми сравниваемыми методами, кроме стационарного, о чем свидетельствует представленное выше объяснение. Поскольку предлагаемый метод теоретически обоснован, по точности не уступает известным методам и по сравнению с ними является менее трудоемким, то его можно рекомендовать для практического использования.

**Заключение.** В результате проведенного исследования предлагается менее трудоемкий, достаточно точный и теоретически обоснованный метод оценки коэффициента переноса жидкой влаги в строительных материалах, заключающийся в получении опытных данных о кинетике одномерного водопоглощения образцами материала и их использовании в вычислениях по формуле (15).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels / M. Janz. – Lund: Division of Building Materials. – Report TVBM-3076. – 1997. – 76 p.
2. Bezpalko, N. Zastosowanie techniki TDR do badania procesów przenoszenia masy i energii przez wybrane przegrody budowlane: praca doktorska / N. Bezpalko. – Lublin, 2009. – 186 s.
3. Determination of the water diffusivity of porous materials by gamma-ray attenuation and NMR / V.P. De Freitas [et al.] // Proceeding of the International symposium on Moisture Problems in Building Walls, Porto, 11 – 13 Sept, 1995. – Porto, 1995. – P. 445 – 460.
4. Crank, J. The mathematics of diffusion / J. Crank. – United Kingdom: Oxford University Press, 1989.
5. Roels, S. Analysis moisture flow in porous materials using microfocuss X-ray radiography / S. Roels, J. Carmeliet // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – № 49. – P. 4762 – 4772.
6. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
7. Gaffner, D. The Moment Method for Measuring Moisture Diffusivity of Porous Building Materials / D. Gaffner // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings International Conference [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access: [http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session\\_20PDFs/168\\_New.pdf](http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session_20PDFs/168_New.pdf).

8. Афонин, А.В. Определение параметров переноса влаги в стеновой керамике / А.В. Афонин, В.И. Никитин // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: междунар. сб. науч. тр. – Гомель, 2005. – С. 24 – 27.
9. Афонин, А.В. Вычисление коэффициентов переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых строительных материалах / А.В. Афонин, В.И. Никитин // Вестн. БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. – № 1. – С. 10 – 15.
10. Nikitin, V. Ocena oporu penetracji wody w tworzywach ceramicznych / V. Nikitin, B. Backiel-Brzozowska // Polski Biuletyn Ceramiczny. Ceramika. – 2008. – Vol. 103/2. – S. 1031 – 1036.
11. Никитин, В.И. Влияние температуры обжига на параметры пористой структуры керамики / В.И. Никитин, Б. Бацкель-Бжозовска // Вестн. БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2005. – № 2. – С. 98 – 103.
12. Künzle, H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters / H.M. Künzle. – Fraunhofer IRB Verlag. – Stuttgart, 1995. – 65 s.
13. Gaffner, D. Determination of moisture flow coefficients for porous materials by using the “moment method” / D. Gaffner // Building Physics in the Nordic Countries, Swedish Council for Building Research, DW13. – Stockholm, 1988. – P. 423 – 427.
14. Низовцев, М.Н. Верификация модели расчета сопряженного тепло- и влагопереноса при увлажнении газобетона / М.Н. Низовцев, А.Н. Стерлягов, В.И. Терехов // Изв. вузов. Строительство. – 2008. – № 1. – С. 104 – 109.
15. Гагарин, В.Г. Математическая модель и инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Academia. Архитектура и строительство. – 2006. – № 2. – С. 60 – 63.

Поступила 27.05.2011

#### THE METHOD OF ESTIMATION OF MOISTURE CARRYING OVER FACTOR FOR BUILDING MATERIALS

V. NIKITIN, V. KOFANOV

*The concepts of coefficient describing the mechanism of moisture transport in building materials at a capillary diffusivity sectional. A series of existing experimental and computing methods of definition this coefficient in capillary-porous materials surveyed. Is shown, that at definition coefficient of moisture transport by existing methods it is necessary to fulfill rather long-lived and composite experiments, to use the expensive equipment and not prime computing procedures. In this connection the composite, precise enough and theoretically justified method definition of diffusion coefficient in building materials is offered new, least. The comparison of diffusion coefficients, obtained by various methods for is model of a ceramic material and cellular concrete is carried out.*