

документах затрудняет исполнение норм действующего законодательства, касающегося здравоохранения. Предложенные методы учета влияния кратковременной нестабильности и пространственного разрешения можно использовать не только при измерениях РХЧ, но и в других задачах радионуклидной диагностики. Так, большинство параметров, определяемых при диагностике на γ -камере, также как и РХЧ, являются отношениями значений активности. Разница заключается лишь в том, что при измерениях РХЧ анализируется распределение активности по одной координате, а при измерениях, например, параметров почечной уродинамики — в двух пространственных координатах и по времени.

Л и т е р а т у р а

1. Государственная фармакопея РФ. Изд. XII ч. 1. М.: 2007.
2. Федеральный закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 г. «Об обеспечении единства измерений».

3. Богородская М. А., Кодина Г. Е. Химическая технология радиофармацевтических препаратов. М.: 2010.

4. ГОСТ 28365—89. Реактивы. Метод бумажной хроматографии.

5. ГОСТ 28366—89. Реактивы. Метод тонкослойной хроматографии.

6. РМГ 29—99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

7. ГОСТ 8.009—84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

8. Руководство по выражению неопределенности измерения. Изд-во: СПб: ВНИИМ, 1999.

9. РМГ 91—2009. ГСИ. Совместное использование понятий «Погрешность измерения» и «Неопределенность измерения». Общие принципы.

Дата принятия 27.06.2013 г.

66.063.2.011

Проектирование измерительного устройства для определения коэффициента диффузии растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов

В. П. БЕЛЯЕВ, М. П. БЕЛЯЕВ, С. В. МИЩЕНКО, П. С. БЕЛЯЕВ

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия,
e-mail: bps@asp.tstu.ru

Рассмотрены вопросы проектирования устройства для определения коэффициента диффузии растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов с учетом обеспечения удовлетворительной точности и производительности метода неразрушающего контроля.

Ключевые слова: капиллярно-пористый материал, неразрушающий контроль, коэффициент диффузии.

The problems of design of the device for determination of diffusion coefficient of solvents in thin capillary-porous material products with taking into account the assurance of satisfactory accuracy and productivity of non-destructive testing method are considered.

Key words: capillary-porous material, non-destructive control, diffusion coefficient.

Разработка высокопроизводительных методов неразрушающего контроля коэффициента диффузии (КД) растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов играет важную роль для организации и совершенствования технологических процессов производства, например, различных сортов бумаги, тканей и позволяет получать оперативную информацию о качестве продукции и перспективах ее использования.

Разработан экспресс-метод неразрушающего контроля КД растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов. Сущность предлагаемого метода заключается в следующем. Приблизительно в центре плоской поверхности изделия достаточных размеров наносится точеч-

ное импульсное воздействие в виде дозы растворителя. Процесс распространения массы растворителя при условии пренебрежимо малой толщины исследуемого листового материала и достаточных размерах плоского участка, описывается краевой задачей, аналогичной распространению массы в неограниченной среде при нанесении импульсного воздействия от линейного источника массы:

$$\partial U / \partial \tau = D (\partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2) + Q \delta(x, y, \tau) / \rho_0;$$

$$-\infty < x < \infty, -\infty < y < \infty, \tau \geq 0;$$

$$U(x, y, 0) = U_0 - \text{const};$$

$$\partial U(x, 0, \tau) / \partial y = 0; \quad \partial U(0, y, \tau) / \partial x = 0;$$

$$U \rightarrow U_0 \text{ при } |x|, |y| \rightarrow \infty,$$

где $U(x, y, \tau)$ — концентрация распределенного в твердой фазе вещества; τ — время; D — коэффициент диффузии; x, y — пространственные координаты; Q — мощность мгновенного источника растворителя, вычисляемая как отношение количества жидкой фазы, наносимое в течение импульса, к толщине h исследуемого капиллярно-пористого материала; $\delta(x, y, \tau)$ — дельта-функция Дирака; ρ_0 — плотность абсолютно сухого исследуемого материала; U_0 — начальное содержание растворителя в материале в момент времени $\tau = 0$.

В этом случае изменение концентрации растворителя в зоне действия источника описывается функцией

$$U(r, \tau) = Q / (4\pi\tau \exp[-r^2/(4D\tau)]).$$

При толщине $h < 10 r_0$ листового материала КД растворителя можно определить по расчетному соотношению

$$D = r_0^2 / (4\tau_{\max}), \quad (1)$$

где $\tau_{\max}$ — время, соответствующее максимуму на кривой $U(r_0, \tau)$ изменения концентрации растворителя на расстоянии r_0 от точечного источника; r — радиальная координата, отсчитываемая от оси источника.

Цель настоящей работы — проектирование измерительного устройства для реализации предложенного метода неразрушающего контроля с удовлетворительной точностью и производительностью исследований в заданном диапазоне изменения искомого КД растворителей.

По заказу предприятий, занимающихся производством, переработкой и использованием различных сортов бумаги и тканей для резиновой промышленности, диапазон работоспособности проектируемого устройства должен находиться в пределах $(0,5-15) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ изменения искомого КД растворителей.

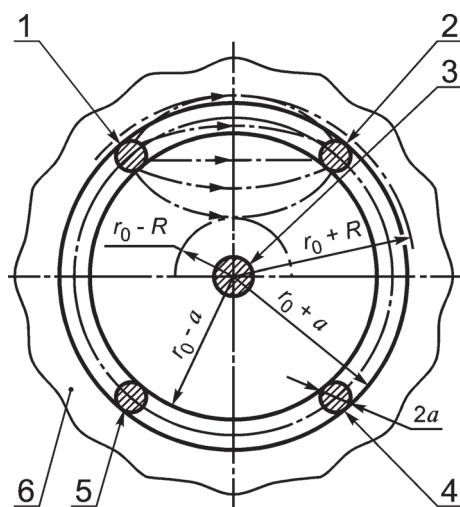


Рис. 1. Схема эксперимента:

1, 2, 4, 5 — электроды; 3 — капля растворителя; 6 — исследуемый материал

Проектирование измерительного устройства будем осуществлять в соответствии с классической теорией погрешностей теплофизических измерений [1, 2]. Источники погрешностей измерения КД растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов можно разделить на две группы, обусловленные неточностями определения физических величин, входящих в расчетные формулы и непосредственно измеряемых в процессе экспериментальных исследований, а также неполным соответствием используемой математической модели массопереноса физическим процессам, реализованным в измерительном устройстве.

Непосредственно измеряемыми величинами в данном методе являются: расстояние r_0 от точки нанесения импульса до координаты, где измеряется изменение во времени локальной концентрации растворителя $U(r_0, \tau)$; максимальное значение локальной концентрации растворителя; интервал времени $\tau_{\max}$ достижения максимума на кривой изменения локальной концентрации растворителя $U(r_0, \tau)$.

К погрешностям измерений, вызванным неполным соответствием используемой математической модели массопереноса физическим процессам, реализованным в измерительном устройстве, можно отнести конечную длительность τ_i импульса массы вещества по сравнению с δ -функцией Дирака; конечность радиуса «пятна» r_n , в пределах которого на поверхность исследуемого материала наносится капля растворителя из дозатора; конечную толщину тонколистового исследуемого материала h ; другие неучтенные факторы.

В соответствии с традиционным подходом теории погрешностей измерений [1, 2] к зависимости (1), лежащей в основе предлагаемого метода неразрушающего контроля, получено выражение для определения среднеквадратической оценки относительной погрешности определения искомого значения КД:

$$\delta D = \left\{ 4(\delta r_0)^2 + (\delta \tau_i)^2 + (\delta \tau_{\max})^2 + \left[\frac{1}{\varphi_D(\omega)} + \frac{d\varphi_D(\omega)}{d\omega} \omega \right]^2 \times \right. \\ \left. \times \left[(\delta \tau_i)^2 + (\delta \tau_{\max})^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где $\delta r_0 = \Delta r_0 / r_0$, $\delta \tau_i$, $\delta \tau_{\max} = \Delta \tau_{\max} / \tau_{\max}$ — относительные погрешности измерения координаты расчетного сечения, длительности импульса массы растворителя и времени достижения максимума кривой изменения локальной концентрации растворителя в расчетном сечении; δ_m — суммарное значение методической погрешности, обусловленной неполным соответствием используемой математической модели реальным физическим процессам, происходящим в измерительном устройстве в ходе эксперимента; $\varphi_D(\omega)$ — поправочная функция, учитывающая конечность длительности импульса массы τ_i по сравнению с δ -функцией Дирака [3]; $\omega = \tau_i / \tau_{\max}$.

Проведенный анализ выражения (2) показал, что наибольший вклад в результирующую погрешность δD вносят $\delta \tau_{\max}$ и δr_0 .

Остановимся подробнее на анализе погрешности определения координаты установки датчика концентрации растворителей δr_0 . На рис. 1 представлена схема, позволяющая оценить работоспособность различных типов датчиков контроля локальных концентраций распределяемых в твер-

дой фазе растворителей в проектируемом устройстве для определения КД. Здесь в увеличенном масштабе изображен участок 6 изделия из листового капиллярно-пористого материала, расположенный на плоской подложке из не смачиваемого растворителем материала. Для проведения активной части эксперимента и обеспечения неразрушающего контроля предлагается на плоский участок контролируемого изделия накладывать зонд, имеющий источник массы растворителя 3. Проанализируем возможные варианты комплектования зонда электродами 1, 2 известных преобразователей локального влагосодержания (например, кондуктометрических, диэлькометрических, индуктивных и пр.) или электродами 4, 5 предлагаемого нами к использованию гальванического преобразователя. Все электроды выполнены в виде торцевых окончаний цилиндрических или игольчатых электродов, прижимаемых к исследуемому изделию.

Учитывая радиальное распространение растворителя в исследуемом теле, необходимо контролировать изменение концентрации $U(r_0, \tau)$ растворителя в исследуемом теле на заданном расстоянии r_0 от точечного источника массы 3, т. е. на окружности радиуса r_0 . Заметим, что r_0 входит в выражение (1) во второй степени, поэтому погрешность измерения координаты расчетного сечения (погрешность установки преобразователя) δr_0 существенно влияет на результирующую погрешность определения искомого коэффициента диффузии [1]. С нашей точки зрения, эта погрешность зависит не только от инструментальной погрешности средства измерений координаты расположения преобразователя относительно точки импульсного воздействия, но в значительно большей степени от толщины информационного слоя материала, в котором содержание растворителя определяет выходную характеристику преобразователя.

Степень локальности известных преобразователей влажности (кондуктометрических, диэлькометрических, индуктивных) либо не указана, либо не удовлетворяет условиям исследования массопроводных свойств нестационарными методами [4]. Вследствие этого определение максимума $U(r_0, \tau)$ связано со значительными погрешностями. Кроме того, известные типы преобразователей влажности нуждаются в индивидуальной градуировке по каждому материалу, что существенно снижает оперативность контроля.

В реальных условиях электроды преобразователя концентрации имеют конечные размеры, например, диаметр $2a$ (см. рис. 1). Исходя из изложенного при реализации разработанного экспресс-метода неразрушающего контроля электроды, в целях уменьшения погрешности, необходимо располагать таким образом, чтобы их контакт с плоскостью анализируемого капиллярно-пористого материала происходил в пределах кольца, заключенного между окружностями $r_0 - a$ и $r_0 + a$. При использовании известных измерительных преобразователей даже при таком расположении электродов выходная характеристика определяется влажностью не только данного кольца исследуемого изделия, но и близлежащих к нему слоев материала. Например, если использовать в качестве электродов 1, 2 наиболее распространенные емкостные или индуктивные преобразователи, то силовые линии захватывают участки исследуемого материала, близлежащие к контактирующему с измерительными электродами кольцу. Это означает, что выходная характеристика зависит от распределения влаги в пределах значительно большего по размерам кольца, заключенного между окружностями $r_0 - R$ и $r_0 + R$. При этом условная ширина информа-

тивного слоя $2R$ на поверхности изделия, влажность которого существенно влияет на выходную характеристику применяемого преобразователя, может достигать нескольких миллиметров и намного превышает ширину слоя $2a$ материала, непосредственно контактирующего с поверхностями электродов. Аналогичная картина наблюдается при использовании кондуктометрических преобразователей [4]. В этом случае распространение носителей заряда от одного электрода к другому при измерении активного сопротивления среды происходит также не только в слое между окружностями $r_0 - a$ и $r_0 + a$, но и близлежащих к электродам слоях исследуемой среды. В частности, протекание электрического тока по пути наименьшего сопротивления приводит к тому, что его траектория распространения имеет искривления в сторону слоев с большей влажностью. Заметим, что в ходе эксперимента концентрация растворителя в пределах кольца меняется во времени и не является монотонной ни во времени, ни по координате r вследствие особенностей импульсного метода. Все это существенно усложняет определение времени достижения максимума на кривой $U(r_0, \tau)$.

Практика показывает, что расстояние от источника массы растворителя до расчетного сечения r_0 составляет несколько миллиметров [4, 5]. При использовании в качестве датчиков концентрации известных электрофизических преобразователей ширина информативного слоя $2R$ соизмерима с r_0 , т. е. погрешность установки преобразователя $\delta r_0 = \pm R/r_0$ [1], вносящая искажение в результат определения КД, может достигать нескольких десятков процентов. Кроме того, существенным недостатком известных преобразователей влажности является то, что их выходная характеристика существенно зависит от расстояния, размеров и взаимного расположения измерительных электродов. Это приводит к снижению точности из-за погрешности, возникающей при монтаже электродов в устройствах для исследования массопереносных свойств, а также усложняет эксплуатацию и градуировку преобразователей [4, 5].

В данном случае предлагается в качестве электродов 4, 5 (см. рис. 1) использовать электроды гальванического преобразователя (ГП), ЭДС которого определяется энергией связи растворителя с материалом, контактирующим с их поверхностями. Эта энергия однозначно связана с содержанием растворителя в материале именно в пределах кольца, заключенного между окружностями $r_0 - a$ и $r_0 + a$. Такой ГП имеет принципиальные преимущества перед рассмотренными выше преобразователями. Во-первых, он предназначен для измерения концентрации не только воды, но и других полярных растворителей; во-вторых, ширина информативного слоя при его использовании снижается до диаметра его электродов $2a$, что существенно уменьшает погрешность установки преобразователей до $\delta r_0 = \pm a/r_0$ [1]; в-третьих, выходная характеристика ГП не зависит от формы, размеров, расстояния и взаимного расположения электродов, так как скачок потенциала на них определяется только разностью электрохимических потенциалов носителей зарядов в области контакта с контролируемой средой. Это значительно упрощает использование данных преобразователей в устройстве для определения коэффициента диффузии разработанным методом. Исследования показали, что статическая характеристика ГП монотонна [4, 5]. Поэтому в момент достижения концентрацией $U(r_0, \tau)$ максимального значения его также достигает ЭДС ГП $E(r_0, \tau)$, что исключает необходимость предварительной градуировки ГП по каж-

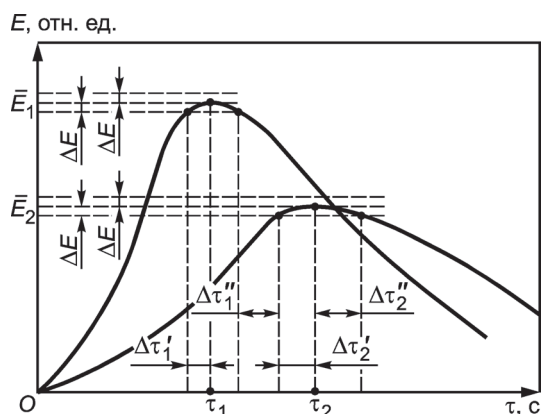


Рис. 2. Иллюстрация абсолютных значений погрешности определения расчетных моментов времени

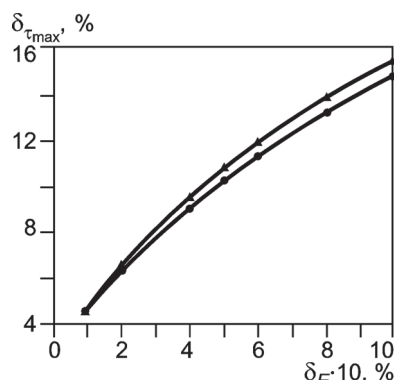


Рис. 3. Зависимость $\delta\tau_{\max}$ (δE) соответственно на восходящей (●) и нисходящей (▲) ветвях кривой изменения ЭДС

дой системе капиллярно-пористый материал — растворитель. В результате производительность измерительной аппаратуры повышается.

На рис. 2 представлены абсолютные значения погрешностей определения моментов времени достижения максимальных значений $\bar{E}_1$ и $\bar{E}_2$ в сечениях $r=r_1$ и $r=r_2$ на восходящих $\Delta\tau'_1$, $\Delta\tau'_2$ и на нисходящих $\Delta\tau''_1$, $\Delta\tau''_2$ ветвях кривых изменения во времени нормированных значений ЭДС ГП.

Заметим, что при заданной абсолютной погрешности ΔE измерения ЭДС ГП чем дальше от источника массы растворителя находится преобразователь, тем меньше максимум ЭДС и тем выше относительная погрешность ее определения. При этом растет длительность эксперимента и абсолютная погрешность определения момента времени, соответствующего максимуму на кривой изменения ЭДС ГП. Поэтому датчик концентрации следует располагать возможно ближе к источнику массы. Особенно это характерно для нижнего предела измерения искомого КД.

Однако приближение датчика к источнику массы увеличивает погрешность измерения координаты расчетного сечения δr_0 . Например, при использовании электродов ГП диаметром до $5 \cdot 10^{-5}$ м и уменьшении расстояния r_0 с 5,0 до 1,5 мм относительная погрешность δr_0 возрастает с 1,0 до 3,3 % [1, 4].

На рис. 3 показаны полученные в результате численных экспериментов зависимости относительной погрешности определения $\tau_{\max}$ от относительной погрешности δE измерения ЭДС на восходящей и нисходящей ветвях кривой изменения выходной характеристики ГП в расчетном сечении. При численном моделировании минимально допустимые максимумы на кривых изменения ЭДС ГП задавали из расчета достижения $\delta < 0,5$ %. Так, на нижнем пределе изменения искомого КД целесообразно иметь возможность контроля максимума на кривой изменения ЭДС на расстоянии 1,5 мм от источника, при этом $\delta\tau_{\max} \leq 10,8$ %.

Исследования показали, что на верхнем пределе изменения искомого КД, если ГП близко расположить к источнику массы, невозможно определить максимум на кривой изменения ЭДС. В этом случае ГП теряет свои информативные свойства, поскольку максимум на кривой изменения

концентрации находится в области свободного (несвязанного с дисперсной средой) состояния растворителя [4, 5]. Из проведенного анализа следует, что при увеличении контролируемого коэффициента диффузии от $0,5 \cdot 10^{-9}$ до $15 \cdot 10^{-9}$ м²/с расстояние до расчетного сечения необходимо увеличивать с 1,5 до 5,0 мм.

Анализ погрешностей измерений, вызванных неполным соответствием используемой математической модели массопереноса физическим процессам, реализованным в измерительном устройстве, показал, что погрешностью измерения длительности импульса массы $\delta\tau_i$ можно пренебречь ввиду ее малости по сравнению с перечисленными выше компонентами суммарной погрешности, если $\tau_i \leq (0,05—0,1) \tau_{\max}$ [3].

Аналогично, чтобы пренебречь погрешностью из-за конечных размеров радиуса «пятна» r_n , в пределах которого обеспечивается подача капли растворителя на поверхность исследуемого материала из дозатора, в измерительном устройстве должно соблюдаться условие [3]: $r_n < 0,1 r_0$, где r_0 — расстояние от источника массы до ГП.

Чтобы исключить из рассмотрения погрешности, вызванные конечной толщиной листового материала h , в измерительном устройстве должно обеспечиваться условие [3]: $h < 0,1 r_0$, из которого были найдены ограничения на максимальную толщину контролируемого листового материала. На нижнем пределе измерения КД получаем $h \leq 1,5 \cdot 10^{-4}$ м, на верхнем пределе $5 \cdot 10^{-4}$ м. Аналогично были получены ограничения на минимальные размеры диаметра d плоского участка контролируемых изделий из листовых капиллярно-пористых материалов и измерительного зонда [3]: $d > 20 r_0$, т. е. на нижнем пределе измерения коэффициента диффузии $d \geq 3 \cdot 10^{-2}$ м, на верхнем пределе 0,1 м. Все изложенное выше позволило для суммарной методической погрешности принять оценку $\delta_m \leq 5$ %.

В результате из (2) получены данные об изменении суммарной относительной погрешности определения коэффициента диффузии растворителей для выбранного диапазона его возможных значений. Так, на нижнем пределе изменения искомого коэффициента расчетное значение относительной погрешности $\delta D = 13,4$ %, на верхнем 11,8 %.

Чтобы обеспечить работоспособность устройства в довольно широком диапазоне изменения искомого КД было решено использовать несколько датчиков концентрации растворителей, расположенных на различных расстояниях от точки нанесения импульсного воздействия на исследуемые изделия из листовых капиллярно-пористых материалов.

На основании изложенного было спроектировано измерительное устройство (рис. 4) в виде зонда, состоящего из трех пластин 3, 5, 6, скрепленных между собой. В процессе эксперимента исследуемый материал 2 с заданным начальным распределением растворителя располагается на подложке 1, выполненной из фторопласта. Зонд имеет сквозное отверстие 8, в котором размещается трубопровод в виде иглы шприца для подачи импульса массы растворителя. Нижняя пластина зонда 3 выполнена из листового полиметилметакрилата толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ и диаметром 0,1 м. Она

имеет десять сквозных отверстий 11—20, размещенных на окружностях радиусами 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 и 5,0 мм относительно центра отверстия 8 и предназначенных для размещения в них электродов ГП. В качестве последних служили медные и цинковые электроды диаметром $5 \cdot 10^{-5}$ м. С обратной стороны пластины 3 электроды гальванических преобразователей по специально выполненным в пластине пазам выводились к разъемам 4, 10. На пластине 3 клеевым соединением фиксировалась пластина 5 из листового полиметилметакрилата толщиной 0,01 м и диаметром 0,1 м. К пластине 5 резьбовым соединением 7, 9 крепилась стальная пластина 6 толщиной 0,01 м для обеспечения необходимого усилия прижатия зонда к исследуемому материалу.

Для повышения оперативности и эффективности исследований КД растворителей в анализируемых листовых капиллярно-пористых материалах была разработана и изготовлена автоматизированная система неразрушающего контроля (АСНК), которая обеспечивает автоматизированное проведение эксперимента, измерение и регистрацию в режиме реального времени необходимой экспериментальной информации и расчет искомой характеристики по разработанным алгоритмам. После подачи импульса массы АСНК последовательно опрашивает ГП, расположенные на различных расстояниях от центра импульса, и фиксирует генерируемую ими ЭДС. Если ЭДС каких-либо датчиков достигает критического значения, соответствующего переходу растворителя в область свободного состояния [4, 5], то система игнорирует их показания и выбирает датчик из оставшихся ближайший к источнику массы, ЭДС которого находится в пределах диапазона работоспособности ГП. Это обеспечивает максимальную производительность АСНК для конкретного значения КД из выбранного диапазона работоспособности устройства. Фиксируется момент времени $\tau_{\max}$, соответствующий максимуму на кривой изменения ЭДС данного датчика, и рассчитывается искомое значение КД. Программа управления экспериментом, обработки экспериментальных данных и их визуализации разработана в среде LabView 9.0.

Исследования различных видов ткани и бумаги показали, что погрешность определения КД растворителей $\delta D \leq 8-10\%$ при доверительной вероятности 0,95. Длительность эксперимента не превышает 20 мин. Ниже в качестве примера представлен фрагмент таблицы результатов определения коэффициента диффузии ацетона в фильтровальной бумаге ($r_0 = 3,0$ мм). По каждой системе капиллярно-пористый материал — растворитель проведено не менее 20 опытов.

Коэффициент диффузии ацетона в фильтровальной бумаге

№ опыта	$\tau_{\max}, \text{с}$	$D_i \cdot 10^9, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta D = (D_i - \bar{D}) \cdot 10^9, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta D_i^2 \cdot 10^{18}, \text{м}^4/\text{с}^2$
8	453,6	4,96	0,56	0,3102
9	431,0	5,22	0,82	0,6675
10	579,9	3,88	-0,52	0,2735
11	433,5	5,19	0,79	0,6194
12	451,8	4,98	0,58	0,3329

Примечание: математическое ожидание $\bar{D} = 4,40 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $\delta D = 7,9\%$.

Таким образом, можно сделать вывод, что случайная погрешность определения коэффициента диффузии растворителей в изделиях из тонких капиллярно-пористых материалов не превышает значений оценок, полученных теорети-

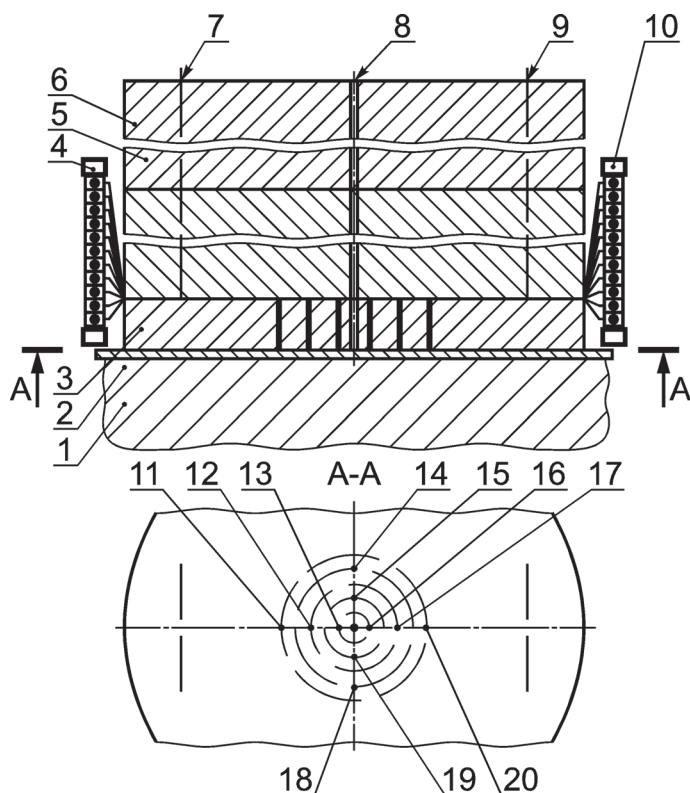


Рис. 4. Конструкция измерительного устройства:

1 — подложка; 2 — исследуемый материал; 3, 5, 6 — пластины зонда; 4, 10 — разъемы; 7, 9 — резьбовые соединения; 8 — сквозное отверстие зонда; 11—20 — отверстия для размещения электродов гальванических преобразователей

чески на основе математических моделей. Проведенные исследования коэффициента диффузии растворителей исследуемых материалов другими методами показало удовлетворительное совпадение результатов. Это свидетельствует о работоспособности предлагаемого метода и созданного измерительного устройства применительно к диапазону изменения искомого КД в пределах $(0,5-15) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Разработанная автоматизированная система неразрушающего контроля позволяет измерять КД растворителей в рассмотренном классе материалов без дополнительной градуировки измерительных преобразователей концентрации растворителей, что существенно повышает оперативность исследований.

Литература

1. Сергеев О. А. Метрологические основы теплофизических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1972.
2. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
3. Шашков А. Г. и др. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973.
4. Мищенко С. В., Беляев П. С., Фролов А. П. Определение локальных значений содержания жидкой фазы в дисперсных материалах // Метрология. 1988. № 8. С. 55—61.
5. Mishchenko S. V. et al. Effective diffusion coefficient of active solvents in composite polymeric materials // Dry. Technol. 1999. V. 17. N 10. P. 2151—2167.

Дата принятия 08.07.2013 г.