

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ПОЛЯРНЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ В ТОНКИХ ИЗДЕЛИЯХ*

М.П. Беляев, В.П. Беляев

*Кафедра «Переработка полимеров и упаковочное производство»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»*

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гатаповой

Ключевые слова и фразы: коэффициент диффузии; полярный растворитель; потенциометрический датчик содержания растворителя в твердой фазе.

Аннотация: Предложен метод неразрушающего экспресс-контроля коэффициента диффузии полярных растворителей в тонких изделиях из пористых материалов и измерительное оборудование для его реализации. Измерительное оборудование включает в себя портативный зонд с импульсным источником массы и датчики содержания растворителя в твердой фазе, в качестве которых использованы потенциометрические преобразователи с монотонной зависимостью выходной характеристики от контролируемого параметра.

Обозначения

D – коэффициент диффузии, м ² /с;	$U(r_1, \tau), U(r_2, \tau), \dots, U(r_n, \tau)$ – концентрация растворителя в твердой фазе в точках расположения гальванических преобразователей, кг/кг;
$E(r_1, \tau), E(r_2, \tau), \dots, E(r_n, \tau)$ – ЭДС потенциометрических преобразователей, В;	x, y, r – пространственные координаты, м;
E_{\max} – критическое значение ЭДС, В;	τ – время, с;
r_1, r_2, \dots, r_n – расстояние от потенциометрического преобразователя до источника массы, м;	τ_m – время достижения максимума на кривой $E(r, \tau)$, с.
Q – количество жидкой фазы, наносимое в течение импульса, кг;	

Информация о коэффициенте диффузии растворителей в ряде случаев позволяет судить о качестве изделий, в частности, о способности тонких изделий, например, бумаги или тканей впитывать различные составы, что очень важно при проведении различных технологических процессов. Однако, известные методы измерения коэффициента диффузии трудоемки и предполагают выполнение дополнительных операций:

- изготовление образцов из исследуемых материалов (то есть разрушение контролируемых изделий);
- обязательную градуировку измерительных средств для контроля содержания растворителя в твердой фазе для каждого исследуемого материала.

Поэтому применение известных методов для экспресс-контроля качества тонких изделий косвенным методом через исследование массопроводных свойств малоэффективно.

* Избранные доклады Международной теплофизической школы МТФШ–6, Тамбов, ТГТУ, 2007 г.

Нами предлагается экспресс-метод неразрушающего контроля коэффициента диффузии полярных растворителей в изделиях из пористых материалов. Данный метод позволяет, не нарушая целостность изделия, на основании полученной информации об изменении во времени электродвижущей силы (ЭДС) потенциометрических датчиков, без предварительного нахождения реальных изменений содержания растворителя в твердой фазе, определить искомую характеристику.

Такой подход обеспечивает существенное снижение затрат времени на исследование свойств материалов и изделий из них.

Физическая модель метода представлена на рис. 1.

На поверхности изделия фиксируется выносной зонд с импульсным источником массы Q и электродами потенциометрических датчиков, расположенными на различных расстояниях r : r_1, r_2, \dots, r_n (см. рис. 1) от точки импульсного воздействия.

После подачи импульса массы (мгновенного «увлажнения») точки поверхности образца фиксируют изменение ЭДС потенциометрических преобразователей во времени.

Процесс распространения массы в плоском листовом материале после нанесения такого импульса при условии расположения измерительных электродов на расстоянии $r_0 > 10h$, где h – толщина исследуемого листового материала описывается краевой задачей:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + q \delta(x, y, \tau);$$

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

где U – концентрация распределенного в твердой фазе вещества; Q – количество жидкой фазы, наносимое в течение импульса; x, y – пространственные координаты; D – коэффициент диффузии; $r \in [0, \infty]$ – время; $\delta(x, y, \tau)$ – дельта-функция Дирака.

При начальных и граничных условиях:

$$U(x, y, 0) = 0;$$

$$\frac{\partial U(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial U(0, y, \tau)}{\partial x} = 0;$$

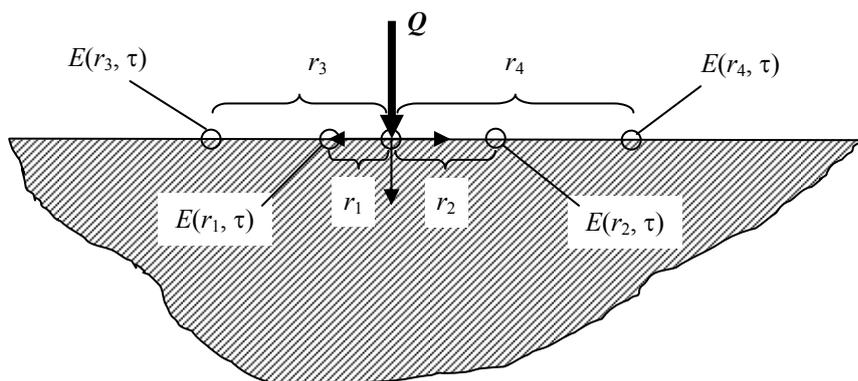


Рис. 1. Физическая модель экспресс-метода неразрушающего контроля коэффициента диффузии полярных растворителей

$$U \rightarrow 0 \text{ при } |x|; \quad |y| \rightarrow \infty,$$

аналогичной распространению влаги в неограниченной среде при нанесении импульсного воздействия от линейного источника влаги.

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

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

Коэффициент диффузии может быть найден по известной формуле [1]

$$D = r_0^2 / (4\pi\tau_m), \quad (1)$$

где τ_m – время, соответствующее максимуму на кривой изменения концентрации на расстоянии r_0 от источника $U(r_0, \tau)$; r – радиальная координата, отсчитываемая от оси источника.

Для фиксирования τ_m необходимо непрерывно контролировать изменение $U(r_0, \tau)$, причем измерения должны проводиться строго на расстоянии r_0 от источника массы, что крайне затруднительно при использовании известных преобразователей влажности (кондуктометрических, диэлькометрических, радиоизотопных и т.д.). 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. Сложность контроля локальной концентрации увеличивается при переходе от воды к другим полярным растворителям.

В предлагаемом техническом решении для фиксирования максимума концентрации на расстоянии r_0 от источника применялись миниатюрные электроды потенциометрических преобразователей (ПП), которые располагались по окружности радиуса r_0 . ЭДС такого преобразователя определяется энергией связи растворителя с материалом, контактирующим с поверхностями его электродов, которая в конечном итоге однозначно связана с содержанием растворителя в материале именно на концентрической окружности радиуса r_0 с центром в точке «увлажнения» материала [2].

Так как статическая характеристика ПП монотонна, то в момент достижения концентрацией $U(r_0, \tau)$ своего максимального значения ЭДС ПП также достигает своего максимума. На рис. 2 приведены примеры изменения ЭДС ПП в различных сечениях при исследовании влагопроводности фильтровальной бумаги при различных значениях $r_0 = r_1, r_2, \dots, r_5$.

Предлагаемый метод сравнительно просто организуется экспериментально. При этом используются следующие измерительные операции.

1. Исследуемый листовый материал с равномерным начальным распределением растворителя (наиболее просто использовать нулевое распределение, т.е. «сухой» материал) помещается на плоскую подложку из несмачиваемого растворителем материала, например, фторопласта.

2. К поверхности образца прижимается зонд с импульсным точечным источником массы и расположенными на концентрических окружностях от источника электродами ПП.

3. Осуществляется импульсное точечное «увлажнение» поверхности исследуемого материала растворителем из дозатора.

4. После задания импульса массы измерительное устройство последовательно опрашивает потенциометрические датчики, расположенные на различных расстояниях от центра импульса, фиксируя генерируемую ими ЭДС: $E(r_1, \tau)$, $E(r_2, \tau)$, ..., $E(r_n, \tau)$. Измерительное устройство автоматически игнорирует показа-

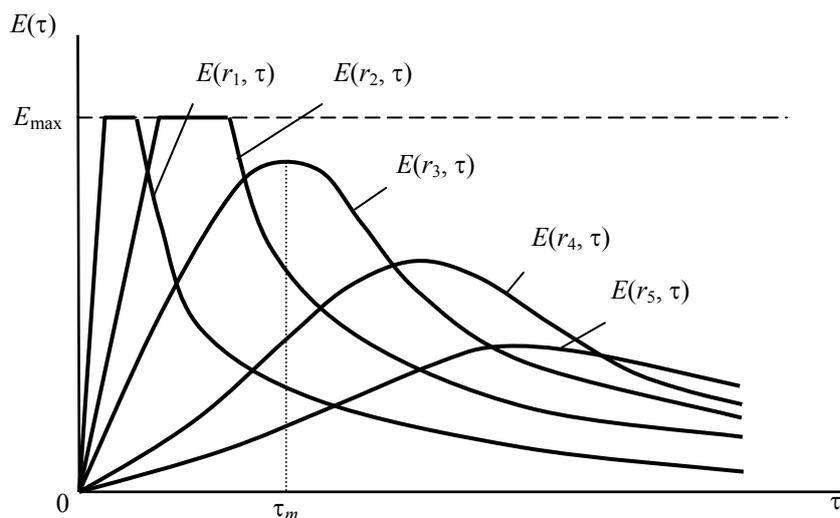


Рис. 2. Изменение во времени ЭДС потенциметрических преобразователей при различных значениях $r_0 = r_1, r_2, \dots, r_5$

ния датчиков, ЭДС которых достигает критического значения (E_{\max}). Это значение соответствует переходу растворителя в область свободного, несвязанного состояния, при этом дальнейшее увеличение содержания растворителя в контролируемой точке не вызывает увеличения ЭДС (см. рис. 2, кривые $E(r_1, \tau)$, $E(r_2, \tau)$).

5. Определяется время τ_m достижения максимума на кривой изменения ЭДС ближайшего к импульсному источнику из оставшихся потенциметрических преобразователей (кривая $E(r_3, \tau)$).

6. Рассчитывается значение коэффициента диффузии растворителя по формуле (1).

Таким образом, для определения коэффициента диффузии не требуется измерение реальных изменений содержания растворителя $U(r_1, \tau)$, $U(r_2, \tau)$, ..., $U(r_n, \tau)$, что связано с проведением длительных и трудоемких работ по градуировке потенциметрических датчиков для каждого исследуемого материала.

В табл. 1 и 2 в качестве примера представлены результаты определения коэффициента диффузии влаги в образцах из фильтровальной бумаги и хлопковой ткани.

Таким образом, предложенный экспресс-метод неразрушающего контроля коэффициента диффузии полярных растворителей и измерительное оборудование для его реализации упрощает исследование диффузии растворителей в изделиях из пористых материалов. Использование описанной системы контроля позволяет осуществить измерение коэффициентов диффузии растворителей в различных материалах без дополнительной градуировки измерительных приборов, что существенно повышает оперативность исследований.

Созданная система для определения коэффициента диффузии полярных растворителей в изделиях из пористых материалов позволяет не только повысить точность измерений требуемых параметров, но и уменьшить продолжительность эксперимента. В частности, при измерении коэффициента диффузии влаги в целлюлозных фильтрах погрешность результатов измерений не превышает 8 % при доверительной вероятности 0,95, длительность эксперимента – не более 11 минут (см. табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Результаты экспериментальных исследований коэффициента
диффузии влаги в фильтровальной бумаге ($r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м)**

№ опыта	Время достижения максимума кривой $E(r, \tau)$, с	Коэффициент диффузии $D_i \cdot 10^8$, м ² /с	Математическое ожидание $\bar{D} \cdot 10^8$, м ² /с	Абсолютная погрешность измерения $\Delta D = (D_i - \bar{D}) \cdot 10^8$, м ² /с	$\Delta D_i^2 \cdot 10^{16}$, (м ² /с) ²	Относительная погрешность измерения, %
1	105,9	1,88	1,586	+0,294	0,0864	7,3
2	125,2	1,59		+0,004	0,00002	
3	136,3	1,46		-0,126	0,0159	
4	102,6	1,94		+0,354	0,1253	
5	112,5	1,77		+0,184	0,0339	
6	148,5	1,34		-0,246	0,0605	
7	164,5	1,21		-0,376	0,1414	
8	154,2	1,29		-0,296	0,0876	
9	141,2	1,41		-0,176	0,0310	
10	115,1	1,73		+0,144	0,0207	
11	107,6	1,85		+0,264	0,0697	
12	158,0	1,26		-0,326	0,1063	
13	143,2	1,39		-0,196	0,0384	
14	151,9	1,31		-0,276	0,0762	
15	108,2	1,84		+0,254	0,0645	
16	112,5	1,77		+0,184	0,0339	
17	111,2	1,79		+0,204	0,0416	
18	122,1	1,63		+0,044	0,0019	
19	106,4	1,87		+0,284	0,0807	
20	143,2	1,39		-0,196	0,0384	

Таблица 2

**Результаты экспериментальных исследований коэффициента
диффузии влаги в хлопковой ткани ($r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м)**

№ опыта	Время достижения максимума кривой $E(r, \tau)$, с	Коэффициент диффузии $D_i \cdot 10^9$, м ² /с	Математическое ожидание $\bar{D} \cdot 10^9$, м ² /с	Абсолютная погрешность измерения $\Delta D = (D_i - \bar{D}) \cdot 10^9$, м ² /с	$\Delta D_i^2 \cdot 10^{18}$, (м ² /с) ²	Относительная погрешность измерения, %
1	2	3	4	5	6	7
1	413,0	4,82	4,403	+0,417	0,1739	7,96 ≈ 8
2	546,8	3,64		-0,763	0,5822	
3	620,1	3,21		-1,193	1,4232	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
4	405,4	4,91		+0,507	0,2570	
5	560,7	3,55		-0,853	0,7276	
6	506,5	3,93		-0,473	0,2095	
7	590,6	3,37		-1,033	1,0670	
8	401,3	4,96		+0,557	0,3102	
9	381,3	5,22		+0,817	0,6675	
10	513,0	3,88		-0,523	0,2735	
11	383,5	5,19		+0,787	0,6194	
12	399,7	4,98	4,403	+0,577	0,3329	7,96 ≈ 8
13	381,3	5,22		+0,817	0,6675	
14	393,4	5,06		+0,657	0,4316	
15	483,1	4,12		-0,283	0,0800	
16	594,2	3,35		-1,053	1,1088	
17	407,0	4,89		+0,487	0,2372	
18	402,1	4,95		+0,547	0,2992	
19	386,5	5,15		+0,747	0,5580	
20	543,8	3,66		-0,743	0,5520	

Список литературы

1. А. с. 174005 СССР, МКИ G 01 К. Способ определения коэффициентов массопроводности и потенциалопроводности массопереноса материалов / Л.Б. Цимерманис, Г.И. Кузнецов, Н.П. Злобина, Е.И. Федоров. – Оpubл. 09.10.65, Бюл. № 16. – 1 с.

2. Мищенко, С.В. Определение локальных значений содержания жидкой фазы в дисперсных материалах / С.В. Мищенко, П.С. Беляев, А.П. Фролов // Метрология. – 1988. – № 8. – С. 55–61.

Non-destructive Express Control over Coefficient of Diffusion of Polar Solvents in Thin Items

M.P. Belyaev, V.P. Belyaev

Department "Processing of Polymers and Packaging Production", TSTU

Key words and phrases: diffusion coefficient; polar solvent; potentiometer sensor of solvent content in solid phase.

Abstract: The technique of non-destructive express control over the coefficient of polar solvents diffusion in thin items made from porous materials as well as measuring equipment for its realization are proposed. Measuring device includes portable probe with impulse source of mass and sensors of solvent content in solid phase; these

sensors are potentiometric transducers with monotonous dependence of output characteristic on controlled parameter.

Nicht zerstörende Express-Kontrolle des Koeffizienten der Diffusion der polaren Lösungsmittel in den feinen Erzeugnissen

Zusammenfassung: Es ist die Methode der nicht zerstörenden Express-Kontrolle des Koeffizienten der Diffusion der polaren Lösungsmittel in den feinen Erzeugnissen aus den porösen Stoffen und die Messausrüstung für ihre Realisierung angeboten. Die Messausrüstung besteht aus der portativen Sonde mit der Impulsquelle der Masse und den Sensoren des Enthaltens des Lösungsmittels in der festen Phase. Dabei sind die potentiometrischen Reformatoren mit der monotonen Abhängigkeit der Abgabekarakteristik vom überwachten Parameter verwendet.

Express-contrôle non-destructif du coefficient de la diffusion des dissolvants polaires dans les articles fins

Résumé: Est proposée la méthode de l'express-contrôle non-destructif du coefficient de la diffusion des dissolvants polaires dans les articles fins à partir des matériaux poreux et l'équipement de mesure pour sa réalisation. L'équipement de mesure comprend une sonde portative avec une source d'impulsion de la masse et les capteurs du contenu du dissolvant dans une phase solide en qualité desquels sont employés les convertisseurs potentiométriques avec une dépendance monotone de la caractéristique de sortie à partir du paramètre contrôlé.
