

УДК 533.15:691.555

DOI: 10.17072/2223-1838-2017-1-83-93

С.В. Арасланкин, С.Г. Кострюков, О.Б. Томилин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
Саранск, Россия

**ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ДИФФУЗИОННОЙ ПАРПРОНИЦАЕМОСТИ ШТУКАТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ**

Разработан и верифицирован экспресс-метод определения коэффициента парпроницаемости штукатурных материалов на основе неорганических вяжущих веществ. По результатам выполненных измерений установлена пригодность разработанного метода.

Ключевые слова: коэффициент диффузионной парпроницаемости; парциальное давление; диметилкетон; штукатурный материал; неорганические вяжущие вещества; коэффициент кондиционирования.

S.V. Araslankin, S.G. Kostryukov, O.B. Tomilin

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**ACCELERATED METHOD FOR THE DETERMINING OF THE DIFFUSION
STEAM-PERMEABILITY COEFFICIENT OF PLASTERING MATERIALS
BASED ON INORGANIC BINDERS**

Designed and verified accelerated method for the determining of the diffusion steam-permeability coefficient of plastering materials based on inorganic binders. Based on the measurement results, the effectiveness of this method is established.

Keywords: diffusion steam-permeability coefficient; partial pressure; dimethylketone; plaster material; inorganic binders; conditioning coefficient.

Введение

В последние годы наиболее актуальным становится вопрос использования в строительстве композиций на основе неорганических вяжущих веществ. По итогам 2012 г/ внутреннее производство строительных композиций превысило 8 млн т, из которых значительную долю составляют штукатурные материалы [1].

Одним из показателей качества штукатурных материалов является коэффициент диффузионной паропроницаемости, который отражает способность материала пропускать пары влаги в результате разницы парциальных давлений пара при одинаковом атмосферном давлении на обеих сторонах образца [2].

Учет коэффициента диффузионной паропроницаемости при проектировании зданий и сооружений вносит весомый вклад в формирование физико-технических и теплотехнических свойств вертикальных ограждающих конструкций. Таким образом, штукатурное покрытие следует рассматривать как материал, выполняющий не только выравнивающую функцию, но и защитную. Пренебрежение значением коэффициента диффузионной паропроницаемости может привести к конденсации влаги внутри стены и ряду взаимовытекающих последствий: увеличению теплопотерь здания через стены; промерзанию стен и образованию сырых углов; развитию грибка и других биологических микроорганизмов и др. [3].

В настоящее время имеется ряд государственных стандартов на методы определения коэффициента паропроницаемости различных строительных материалов. Однако данные методики являются трудоемкими и длительными в своем исполнении. Кроме того, современные нормативно-технические документы, действующие на территории Российской Федерации, не регламентируют обязательного определения коэффициента диффузионной паропроницаемости для штукатурных материалов. Таким образом, данный

показатель, как правило, не учитывается при проектировании ограждающих конструкций. В связи с этим возникла необходимость в разработке эффективного экспресс-метода его оценки [4].

Сущность метода

В настоящее время для измерения коэффициента диффузионной паропроницаемости штукатурных материалов используют метод «мокрой чашки», который описан в ГОСТ 25898-2012. В основе данного метода лежит определение интенсивности потока водяного пара, проходящего через образцы, вырезанные из типовых строительных изделий. Образцы квадратного сечения со стороной размером 100 мм или цилиндрического сечения диаметром 100 мм и толщиной 10–30 мм устанавливаются в испытательный сосуд с дистиллированной водой и выдерживаются на всем протяжении эксперимента в специальной камере, обеспечивающей циркуляцию воздуха со скоростью от 0,02 до 0,3 м/с и постоянное поддержание относительной влажности воздуха $\varphi = 50\%$ с точностью $\pm 3\%$ и температуры $T = 296\text{ К}$ с точностью $\pm 0,5\text{ К}$. В ходе проведения измерений испытательные сосуды с образцами взвешивают на аналитических весах через определенные промежутки времени, но не реже чем через 7 суток. По результатам взвешивания испытательного сосуда вычисляют плотность потока водяного пара

$g, \frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \times \text{ч}}$ через образец по формуле [5]:

$$g = \frac{\Delta m}{\Delta \tau A}, \quad (1)$$

где Δm – изменение массы испытательного сосуда с образцом за интервал времени $\Delta \tau$, мг; $\Delta \tau$ – интервал времени между двумя последовательными взвешиваниями, ч; A – площадь поверхности образца, через которую проходит поток водяного пара, м^2 .

В соответствии с [5, 6] сопротивление паропроницанию образцов $R_n, \frac{\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па}}{\text{мг}}$, равно

$$R_n = \frac{E - e}{g} - R_{n.e}, \quad (2)$$

где E – давление насыщенного водяного пара в испытательном сосуде, Па; e – давление водяного пара в камере вокруг испытательного сосуда, Па; $R_{n.e}$ – сопротивление паропрооницанию воздуха, $\frac{\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па}}{\text{мг}}$.

Значения e и $R_{n.e}$ рассчитывают по формулам (3) и (4) соответственно [5, 6]:

$$e = E\varphi, \quad (3)$$

где φ – относительная влажность воздуха в камере вокруг испытательного сосуда, %.

$$R_{n.e} = \frac{d_e}{\mu_e}, \quad (4)$$

где d_e – толщина слоя воздуха (расстояние от поверхности воды в испытательном сосуде до нижней поверхности образца), м; μ_e – паропрооницаемость воздуха в испытательном сосуде, определяемая по формуле Ширмера для водяных паров (5), $\frac{\text{мг}}{\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па}}$.

$$\mu_e = \frac{0,083 p_0}{RTp} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}, \quad (5)$$

где p_0 – нормальное атмосферное давление, Па; p – среднее давление воздуха, Па; T – температура воздуха в испытательной камере, К; R – газовая постоянная для водяного пара, $\frac{\text{Н} \times \text{м}}{\text{кг} \times \text{К}}$.

Используя формулу (2) находят коэффициент паропрооницаемости материала μ , $\frac{\text{мг}}{\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па}}$ [5]:

$$\mu = \frac{d}{R_n}, \quad (6)$$

где d – средняя толщина испытуемого образца, м.

Анализ методики, описанной в ГОСТ 25898-2012, позволяет выявить ряд существенных недостатков:

- В качестве испаряющейся жидкости используется дистиллированная вода, которая при

температуре в испытательной камере $T = 296$ К обеспечивает сравнительно небольшую интенсивность диффузионного потока водяных паров из-за низкого давления насыщенного пара. Вследствие этого изменение массы испытательного сосуда с образцом осуществляется с малой скоростью, что обуславливает длительное время проведения эксперимента, которое составляет от 2 до 4 месяцев.

- Учитывая высокую длительность проведения измерений, возникает проблема непрерывного поддержания заданной температуры и относительной влажности воздуха в испытательной камере на всем протяжении эксперимента. Отклонение от заданного значения температурно-влажностного режима может привести к получению недостоверных результатов.

- Конструкция испытательного сосуда не предусматривает защиту от прямого попадания потока воздуха на рабочую поверхность образца. Данное обстоятельство может нарушить чистоту проведения эксперимента и тем самым способно увеличить погрешность измерений.

Таким образом, разработка экспресс-метода измерения паропрооницаемости является актуальной задачей. Существует ряд экспресс-методов определения коэффициента диффузионной паропрооницаемости, основанных на проведения эксперимента при более высоких температурах, что сопряжено с необходимостью термостатирования [6]. Нами предложен экспресс-метод измерения коэффициента диффузионной паропрооницаемости, основанный на использовании в качестве испаряющейся жидкости диметилкетона. Различие гидромеханических процессов взаимодействия паров воды и диметилкетона со штукатурным материалом учитывается с помощью коэффициента кондиционирования. В целом предлагаемый нами метод имеет ряд существенных отличий:

- В основе метода лежит использование в качестве испаряющейся жидкости диметилкетона, характеризующегося более высоким значением

парциального давления насыщенного пара по сравнению с водой. При температуре $T = 293$ К парциальные давления насыщенных паров диметилкетона и воды, соответственно, равны: $P_{CH_3COCH_3}^{нас} = 24482,3$ Па и $P_{H_2O}^{нас} = 2338,8$ Па [7]. Таким образом, $P_{CH_3COCH_3}^{нас}$ больше $P_{H_2O}^{нас}$ примерно в 10,5 раз, что обеспечивает в случае применения диметилкетона более высокую интенсивность диффузионного потока и позволяет сократить время проведения измерений с 2–4 месяцев до 2 суток.

- Испытательный сосуд представляет собой эксикатор с заданными размерами. При этом образец устанавливается и фиксируется внутри эксикатора, что позволяет избежать попадания прямых потоков воздуха при его циркуляции внутри испытательной камеры.

- В данной методике используется более совершенная математическая модель обработки результатов измерений, которая учитывает природу испаряющейся жидкости, температурно-влажностный режим в испытательной камере и совокупность других параметров кондиционирования газовой среды.

Основная сложность предлагаемого метода состоит в проведении расчетов давлений паров газообразных веществ под образцом и над образцом. В основе расчетов лежит уравнение Антуана, описывающее зависимость парциального давления насыщенного пара от температуры [8]:

$$\ln P_{vp} = A - \frac{B}{T + C}, \quad (7)$$

где P_{vp} – парциальное давление насыщенного пара, мм.рт.ст.; A , B , C – константы, определяемые по справочным данным [9].

На основе уравнения (7) производится расчет парциального давления насыщенного пара диметилкетона под образцом. При расчете полного давления смеси газов над образцом вводится коэффициент кондиционирования, определяемый экспериментально-вычислительным методом согласно приведенной формуле (6).

Экспериментальная часть

Схема установки для проведения эксперимента представлена на рисунке.

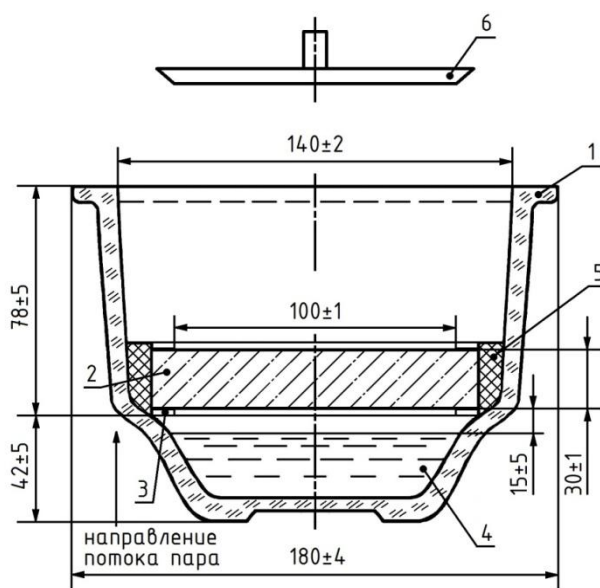


Схема установки для определения коэффициента паропроницаемости штукатурного материала:

- 1 – эксикатор ГОСТ 25336-82; 2 – испытуемый образец;
3 – металлическое кольцо с резиновой прокладкой; 4 – диметилкетон; 5 – герметизирующая паста; 6 – шаблон

В качестве образцов для проведения испытаний применяли диски из штукатурного материала диаметром (133 ± 1) мм и толщиной (30 ± 1) мм. Диск представлял собой затвердевший штукатурный раствор на цементном вяжущем в проектном возрасте 28 суток. Испытания проводили на пяти образцах. Толщину образца измеряли в пяти разных точках с помощью штангенциркуля и определяли среднеарифметическое значение. Боковую поверхность подготовленных к испытанию образцов покрывали паронепроницаемым составом: эпоксидной смолой. Затем в эксикатор добавляли диметилкетон до тех пор, пока расстояние от нижней плоскости образца до верхнего уровня жидкости не равнялось (15 ± 5) мм. После чего образцы вставляли в расширенную часть эксикатора и герметизирующей пастой заделывали зазоры между образцами и стенками эксикатора. Зазоры между образцом и кольцом также заделывали герметизирующей пастой. При этом испытуемый образец накрывали шаблоном. Подготовленные эксикаторы с образцами и диметилкетонем устанавливали в камере для кондиционирования при температуре $T = 293$ К и относительной влажности воздуха $\varphi = 55\%$. Для определения среднего значения плотности диффузионного потока производили взвешивание эксикаторов с образцами в начальный момент времени: через 1, 2, 4, 6, 24, 26, 28 и 30 ч. с начала проведения эксперимента.

Обработка результатов измерений

Для расчета коэффициента паропроницаемости штукатурного материала мы определяли:

- полное давление газов под испытуемым образцом P_1 , Па;
- полное давление газов над испытуемым образцом P_2 , Па;
- коэффициент кондиционирования χ ;

– сопротивление паропроницанию воздуха

$$R_{n,e}, \frac{\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па}}{\text{мг}}.$$

Расчет полного давления газов под образцом P_1 . Под образцом имеется смесь газов, состоящая из паров диметилкетона, воды и воздуха. Использование в качестве испаряющейся жидкости диметилкетона предполагает, что в системе под образцом пары диметилкетона насыщены, поэтому парциальные давления воздуха и паров воды малы, и ими можно пренебречь. Вследствие этого полное давление смеси газов под испытуемым образцом будет определяться парциальным давлением насыщенного пара диметилкетона, зависимость которого от температуры описывается уравнением Антуана (7).

Константы в уравнении Антуана являются справочными данными, которые для диметилкетона в интервале температур от 241 до 350 К постоянны и равны: $A = 16,6513$; $B = 2940,46$; $C = -35,93$ [7, 8].

Учитывая значения констант A , B и C в уравнении (7), получаем формулу для расчета полного давления газов под испытуемым образцом:

$$P_1 = P_{CH_3COCH_3}^{нас} = \alpha e^{\frac{16,6513 - \frac{2940,46}{T - 35,93}}{T}}, \quad (8)$$

где $\alpha = 133,322 \frac{\text{Па}}{\text{мм.рт.ст.}}$ – коэффициент перевода единицы измерения давления.

Расчет полного давления газов над образцом P_2 . В системе над испытуемым образцом также имеется смесь газов, состоящая из паров диметилкетона, воды и воздуха. Осуществление кондиционирования воздуха в испытательной камере предполагает, что при расчете полного давления газов над образцом, помимо парциального давления паров диметилкетона над образцом, следует учитывать парциальное давление водяных паров P_{H_2O} в испытательной камере, кото-

рое зависит от температуры и относительной влажности воздуха внутри камеры [10]:

$$P_{H_2O} = \frac{\varphi P_{H_2O}^{нас}}{100}, \quad (9)$$

где P_{H_2O} – парциальное давление водяного пара при температуре T и относительной влажности φ , Па; $P_{H_2O}^{нас}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре T , определяемое по справочным данным, Па; φ – относительная влажность воздуха в испытательной камере, %.

Парциальное давление паров диметилкетона в системе над образцом зависит от температуры и параметров кондиционирования в испытательной камере:

$$P_{H_2O} = \chi P_{CH_3COCH_3}^{нас}, \quad (10)$$

где $P_{CH_3COCH_3}$ – парциальное давление паров диметилкетона при температуре T и коэффициенте кондиционирования χ , Па; χ – коэффициент кондиционирования, определяемый экспериментально-вычислительным методом согласно нижеописанной методике.

Таким образом, получаем формулу для расчета полного давления газов P_2 над образцом:

$$P_2 = \frac{\varphi P_{H_2O}^{нас}}{100} + \chi P_{CH_3COCH_3}^{нас}. \quad (11)$$

Определение сопротивления паропроонианию воздуха $R_{n.e}$. Под образцом имеется бинарная газовая система, преимущественно состоящая из паров диметилкетона и воздуха, оказывающая сопротивление паропроонианию через испытуемый образец. Поэтому при расчете коэффициента паропроониаемости штукатурного материала необходимо учитывать значение сопротивления паропроонианию воздуха, которое рассчитывается по формуле (4).

Паропроониаемость воздуха $\mu_e, \frac{\text{мг}}{\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па}}$ вычисляется по формуле Ширмера [5, 11]:

$$\mu_e = \frac{D_{AB}}{R_D \cdot T}, \quad (12)$$

где D_{AB} – коэффициент диффузии паров диметилкетона в воздухе, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $R_D = 143,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{мг} \times \text{К}}$ – газовая постоянная для паров диметилкетона; T – температура в испытательной камере, К.

Наиболее простым и достоверным способом для определения коэффициента диффузии паров диметилкетона в воздухе является метод Фуллера, Шлеттера и Гиддингса, в основе которого лежит эмпирическое уравнение, имеющее следующий вид [11]:

$$D_{AB} = \frac{10^{-3} T^{1,75} \sqrt{\frac{M_A + M_B}{M_A M_B}}}{P \left[\sqrt[3]{\sum v_A} + \sqrt[3]{\sum v_B} \right]^2}, \quad (13)$$

где D_{AB} – коэффициент диффузии паров диметилкетона в воздухе, $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$; P – атмосферное давление, атм; $M_A = 58,1 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ – молярная масса

диметилкетона; $M_B = 28,8 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ – молярная масса

воздуха; $\sum v_A = 66,9 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$ – диффузионный объем для молекулы диметилкетона;

$\sum v_B = 20,1 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$ – диффузионный объем для воздуха.

Подставляя в формулу (4) выражения (12) и (13), получаем эмпирическое уравнение для определения сопротивления паропроонианию воздуха в парах диметилкетона $R_{n.e}, \frac{\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па}}{\text{мг}}$:

$$R_{n.e} = 0,801 \cdot 10^2 d_e T^{-0,75}. \quad (14)$$

Следует отметить, что уравнение (14) справедливо только для бинарной газовой системы, состоящей из паров диметилкетона и воздуха и при нормальном атмосферном давлении.

Определение коэффициента кондиционирования χ . Коэффициент кондиционирования – величина, характеризующая совокупность автоматически поддерживаемых параметров газовой среды в испытательной камере.

$$\mu = \frac{d}{R_n} = \frac{d}{\frac{P_1 - P_2}{g_{cp}} - R_{n,в}} = \frac{d}{\frac{P_{CH_3COCH_3}^{нас} - \frac{\varphi P_{H_2O}^{нас}}{100} - \chi P_{CH_3COCH_3}^{нас}}{g_{cp}} - R_{n,в}}. \quad (15)$$

Из уравнения (15), получаем формулу для расчета коэффициента кондиционирования:

$$\chi = 1 - \frac{1}{P_{CH_3COCH_3}^{нас}} \left[\frac{\varphi P_{H_2O}^{нас}}{100} + g_{cp} \left(\frac{d}{\mu} + R_{n,в} \right) \right], \quad (16)$$

где χ – коэффициент кондиционирования; $P_{CH_3COCH_3}^{нас}$ – парциальное давление насыщенного пара диметилкетона при температуре T , Па; $P_{H_2O}^{нас}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре T , определяемое по справочным данным, Па; g_{cp} – средняя плотность диффузионного потока пара диметилкетона через образец ячеистого бетона, $\frac{МГ}{М^2 \times ч}$; μ – коэффициент паропроницаемости ячеистого бетона, определяемый теоретически согласно СТО 501-52-01-2007 или экспериментально в соответствии с ГОСТ 12852.5-77, $\frac{МГ}{М^2 \times ч \times Па}$; $R_{n,в}$ – сопротивление паропроницанию воздуха, $\frac{М^2 \times ч \times Па}{МГ}$; φ – относительная влажность воздуха в испытательной камере, %; d – средняя толщина испытуемого образца, м.

Для определения средней плотности потока пара диметилкетона через образец, выполненный из ячеистого бетона, используют вышеописанную методику проведения эксперимента.

Расчет коэффициента паропроницаемости штукатурного материала μ . В ходе эксперимента получаем данные результатов взвешивания пяти эксикаторов с образцами в различные

Для определения коэффициента кондиционирования используем формулу (6), которая для ячеистого бетона будет иметь вид

моменты времени. По результатам взвешивания определяется среднее значение плотности диффузионного потока пара диметилкетона через испытуемые образцы:

$$g_{cp} = \frac{1000}{nmS} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{m_{j-1} - m_j}{\tau_j - \tau_{j-1}} \right]_i, \quad (17)$$

где g_{cp} – среднее значение плотности диффузионного потока пара диметилкетона, $\frac{МГ}{М^2 \times ч}$; m_j – масса эксикатора с i -м образцом в момент времени τ_j , г; τ_j – время взвешивания в j -м порядке, ч; S – площадь рабочей поверхности испытуемого образца, $М^2$; n – количество испытуемых образцов; m – количество взвешиваний каждого эксикатора с i -м образцом.

Далее определяется сопротивление паропроницанию штукатурного материала по формуле [5, 7]:

$$R_n = \frac{P_1 - P_2}{g_{cp}} - R_{n,в}, \quad (18)$$

По результатам всех предварительных расчетов производят вычисление коэффициента паропроницаемости исследуемых штукатурных материалов по формуле (6).

Результаты и обсуждение

На первом этапе мы определили значение сопротивления паропроницанию воздуха в парах диметилкетона при температуре 293 К, нормальном атмосферном давлении и толщине воздушного слоя под испытуемым образцом равной 17 мм.

Вычисление $R_{n,6}$ проводилось по эмпирическому уравнению (14):

$$R_{n,6} = 0,801 \cdot 10^2 d_g T^{-0,75} = 0,801 \cdot 10^2 \cdot 0,017 \cdot 293^{-0,75} = 1,92 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па}}{\text{мг}}. \quad (19)$$

Проведение эксперимента по определению коэффициента кондиционирования χ осуществлялось по вышеописанной методике. Результаты периодических взвешиваний испытательных сосудов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты гравиметрических измерений для определения коэффициента кондиционирования

Время взвешивания, ч	Масса эксикатора с образцом из ячеистого бетона марки D400, г				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
0	1373,24	1374,51	1373,56	1377,32	1370,10
1	1372,52	1373,82	1372,82	1376,66	1369,43
2	1371,87	1373,11	1372,16	1376,03	1368,77
4	1370,51	1371,68	1370,86	1374,68	1367,33
6	1369,02	1370,33	1369,42	1373,37	1366,03
24	1356,37	1356,51	1356,41	1360,45	1352,78
26	1355,11	1355,19	1354,99	1359,17	1351,32
28	1353,73	1353,94	1353,52	1357,91	1349,84
30	1352,14	1352,34	1352,17	1356,41	1348,45

Из данных таблицы мы определили среднее значение плотности потока пара диметилкетона через образец, выполненный из ячеистого бетона марки D400 по выражению (17):

$$g_{cp} = \frac{1000}{nmS} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{m_{j-1} - m_j}{\tau_j - \tau_{j-1}} \right]_i = 88576,8 \frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \times \text{ч}}. \quad (20)$$

При температуре в испытательной камере, равной 293 К, значения давлений насыщенного

пара диметилкетона и воды соответственно равны:

$$P_{CH_3COCH_3}^{нас} = ae^{16,6513 - \frac{2940,46}{T - 35,93}} = 24482,3 \text{ Па}, \quad (21)$$

$$P_{H_2O}^{нас} = 2338,8 \text{ Па (справочное значение)} [7] \quad (22)$$

Подставляя полученные данные в формулу (16), мы нашли значение коэффициента кондиционирования:

$$\chi = 1 - \frac{1}{24482,3} \left[\frac{55 \cdot 2338,8}{100} + 88576,8 \cdot \left(\frac{0,03}{0,23} + 1,92 \cdot 10^{-2} \right) \right] = 0,406. \quad (23)$$

Результаты периодических взвешиваний испытательных сосудов (эксикаторов) для определения коэффициента диффузионной паропроницаемости приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты гравиметрических измерений для определения коэффициента диффузионной паропроницаемости штукатурного материала

Время взвешивания, ч	Масса эксикатора с образцом из ячеистого бетона марки D400, г				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
0	1389,68	1391,53	1388,57	1389,50	1390,72
1	1389,27	1391,09	1388,19	1389,11	1390,35
2	1388,84	1390,72	1387,83	1388,72	1389,94
4	1388,06	1390,01	1387,02	1387,86	1389,13
6	1387,24	1389,21	1386,21	1386,99	1388,36
24	1380,46	1382,54	1379,55	1379,72	1381,00
26	1379,73	1381,77	1378,75	1378,83	1380,24
28	1379,02	1380,95	1377,91	1378,11	1379,39
30	1378,30	1380,19	1377,13	1377,37	1378,61

Из данных таблицы нашли среднее значение плотности потока пара диметилкетона через образец, выполненный из штукатурного раствора, по уравнению (17):

$$g_{cp} = \frac{1000}{nmS} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{m_{j-1} - m_j}{\tau_j - \tau_{j-1}} \right]_i = 50086,1 \frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \times \text{ч}} \quad (24)$$

$$P_2 = \frac{\varphi P_{H_2O}^{нас}}{100} + \chi P_{CH_3COCH_3}^{нас} = \frac{55 \cdot 2338,8}{100} + 0,406 \cdot 24482,3 = 11228,1 \text{ Па} \quad (25)$$

Используя полученные данные, определили сопротивление паропроницанию штукатурного материала по уравнению (18):

$$R_n = \frac{P_1 - P_2}{g_{cp}} - R_{n.в} = \frac{24482,3 - 11228,1}{50086,1} - 1,92 \cdot 10^{-2} = 0,245 \frac{\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па}}{\text{мг}} \quad (26)$$

По результатам всех предварительных расчетов, используя формулу (6), рассчитали значение коэффициента диффузионной паропроницаемости штукатурного материала:

$$\mu = \frac{d}{R_n} = \frac{0,03}{0,245} = 0,122 \frac{\text{мг}}{\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па}} \quad (27)$$

Затем сравнили полученный нами результат со значением, определенным в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 25898-2012:

$$\mu_{\text{экспресс-метод}} = 0,122 \frac{\text{мг}}{\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па}} - \text{время измерений } \tau_{\text{экспресс-метод}} = 30 \text{ часов}; \quad (28)$$

$$\mu_{\text{ГОСТ 25898}} = 0,120 \frac{\text{мг}}{\text{м} \times \text{ч} \times \text{Па}} - \text{время измерений } \tau_{\text{ГОСТ 25898}} = 67 \text{ суток}. \quad (29)$$

Как видно из уравнений (28) и (29), результат, полученный по экспресс-методу, хорошо согласуется со значением, определенным в соответствии с ГОСТ 25898-2012.

Выводы

1. Сокращение времени проведения измерений коэффициента диффузионной паропроницаемости штукатурных материалов обеспечивается за счет создания диффузионного потока пара с высокой интенсивностью. Данное условие достигается за счет использования в качестве испаряющейся жидкости диметилкетона, парциальное давление насыщенного пара которого при температуре $T = 293 \text{ К}$ в 10,5 раз больше парциального давления насыщенного водяного пара. Предложено выражение, позволяющее произвести расчет полного давления газов в системе под

полное давление газов под образцом определяется парциальным давлением насыщенного пара диметилкетона, значение которого найдено в уравнении (21).

Полное давление смеси газов над образцом нашли по формуле (11):

испытуемым образцом, основанное на корреляционном уравнении Антуана.

2. Для расчета полного давления газов в системе над образцом введен коэффициент кондиционирования, характеризующий совокупность автоматически поддерживаемых параметров газовой среды в испытательной камере с соответствующей методикой его определения.

3. Учет сопротивления паропроницанию воздуха в системе под образцом производится на основе выведенного эмпирического уравнения, использующего метод Фуллера, Шлеттера и Гиддингса для расчета коэффициента взаимной диффузии газов.

4. Определена и верифицирована наиболее простая и достоверная математическая модель обработки результатов измерений. Полученный при ускоренном методе результат хорошо согласуется со значением, определенным в соответ-

вии с методикой, описанной в ГОСТ 25898-2012, что является основанием для рекомендации разработанного метода для определения коэффициента диффузионной паропроницаемости штукатурных материалов на основе неорганических вяжущих веществ.

5. Благодаря разработанной методике впервые удалось решить проблему длительности проведения измерений по определению коэффициента диффузионной паропроницаемости штукатурных материалов.

Библиографический список

1. *Ботка Е.Н.* Рынок сухих строительных смесей России: итоги 2012 года и краткосрочные перспективы // Технологии & бизнес на рынке сухих строительных смесей. 2013. № 2. С. 1.
2. *Куприянов В.Н., Петров А.С.* Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2 (24). С. 126–131.
3. *Куприянов В.Н., Сафин И.Ш.* Паропроницаемость и проектирование ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 385–390.
4. *Копылова А.И., Ватин Н.И., Пестряков И.И.* Экспериментальное сравнение характеристик паропроницаемости основных строительных материалов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 10 (25). С. 98–108.
5. *Перехоженцев А.Г., Степаненко В.А.* Методические основы исследования коэффициентов переноса влаги в капиллярно-пористых материалах // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов. 2005. С. 166–169.
6. *Гагарин В.Г., Пастушков П.П.* Методика определения суммарного сопротивления паропроницанию наружных отделочных слоев фасадных теплоизоляционных композиционных систем с наружными штукатурными слоями // Вест-

ник Московского государственного строительного университета. 2012. № 11. С. 140–143.

7. *Волков А.И., Жарский И.М.* Большой химический справочник. М., 2005. 608 с.
8. *Тархов К.Ю., Серафимов Л.А., Андреева А.М.* Особенности влияния относительной летучести компонентов на расчет и структуру диаграмм фазового равновесия жидкость-пар многокомпонентных смесей // Вестник Московского государственного университета тонких химических технологий. 2011. № 1. С. 61–73.
9. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей. Л., 1982. 592 с.
10. *Кнунянц И.Л.* Химия: Энциклопедия. М., 2003. 972 с.
11. *Huang H., Haghghat F.* Modelling of volatile organic compounds emission from dry building materials // Journal of Building and Environment. 2002. Vol. 37. Iss. 12. P. 1349–1360.

References

1. Botka, E.N. "The market of dry building mixes in Russia: results of 2012 and short-term prospects", *Technology & business in the market of dry mixes*, 2013, no. 2, pp. 1.
2. Kupriyanov, V.N., Petrov, A.S. "Water vapor permeability of materials under actual operating conditions", *Journal of Kazan State University of Architecture and Engineering*, 2013, no. 2 (24), pp. 126–131.
3. Kupriyanov, V.N., Safin, I.Sh. "Vapour transfer and designing of enclosing structures", *Academia. Architecture and Construction*, 2010, no. 3, pp. 385–390.
4. Kopylova, A.I., Vatin, N.I., Pestryakov, I.I. "Experimental comparison of the characteristics of water vapor permeability of the main construction materials", *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, no. 10 (25), pp. 98–108.
5. Perekhzhentsev, A.G., Stepanenko, V.A. "Methodological basis of research coefficient of moisture transport in porous materials", *The reliability and durability of building materials, structures and foundation bases*, 2005, pp. 166–169.

6. Gagarin, V.G., Pastushkov, P.P. "Methodology of identification of the overall water vapour permeability resistance of external finishing layers of composite thermal insulation facade systems that have external plaster layers", *Journal of Moscow State Construction University*, 2012, no. 11, pp. 140–143.
7. Volkov, A.I., Zharsky, I.M. (2005), "Bol'shoi khimicheskii spravochnik" [Large chemical reference], Minsk, 608 p.
8. Tarhov, K.Yu., Serafimov, L.A., Andreeva, A.M. "The impact of the relative volatilities of the components on the structure of phase diagrams of liquid-vapor equilibrium of multicomponent mixtures", *Journal of Fine Chemical Technology*, 2011, no. 1, pp. 61–73.
9. Reid, R., Prausnitz, J., Sherwood, T. (1978) "Svoistva gazov i zhidkosti" [The Properties of Gases and Liquids], McGraw-Hill, 688 p.
10. Knunyants, I.L. (2003) "Khimiia: Enciclopedia" [Chemistry: Encyclopedia], Moscow, 972 p.
11. Huang, H., Haghghat, F. "Modelling of volatile organic compounds emission from dry building materials", *Journal of Building and Environment*, 2002, Vol. 37, Iss. 12, pp. 1349–1360.

Поступила в редакцию 22.03.2017 г.

Об авторах

Арасланкин Сергей Валерьевич
преподаватель кафедры физической химии Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва
430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68
+7 (8342) 29-05-42
araslankin@bk.ru

Кострюков Сергей Геннадьевич
кандидат химических наук, доцент кафедры органической химии Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва
430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68
+7 (8342) 29-05-42
kostryukov_sg@rambler.ru

Томилин Олег Борисович
кандидат химических наук, заведующий кафедрой физической химии Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва
430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68
+7 (8342) 29-05-42
tomilinob@mail.ru

About the authors

Araslankin Sergey Valerievich
Lecturer of Department of Physical Chemistry of National Research Ogarev Mordovia State University
430005, Saransk, Bolshevistskaya st., 68
+7 (8342) 29-05-42
araslankin@bk.ru

Kostryukov Sergey Gennadievich
Ph. D. in Chemistry, Assoc. Prof. of Department of Organic Chemistry of National Research Ogarev Mordovia State University
430005, Saransk, Bolshevistskaya st., 68
+7 (8342) 29-05-42
kostryukov_sg@rambler.ru

Tomilin Oleg Borisovich
Ph. D. in Chemistry, Head of Department of Physical Chemistry of National Research Ogarev Mordovia State University
430005, Saransk, Bolshevistskaya st., 68
+7 (8342) 29-05-42
tomilinob@mail.ru

Информация для цитирования:

Арасланкин С.В., Кострюков С.Г., Томилин О.Б. Экспресс-метод определения коэффициента диффузионной паропроницаемости штукатурных материалов на основе неорганических вяжущих веществ // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2017. Т. 7, Вып. 1 С. 83–93. DOI: 10.17072/2223-1838-2017-1-83-93.

Araslankin, S.V., Kostryukov, S.G., Tomilin, O.B. *Ekspress-metod opredeleniya koeffitsiyenta difuzionnoy paropronitsayemosti shtukaturnykh materialov na osnove neorganicheskikh vyazhushchikh veshchestv* [Accelerated method for the determining of the diffusion steam-permeability coefficient of plastering materials based on inorganic binders] // Vestnik Permskogo universiteta. Seriya «Khimiya» – Bulletin of Perm University. Series "Chemistry". 2017. Vol. 7, № 1. P. 83–93. (In Russ.). DOI: 10.17072/2223-1838-2017-1-83-93.