

¹Тамбовский государственный
технический университет,
г. Тамбов

²Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина,
г. Воронеж

³Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ В БЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматривается метрологический анализ методов, обеспечивающих возможность определения коэффициента диффузии в блочных изделиях из пористых материалов без их разрушения. Методы основаны на различных видах импульсных воздействий на плоскую поверхность изделий и контроле реакции на них в виде изменения электродвижущей силы электрохимического преобразователя. Оба метода исключают необходимость проведения длительной операции градуировки применяемого преобразователя по каждому новому пористому материалу и диффундирующему полярному растворителю, что обеспечивает повышение оперативности исследований. Обоснованы области предпочтительного использования анализируемых методов в контексте обеспечения приемлемой точности, в том числе при наличии выраженной анизотропии свойств.

Ключевые слова: пористые материалы, блочные изделия, коэффициент диффузии, неразрушающий контроль, импульсные методы.

Введение. Производство и эксплуатация изделий из пористых материалов (ПМ) происходит в условиях значительных затрат энергии и связано с миграцией распределенных в твердой фазе влаги или других веществ. В настоящее время широко используются изделия из ПМ в виде блоков и панелей, которые, с точки зрения процессов тепло- и массопереноса, могут быть отнесены к массивным телам. Блочные изделия из пористых материалов активно используются в энергетике [1, 2], в области получения и использования промоторов, катализаторов и наноструктурированных материалов [3, 4], в области создания блочных систем очистки и регенерации воздуха [5, 6], других перспективных направлениях развития современного производства [7–9]. Например, в строительной индустрии это кирпич, блоки, плиты, панели из гипсокартона, цементно-стружечные плиты, формованные теплоизоляторы

и пр. Процессы диффузии являются основными при производстве и эксплуатации таких изделий. Диффузия влаги, например, в пористых строительных изделиях во многом определяет микроклимат в помещении и эффективность теплозащитных свойств ограждающих конструкций [10, 11]. Для повышения эффективности процессов производства и эксплуатации блочных изделий из пористых материалов требуется знание коэффициента диффузии, входящего в состав уравнений математических моделей процессов. Особенности технологий получения рассматриваемого класса изделий или целенаправленные мероприятия при производстве изделий в ряде случаев приводят к заметной анизотропии свойств ПМ [12]. Это приводит к необходимости использования более точных математических моделей при разработке соответствующих методов и усложнению измерительных процедур [13].

В настоящее время измерение коэффициентов диффузии в блочных изделиях из ПМ проводится методами, связанными с необходимостью регистрации эволюций во времени пространственных распределений диффузанта в твердой фазе исследуемых образцов, что является достаточно сложной задачей. При этом необходимо либо разрезать исследуемые образцы на части и определять содержание диффузанта различными методами, что вносит искажения в процесс массопереноса [14]. Либо применять сложное, дорогостоящее оборудование, имеющее значительные габариты и вес [15, 16]. В большинстве случаев контролю подлежит не само изделие, а его аналог — образец для исследования, специально изготовленный по рецептуре и технологии самого изделия [15] или полученный из изделия путем его механической обработки, после которой изделие полностью или частично теряет свои потребительские свойства [14]. Поэтому большинство применяемых методов и реализующих их измерительных устройств затруднительно использовать для оперативного измерения коэффициента диффузии непосредственно в готовых изделиях [15]. Существенное повышение быстродействия измерительной аппаратуры для исследования процессов тепло- и массопереноса достигается при использовании импульсных методов при наличии плоских участков контролируемых изделий заданных размеров [17]. Эти методы позволяют обеспечить сохранность изделий, подлежащих контролю, они могут быть отнесены к контактным методам неразрушающего контроля (НК) [18]. Контроль блочных изделий из ПМ, с точки зрения измерения коэффициента диффузии, может быть также осуществлен аналогичными методами неразрушающего контроля.

Постановка задачи. Цель исследования — метрологический анализ методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии в блочных изделиях из пористых материалов и определение предпочтений в их использовании для исследований изотропных и анизотропных пористых материалов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ точности рассматриваемых методов, выявить доминанты результирующей погрешности измерения искомого коэффициента диффузии и получить расчетные выражения их зависимости от влияющих факторов;

- дать заключение о целесообразности использования каждого из методов для определения коэффициента диффузии в случаях наличия или отсутствия анизотропии свойств блочных изделий из пористых материалов.

Теория. При построении импульсных методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии в блочных изделиях из пористых материалов необходимо контролировать реакцию объекта на импульсные воздействия дозой диффузанта в виде изменения его концентрации в твердой фазе на заданных расстояниях от мест нанесения воздействий [19]. Причем для обеспечения приемлемой чувствительности измерительной аппаратуры и быстродействия методов заданные расстояния находятся в пределах нескольких миллиметров. Поэтому должна быть обеспечена высокая локальность контроля концентрации диффузанта, т.к. входящее в расчетные выражения для результирующей погрешности определения коэффициента диффузии значение погрешности определения координаты δr_0 существенно возрастает при увеличении толщины

слоя, изменение концентрации в котором влияет на выходную характеристику применяемых датчиков [20]. По этой причине большинство известных электрофизических преобразователей затруднительно использовать при реализации методов НК, т.к. рассматриваемая компонента результирующей погрешности при их использовании может достигать нескольких десятков процентов [20]. Причиной этого являются сравнимые величины толщин информативных слоев материала, примыкающих к чувствительным элементам датчиков концентрации, с расстояниями от мест нанесения импульсных воздействий до датчиков. А также непрерывно и динамично изменяющаяся концентрация диффузанта в этих слоях [21]. Кроме того, практически вся применяемая измерительная аппаратура для контроля концентрации распределенных в твердой фазе диффузанта за исключением использующих малопродолжительные весовые и химические методы, нуждается в индивидуальной градуировке по каждой новой системе диффузанта — пористый материал. А наиболее часто используемые приемы послойного измерения концентрации при исследовании характеристик массопереноса путем разрезания изделий на части [14] неприемлемы с точки зрения необходимости обеспечения неразрушающего контроля.

Для измерения коэффициента диффузии полярных растворителей в изделиях из пористых материалов разработан ряд методов неразрушающего контроля [22–24]. В этих методах в качестве сенсора локальной концентрации диффузанта используется гальванический преобразователь (ГП) — датчик генераторного типа [21]. При расположении электродов ГП на эквипотенциальных поверхностях контролируемых изделий обеспечивается высокая локальность контроля концентрации диффузанта [17]. Эти методы базируются на использовании точечного [22, 23] или линейного [23, 24] импульсных воздействий на плоскую поверхность изделий. Методы условно можно разделить по виду изделий из ПМ, для которых они могут быть пригодны: тонколистовые или блочные.

В [22] проведен анализ методов НК для контроля тонколистовых изделий из пористых материалов и даны рекомендации по их использованию с целью обеспечения приемлемой точности. Проведем метрологический анализ методов НК, предназначенных для определения коэффициента диффузии в блочных изделиях из ПМ.

Метод точечного импульсного воздействия. При реализации метода к плоской поверхности исследуемого изделия прижимается измерительный зонд [25], имеющий отверстие для временного размещения точечного источника дозы диффузанта. На обращенной к исследуемому изделию поверхности измерительного зонда и на заданном расстоянии от отверстия для нанесения импульсного воздействия размещены электроды ГП. Подачей импульса диффузанта в исследуемом блочном изделии из ПМ организуют массоперенос, соответствующий процессу диффузии в неограниченном шаре при действии точечного источника. Коэффициент диффузии находится по следующему выражению [23]:

$$D = r_0^2 / (6\tau_{\max}), \quad (1)$$

где r_0 — координата контроля реакции на импульсное воздействие; τ_{\max} — время достижения максимальной амплитуды реакции на воздействие.

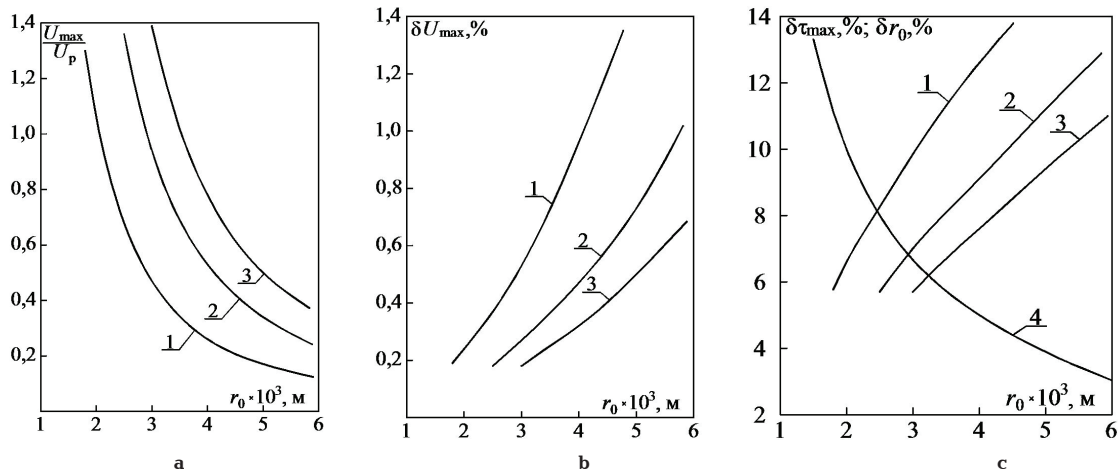


Рис. 1. Влияние расстояния от импульсного источника до электродов преобразователя на технологические и метрологические параметры метода при различной мощности источника W ($\times 10^3$ кг/м): 1 — 3.0; 2 — 6.0; 3 — 9.0

Использование ГП в качестве сенсора концентрации диффузанта [21] позволяет определять значение τ_{\max} в момент достижения электродвижущей силой (ЭДС) этого преобразователя своего максимального значения. Этим обеспечивается высокая производительность исследований, т.к. исключается необходимость проведения градуировки ГП по каждому ПМ и диффузantu.

Метод линейного импульсного воздействия. Реализация метода осуществляется с помощью измерительного зонда, прижимаемого к плоской поверхности исследуемого изделия [25]. Зонд имеет паз для временного размещения линейного источника дозы диффузанта постоянной производительности. На обращенной к исследуемому изделию поверхности измерительного зонда и на заданном расстоянии от паза для нанесения импульсного воздействия размещены электроды ГП. Подачей импульса диффузанта в исследуемом блочном изделии из ПМ организуют массоперенос, соответствующий распространению диффузанта в неограниченном цилиндре при действии линейного источника. Коэффициент диффузии находится по следующему выражению [24]:

$$D = r_0^2 / (4\tau_{\max}), \quad (2)$$

где r_0 — расстояние от линии нанесения импульса до электродов ГП; τ_{\max} — момент времени, при котором достигается максимум на кривой изменения концентрации диффузанта.

Проанализируем методы, с точки зрения обеспечения минимальной погрешностей измерений. В соответствии с представлениями классической метрологии результирующая погрешность измерения искомого коэффициента диффузии при использовании обоих методов имеет одинаковый вид, определяемый видом расчетных соотношений (1) и (2) [23, 24]:

$$\delta D = \sqrt{4(\delta r_0)^2 + (\delta \tau_{\max})^2 + (\delta_m)^2},$$

где $\delta r_0 = \Delta r_0 / r_0$ — относительная погрешность измерения координаты размещения электродов ГП [21]; $\delta \tau_{\max} = \Delta \tau_{\max} / \tau_{\max}$ — относительная погрешность определения τ_{\max} ; δ_m — методическая погрешность [22, 23].

При использовании ГП в качестве оценки δr_0 может использоваться величина $\pm d/2r_0$, где d — диаметр электродов гальванического преобразователя [21].

Характер зависимости δr_0 изображен на рис. 1с. При одинаковых расстояниях от источников до электродов ГП величину δr_0 можно считать одинаковой для обоих методов. Примем также положение, что при использовании обоих методов приблизительно одинаковые значения принимает и методическая погрешность δ_m .

Проведем анализ $\delta \tau_{\max}$. Исследования показывают, что зависимость $\delta \tau_{\max}$ от влияющих факторов имеет сложный характер.

На рис. 1 представлены результаты численных экспериментов для метода с линейным источником по определению зависимости достигаемых максимальных значений концентрации (а), относительной погрешности их измерения $\delta U_{\max} = \Delta U / U_{\max}$ (б), компонент δr_0 и $\delta \tau_{\max}$ (с) результирующей погрешности δD от расстояния r_0 , где ΔU — абсолютная погрешность измерения концентрации.

Результаты расчетов приведены для трех значений дозы импульса W при диффузии этанола в цементно-волокнистой плите. Максимальные значения концентрации представлены в относительной форме $\delta U_{\max} / U_p$, где U_p — равновесная с собственными насыщенными парами концентрация диффузанта в твердой фазе исследуемого ПМ при заданной температуре. Кривые $\delta U_{\max} = \Delta U / U_{\max}$ получены в предположении о постоянстве ЭДС преобразователя $\delta E = 0,5\%$ в рациональном диапазоне статической характеристики ГП [23]. Диаметр электродов ГП при расчетах δr_0 принимался равным 0,2 мм.

Аналогичные исследования проведены и для метода с точечным источником [26]. Анализ кривых в [26] и на рис. 1 свидетельствует о том, что при расположении электродов на расстоянии $r_0 \geq 4$ мм доминантной результирующей погрешности измерения искомого коэффициента диффузии при использовании любого из рассматриваемых методов является $\delta \tau_{\max}$. Остальные компоненты результирующей погрешности двух методов при использовании одинаковых размеров электродов ГП и расстояний r_0 от мест их расположения до источников имеют приблизительно одинаковые значения [19, 23, 24, 26].

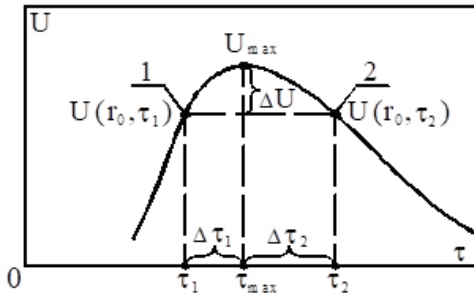


Рис. 2. Изменение во времени концентрации диффузанта

Получим расчетные выражения зависимости $\delta\tau_{\max}$ от погрешности δ измерения локальной концентрации диффузанта для каждого из рассматриваемых методов. Пусть U_{\max} — максимальное значение концентрации, достигаемое в момент времени $\tau = \tau_{\max}$ в местах расположения электродов ГП. Рис. 2 иллюстрирует изменение во времени концентрации в виде кривой, характерной для обоих методов [22].

За счет наличия погрешности ΔU измерения концентрации максимум концентрации может быть ошибочно зарегистрирован в моменты времени τ_1 (точка 1) или τ_2 (точка 2) соответственно до и после наступления действительного значения максимума U_{\max} с погрешностью $\Delta\tau_1$ или $\Delta\tau_2$ (рис. 2) [22]. Получим расчетные выражения для относительных значений $\zeta = \Delta\tau_1 \cdot (\tau_{\max})^{-1}$ и $\omega = \Delta\tau_2 \cdot (\tau_{\max})^{-1}$ погрешности определения момента времени τ_{\max} в методе, реализующего точечное импульсное воздействие, где $\Delta\tau_1 = \tau_{\max} - \tau_1$, $\Delta\tau_2 = \tau_2 - \tau_{\max}$. С течением времени после нанесения импульса концентрация диффузанта на расстоянии r_0 от источника изменяется следующим образом [23]:

$$U(r_0, \tau) = \frac{W}{8\rho_0} \cdot (\pi D\tau)^{-3/2} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4D\tau}\right), \quad (3)$$

где ρ_0 — плотность абсолютно сухого исследуемого пористого материала, kg/m^3 ; w — мощность импульсного источника, kg .

В момент времени τ_1 концентрация достигает значения:

$$U(r_0, \tau_1) = \frac{W}{8\rho_0} (\pi D\tau_1)^{-3/2} \exp\left(-\frac{3\tau_{\max}}{2\tau_1}\right). \quad (4)$$

С другой стороны, оно связано соотношением (рис. 2):

$$U(r_0, \tau_1) = U_{\max}(1 - \delta). \quad (5)$$

Точное значение максимума концентрации в момент $\delta\tau_{\max}$, учитывая связь (1), равно:

$$U(r_0, \tau_{\max}) = \frac{W}{8\rho_0} (\pi D\tau_{\max})^{-3/2} \exp(-1,5). \quad (6)$$

Приравнивая правые части уравнений (4), (5) и используя (6), получим уравнение:

$$1 - \delta = \left(\frac{\tau_{\max}}{\tau_1}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{3}{2}\left(1 - \frac{\tau_{\max}}{\tau_1}\right)\right),$$

из которого получаем зависимость погрешности ζ ошибочной регистрации факта достижения максимума концентрации в момент времени τ_1 (рис. 2):

$$\left((1 - \zeta)^{-1} \exp\left(\frac{\zeta}{\zeta - 1}\right)\right)^{3/2} = 1 - \delta. \quad (7)$$

В момент времени τ_2 концентрация достигает значения:

$$U(r_0, \tau_2) = \frac{W}{8\rho_0} (\pi D\tau_2)^{-3/2} \exp\left(-\frac{3\tau_{\max}}{2\tau_2}\right). \quad (8)$$

С другой стороны, оно связано соотношением (рис. 2):

$$U(r_0, \tau_2) = U_{\max}(1 - \delta). \quad (9)$$

Преобразуя (6), (8), (9) аналогично выше изложенному, получим уравнение:

$$1 - \delta = \left(\frac{\tau_{\max}}{\tau_2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{3}{2}\left(1 - \frac{\tau_{\max}}{\tau_2}\right)\right),$$

при использовании которого найдена зависимость от δ погрешности ω ошибочной регистрации факта достижения максимума концентрации в момент времени τ_2 (рис. 2):

$$\left((1 + \omega)^{-1} \exp\left(\frac{\omega}{1 + \omega}\right)\right)^{3/2} = 1 - \delta. \quad (10)$$

Проанализируем метод линейного импульсно-воздействия и сравним полученные результаты оценки точности с результатами анализа предыдущего метода. Получим расчетные выражения для относительных значений $y = \Delta\tau_1 \cdot (\tau_{\max})^{-1}$ и $z = \Delta\tau_2 \cdot (\tau_{\max})^{-1}$ погрешности определения момента времени τ_{\max} в методе, реализующего линейное импульсное воздействие.

С течением времени после нанесения импульса концентрация диффузанта на расстоянии r_0 от источника изменяется следующим образом [24]:

$$U(r_0, \tau) = \frac{Q}{4\rho_0} (\pi D\tau)^{-1} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4D\tau}\right), \quad (11)$$

где Q — мощность «линейного» источника, вычисляемая как отношение количества диффузанта к длине линии импульсного воздействия L , kg/m .

В момент времени τ_1 концентрация достигает значения:

$$U(r_0, \tau_1) = \frac{Q}{4\rho_0} (\pi D\tau_1)^{-1} \exp\left(-\frac{\tau_{\max}}{\tau_1}\right), \quad (12)$$

Точное значение максимума концентрации в момент τ_{\max} , учитывая связь (2), равно:

$$U(r_0, \tau_{\max}) = \frac{Q}{4\rho_0} (\pi D\tau_{\max})^{-1} \exp(-1). \quad (13)$$

Приравнивая правые части уравнений (12), (5) и преобразуя совместно с (13), получим уравнение:

$$1 - \delta = \frac{\tau_{\max}}{\tau_1} \exp\left(1 - \frac{\tau_{\max}}{\tau_1}\right).$$

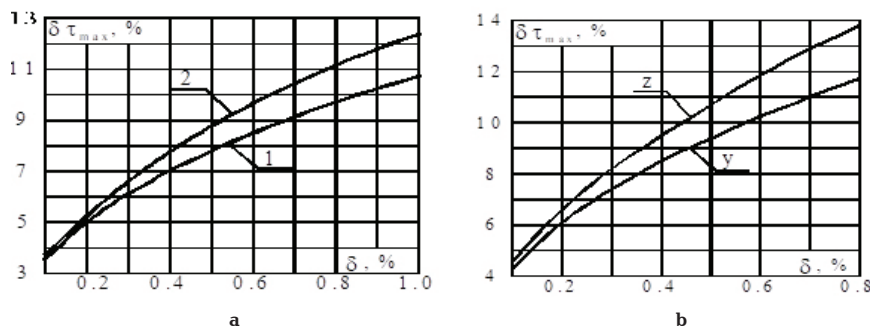


Рис. 3. Кривые ζ (1), ω (2), y и z для методов с точечным (а) и линейным (б) импульсными воздействиями

Дальнейшее преобразование приводит к получению зависимости от δ погрешности у ошибочной регистрации факта достижения максимума концентрации в момент времени τ_1 :

$$(1 - y)^{-1} \exp\left(\frac{y}{y - 1}\right) = 1 - \delta. \quad (14)$$

Аналогичным образом рассматривается точка 2 (рис. 2). В момент времени τ_2 концентрация достигает значения:

$$U(r_0, \tau_2) = \frac{Q}{4\rho_0} (\pi D \tau_2)^{-1} \exp\left(-\frac{\tau_{\max}}{\tau_2}\right). \quad (15)$$

Приравнивая правые части уравнений (15), (9) и преобразуя совместно с (13), получим уравнение:

$$1 - \delta = \frac{\tau_{\max}}{\tau_2} \exp\left(1 - \frac{\tau_{\max}}{\tau_2}\right),$$

из которого следует зависимость от δ погрешности z ошибочной регистрации факта достижения максимума концентрации в момент времени τ_2 :

$$(1 + z)^{-1} \exp\left(\frac{z}{1 + z}\right) = 1 - \delta. \quad (16)$$

Заметим, что метод линейного импульсного воздействия позволяет исследовать коэффициент диффузии в изделиях не только из изотропных ПМ, но и из анизотропных [24].

Результаты экспериментов. Зависимость относительной погрешности входящей в уравнение (1) величины τ_{\max} для метода, основанного на точечном импульсном воздействии, представлена на рис. 3а в виде двух кривых $\zeta(\delta)$ и $\omega(\delta)$, рассчитанных по уравнениям (7) и (10) для ошибочно фиксируемого значения U_{\max} в моменты времени соответственно τ_1 и τ_2 .

Для построения результирующей кривой $\delta\tau_{\max}(\delta)$ могут использоваться средние значения из $\zeta(\delta)$ и $\omega(\delta)$. Зависимости $y(\delta)$ и $z(\delta)$, рассчитанные по уравнениям (14) и (16) для метода, основанного на линейном импульсном воздействии, представлены на рис. 3б. Для каждого из рассматриваемых методов представленные зависимости (7), (10), (14) и (16) позволяют рассчитывать значения $\delta\tau_{\max}$, используя конкретные значения погрешности аппаратуры для измерения локальной концентрации диффузанта.

Обсуждение результатов. Проведенный метрологический анализ представленных методов сви-

детельствует о том, что изменение относительной погрешности определения момента времени τ_{\max} достижения максимального значения концентрации U_{\max} в зависимости от относительной погрешности δ измерения локальной концентрации диффузанта для каждого из рассмотренных методов происходит в соответствии с различными закономерностями. Кроме того, при использовании каждого из рассмотренных методов эти зависимости описываются разными видами уравнений для отрицательных и положительных отклонений от действительного значения τ_{\max} — соответственно уравнения (7), (10) и (14), (16). При построении обобщенных зависимостей погрешности $\delta\tau_{\max}$ от δ для каждого из методов предлагается использовать средние значения, рассчитываемые соответственно по уравнениям (7), (10) и (14), (16), допуская равновероятный характер появления отрицательных и положительных отклонений от действительного значения τ_{\max} . Анализ показал (рис. 3), что при прочих равных условиях более высокой точностью обладает метод, использующий точечное воздействие на блочное изделие из пористых материалов. Так, например, при относительной погрешности измерения локальной концентрации $\delta = 0,5\%$ расчетная погрешность $\delta\tau_{\max}$ измерения момента времени, при котором наблюдается максимум ЭДС гальванического преобразователя, составляет $\sim 8,3\%$ и $\sim 10,1\%$ при использовании методов соответственно с точечным и линейным воздействием (рис. 3а и 3б — средние значения кривых 1 и 2).

Однако при наличии заметной анизотропии свойств пористых материалов, применяемых в изделиях, метод с точечным воздействием менее предпочтителен. Его применение осложняется наличием существенной методической погрешности δ_m , вызванной различной скоростью распространения диффузанта в разных направлениях материала, например, вдоль и поперек ориентированного расположения волокон [24]. В этом случае рекомендуется применять метод с линейным источником [24].

Проведенные экспериментальные исследования диффузии влаги и этанола в ряде блочных изделий из ПМ подтвердили сопоставимую производительность представленных методов и воспроизводимость результатов измерений. Длительность эксперимента не превышала 70 минут. В отсутствие эталонных материалов для измерения коэффициента диффузии проводилась оценка случайной составляющей погрешности. При обработке экспериментальных данных измерения коэффициента диффузии получены следующие результаты оценки случайной погрешности: $\sim 7-8\%$ для метода с точечным источником и $\sim 9-11\%$ для метода с линейным источником

при контроле блочных изделий соответственно из изотропных и анизотропных материалов.

Заключение. Сравнение метрологических характеристик представленных методов неразрушающего контроля блочных изделий из пористых материалов свидетельствует о том, что при прочих равных условиях более высокой точностью обладает метод, основанный на точечном воздействии на объект исследований. Лишь при условии заметной анизотропии свойств пористого материала в качестве инструмента для определения коэффициента диффузии рекомендуется использование метода с линейным источником, т.к. в этом случае измерение искомого коэффициента, согласно методу с точечным источником, связано со значительной методической погрешностью.

Полученные результаты коррелируются с результатами анализа методов неразрушающего контроля, разработанных для определения коэффициента диффузии в тонколистовых изделиях из пористых материалов [22].

Библиографический список

1. Игошин Д. Е., Хромова Н. А. Фильтрационно-емкостные свойства периодической пористой среды ромбоэдрической структуры со скелетом из шаровых сегментов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2, № 3. С. 107–127. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-107-127.
2. Díaz P., González Z., Santamaría R. [et al.]. Optimization of a carbon-based hybrid energy storage device with cerium (III) sulfate as redox electrolyte // Journal of Power Sources. 2016. Vol. 309. P. 50–55. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.01.088.
3. Синтез пористого Al/Al_2O_3 -носителя катализатора, стимулируемый электромагнитным излучением СВЧ-диапазона / Ю. Н. Литвишков [и др.] // Катализ в промышленности. 2012. № 1. С. 69–74.
4. Liyaskina E., Revin V., Paramonova E. [et al.]. Nanomaterials from bacterial cellulose for antimicrobial wound dressing // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2017. Vol. 784, Issue 1. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/784/1/012034.
5. Кайль В. И., Железнова К. А., Новикова Е. А. Сорбционные свойства блочного материала с варьируемой порозностью на основе оксида алюминия // Химическая безопасность. 2019. Т. 3, № 6. С. 49–55. DOI: 10.25514/CHS.2019.Special.4.
6. Панасюгин А. С., Ломоносов В. А., Сморгыо О. Л. Использование адсорбционно-каталитического метода для очистки вентиляционных выбросов формовочных участков литейных цехов от паров фенола и формальдегида // Литье и металлургия. 2014. № 2 (75). С. 19–25.
7. Valiullin R. The impact of mesopores on mass transfer in nanoporous materials: evidence of diffusion measurement by NMR // Chemie Ingenieur Technik. 2011. Vol. 83, Issue 1-2. P. 166–176. DOI: 10.1002/cite.201000208.
8. Jahangiri M., Shahtaheri S. J., Adl J. [et al.]. Preparation of activated carbon from walnut shell and its utilization for manufacturing organic-vapour respirator cartridge // Fresenius Environmental Bulletin. 2012. Vol. 21 (6). P. 1508–1514.
9. Jelle B. P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions — Properties, requirements and possibilities // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43, Issue 10. P. 2549–2563. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
10. Heinse R., Jones S. B., Or D. [et al.]. Microgravity oxygen diffusion and water retention measurements in unsaturated porous media aboard the International Space Station // Vadose Zone Journal. 2015. Vol. 14, Issue 6. DOI: 10.2136/vzj2014.10.0135.
11. Vasiliev L. L., Kakaz S. Heat Pipes and Solid Sorption Transformations: Fundamentals and Practical Applications. USA: CRC Press, 2013. 536 p. ISBN 1466564148; 978-1466564145.
12. Garshin A. P., Kulik V. I., Matveev S. A. [et al.]. Contemporary technology for preparing fiber-reinforced composite materials with a ceramic refractory matrix (review) // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 58, Issue 2. P. 148–161. DOI: 10.1007/s11148-017-0073-4.
13. Haussener S., Steinfeld A. Effective heat and mass transport properties of anisotropic porous ceria for solar thermochemical fuel generation // Materials. 2012. Vol. 5 (1). P. 192–209. DOI: 10.3390/ma5010192.
14. Janz M. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels // Division of Building Materials. 1997. 84 p.
15. Chari M. N., Shekarchizadeh M. A. Simplified Method for Determination of the Moisture Transfer Coefficient of Concrete // International Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 15, Issue 8. P. 1131–1142. DOI: 10.1007/s40999-017-0243-2.
16. Zhao Y., Xue Sh., Han S. [et al.]. Characterization of unsaturated diffusivity of tight sandstones using neutron radiography // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 124. P. 693–705. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.090.
17. Ponomarev S. V., Bulanova V. O., Divin A. G. [et al.]. Optimization of Measurements of the Thermophysical Parameters of Heat-Insulating Materials by Means of a Linear Pulse Heat Source // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60, Issue 6. P. 583–588. DOI: 10.1007/s11018-017-1239-7.
18. Selivanova Z. M., Khoan T. A. A systematic method of improving the accuracy of an information and measuring system for determining the thermophysical properties of materials under the effect of destabilizing factors // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60, Issue 5. P. 473–480. DOI: 10.1007/s11018-017-1220-5.
19. Belyaev V. P., Belyaev M. P., Mishchenko S. V. [et al.]. The Design of a Measuring Instrument for Determining the Diffusion Coefficient of Solvents in Thin Articles Made of Capillary-Porous Materials // Measurement Techniques. 2014. Vol. 56, Issue 10. P. 1190–1196. DOI: 10.1007/s11018-014-0353-z.
20. Mishchenko S. V., Belyaev P. S., Gladkikh V. A. [et al.]. Effective Diffusion Coefficient of Active Solvents in Composite Polymeric Materials // Drying Technology. 1999. Vol. 17, Issue 10. P. 2151–2167. DOI: 10.1080/07373939908917677.
21. Мищенко С. В., Беляев П. С., Фролов А. П. Определение локальных значений содержания жидкой фазы в дисперсных материалах // Метрология. 1988. № 8. С. 55–61.
22. Belyaev V. P., Varepo L. G., Belyaev P. S. [et al.]. Choosing Non-Destructive Testing Method to Determine Diffusion Coefficient for Products from thin Capillary-Porous Materials // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. 050017. DOI: 10.1063/1.5122160.
23. Belyaev V. P., Mishchenko S. V., Belyaev P. S. Implementation of Nondestructive Testing of Massive Products in Measuring the Diffusivity of Solvents // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90, Issue 3. P. 697–704. DOI: 10.1007/s10891-017-1617-7.
24. Belyaev V. P., Mishchenko S. V., Belyaev P. S. Method of non-destructive control of the solvent diffusion coefficient in products made from anisotropic porous materials // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2018. Vol. 1050. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012010.
25. Belyaev V. P., Mishchenko S. V., Belyaev P. S. [et al.]. Methods and devices of non-destructive solvent diffusion coefficient control in products made from capillary-porous materials // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. 050003. DOI: 10.1063/1.5051947.
26. Belyaev V. P., Mishchenko S. V., Belyaev P. S. Non-destructive testing method for determining the solvent diffusion coefficient in the porous materials products // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2017. Vol. 944. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012014.

БЕЛЯЕВ Вадим Павлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Управления

фундаментальных и прикладных исследований Тамбовского государственного технического университета (ТГТУ), г. Тамбов.

SPIN-код: 9409-4556

AuthorID (РИНЦ): 832803

ORCID: 0000-0002-5424-6693

AuthorID (SCOPUS): 56160919400

ResearcherID: P-6013-2017

Адрес для переписки: belvp8@rambler.ru

БЕЛЯЕВ Максим Павлович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, г. Воронеж.

SPIN-код: 1717-8770

AuthorID (РИНЦ): 906392

AuthorID (SCOPUS): 35179182000

Адрес для переписки: belyaev_mp@mail.ru

ВАРЕПО Лариса Григорьевна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4980-6679

AuthorID (РИНЦ): 657039

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

ResearcherID: B-1163-2015

Адрес для переписки: larisavarepo@yandex.ru

БЕЛЯЕВ Павел Серафимович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Материалы и технология», ТГТУ, г. Тамбов.

SPIN-код: 9365-1932

AuthorID (РИНЦ): 273180

ORCID: 0000-0003-4277-8366

AuthorID (SCOPUS): 6603681897

ResearcherID: A-8183-2017

Адрес для переписки: bps800@yandex.ru

ПАВЛИНОВ Владимир Васильевич, магистрант гр. МТУ-21 технологического института, ТГТУ, г. Тамбов.

Адрес для переписки: polymes@asp.tstu.ru

Для цитирования

Беляев В. П., Беляев М. П., Варепо Л. Г., Беляев П. С., Павлинов В. В. Обоснование предпочтений при выборе методов неразрушающего контроля для измерения коэффициента диффузии в блочных изделиях из пористых материалов // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 53–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-53-59.

Статья поступила в редакцию 19.05.2020 г.

© В. П. Беляев, М. П. Беляев, Л. Г. Варепо, П. С. Беляев, В. В. Павлинов