

10. Floarea, O. Calcule De operatii si utilaje din industria chimica editura tehnica [Text] / O. Floarea, O. Smigelschi. — Bucuaresti, 1976. — 382 p.

#### ДИНАМИКА ПРОНИКНОВЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ЧЕРЕЗ ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ

Разработана и обоснована методика исследования динамики проникновения технических жидкостей через элементы спецодежды. В результате изучения физико-механических свойств жидкостей определены параметры, влияющие на скорость растекания, проникновения и поглощения жидкости тканью. Определены зависимости динамики проникновения технических жидкостей сквозь технические материалы, позволяющие правильно определять области использования материалов для специальной одежды.

**Ключевые слова:** текстильные материалы, технические жидкости, специальная одежда, проникновение жидкости.

*Рябчиков Микола Львович, доктор технічних наук, професор, кафедра технологій і дизайну, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, Україна, e-mail: nikolryab@rambler.ru.*

*Рябчиков Николай Львович, доктор технических наук, профессор, кафедра технологий и дизайна, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков, Украина.*

*Riabchykov Nikolay, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine, e-mail: nikolryab@rambler.ru*

УДК 677.017.636

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.50894

Щуцька Г. В.

## ЕКСПРЕС МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ДИФУЗІЇ ФРАКТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Розв'язана задача з визначення коефіцієнтів дифузії фрактальних матеріалів на основі експрес експериментів з врахуванням математичної моделі проходження вологи. На основі наближеного розв'язання рівняння дифузії одержані залежності між константами дифузії і параметрами процесу на початковому етапі поглинання рідини. Доведено, що для визначення обох коефіцієнтів дифузії достатньо одного експериментального параметру.*

**Ключові слова:** дифузія, фрактальний матеріал, константи, експрес методика, проходження вологи.

### 1. Вступ

Сучасний стан виробництва продукції легкої промисловості визначається розширення асортименту і гаузей використання матеріалів для одягу і взуття, зокрема створенням багат шарових текстильних матеріалів. Проте відсутність надійних методик прогнозування властивостей матеріалів обумовлює інтуїтивний підхід до їх розробки і експлуатації. Поєднання властивостей суцільності і пористості подібних матеріалів передбачає їх використання для потреб людини. Відомі моделі тепломасопереносу намагаються розв'язувати задачі суцільного середовища, що ускладнює проблему і не враховує реальних властивостей. Створення теоретичних моделей обґрунтовується на використанні констант матеріалів, визначення яких можливо тільки емпіричним шляхом. Однак Надійних оперативних методів визначення констант масопереносу не існує.

Процес проникнення вологи крізь матеріали одягу або взуття визначає комфортність цих виробів, їх надійність і конкурентоспроможність. Фізика цього процесу пов'язана з дифузійними властивостями матеріалів. Ці властивості, на жаль, досліджені недостатньо. Це пов'язано з одного боку зі складністю розв'язання диференціальних рівнянь проходження вологи, з іншого — невизначеністю констант, що повинні забезпечувати цей процес. Справа в тому, що ці коефіцієнти не підлягають

безпосередньому вимірюванню, а можуть бути визначені побічно або розрахунковим шляхом.

Розробка експрес методів визначення констант дифузії спростить їх визначення і у значній мірі розв'яже проблему прогнозування поведінки матеріалів і виробів, дозволить створювати матеріали з заданими властивостями, що приведе до підвищення їх комфортності.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Коефіцієнт дифузії — кількісна характеристика швидкості дифузії, рівна кількості речовини (в масових одиницях), що проходить в одиницю часу через ділянку одиничної площі (наприклад,  $1 \text{ м}^2$ ) при градієнті концентрації, що дорівнює одиниці.

Коефіцієнт дифузії — обов'язковий параметр, що входить до рівнянь проходження рідини крізь матеріали [1]. Методика його визначення наводиться в небагатьох роботах.

Методика експериментального визначення коефіцієнтів дифузії складна. При розрахунках процесів масопередачі використовують наявні в літературі експериментальні дані, а за їх відсутності коефіцієнти дифузії визначають розрахунковим шляхом [2]. Досить глибоко розроблені методи визначення коефіцієнтів дифузії в газі. Нечисленні публікації [3] використовують досить

складні методики. В роботі [4] розроблено метод визначення коефіцієнта дифузії за однією експериментальною кінетичною кривою. Цей метод потребує досить складного експериментального оснащення, його обробка вимагає багато часу і ресурсів. Крім того, наявні засоби визначають один з коефіцієнтів дифузії, хоча за даними [5] повинні враховуватись також коефіцієнти гальмування процесу.

Визначення коефіцієнту дифузії тісно пов'язано з дослідженнями по проникненню рідини в пористі матеріали. В роботі [6] приведений ряд досліджень водопоглинання, але явних методів визначення констант не наведено. В роботі [7] описаний механізм транспортування вологи в пористих середовищах. З роботи витікає, що процес відноситься до дифузійних, що визначає необхідність визначення констант.

### 3. Об'єкт, мета і задачі дослідження

*Об'єкт дослідження* — процес проходження рідини крізь фрактальні матеріали.

*Мета роботи* — розробити методи визначення коефіцієнтів дифузії фрактальних матеріалів на основі експрес експериментів з врахуванням математичної моделі проходження вологи.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

1. Удосконалити наближені методи розв'язку рівнянь дифузії.
2. Запропонувати нові показники матеріалів.
3. На основі експериментальних даних і одержаних теоретичних результатів розробити методи визначення показників дифузії.

### 4. Наближені методи розв'язку рівнянь дифузії

Як вже було зазначено, реальні методи прогнозування поведінки матеріалів під час проходження рідини практично відсутні. Багато в чому це пов'язано зі складністю визначення коефіцієнтів дифузії, прямих методів визначення яких не існує.

Дуже проблематично використовувати при цьому рівняння дифузії. Справа в тому, що реальний коефіцієнт дифузії залежить від накопиченої концентрації вологи. У такому разі рівняння руху рідини крізь шар матеріалу має вигляд [4]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D(U, x) \frac{\partial U}{\partial x} \right\},$$

а коефіцієнт дифузії:

$$D(U) = D_0(1 + \sigma U),$$

де  $U$  — концентрація вологи в певній точці шару матеріалу;  $x$  — координата певної точки в певний момент часу;  $t$  — час;  $D$  — коефіцієнт дифузії.  $D_0$  — початковий коефіцієнт дифузії;  $\sigma$  — коефіцієнт нелінійності.

Рівняння не розв'язується прямими засобами. При розкладанні частинних похідних воно приймає вигляд:

$$D_0 \left[ (1 + \sigma u) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \sigma \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] = \frac{\partial u}{\partial t}.$$

Відзначимо, що тут і надалі будемо використовувати питому концентрацію, що визначається відношенням поточної концентрації до максимальної  $u = U/U_{\max}$ .

Рівняння має виражено нелінійний вигляд.

Деякі підходи до розв'язання подібних рівнянь наведені в [8, 9], однак вони враховують значення коефіцієнтів дифузії, як відомих параметрів.

Будемо враховувати малі товщини матеріалів, що досліджуються. Введемо гіпотезу про рівномірність закону розповсюдження рідини в матеріалі. Питому концентрацію на зовнішній поверхні матеріалу означимо  $u_0$ , концентрацію на внутрішній поверхні —  $u_1$ .

Похідні по координаті переписуються у приращеннях [10].

Після підстановки у вихідне диференціальне рівняння, маємо:

$$D_0 \left[ \frac{2(u_1 - u_0)}{\Delta x^2} + \sigma \frac{(u_1 + u_0)(u_1 + u_0)}{\Delta x^2} + \sigma \frac{u_0^2 - 2u_0u_1 + u_1^2}{\Delta x^2} \right] = \frac{du_1}{dt}.$$

Враховуючи малість товщини матеріалу  $h$ , вважаємо  $h = \Delta x$ .

Виділимо члени рівняння з невідомою концентрацією  $u_1$ :

$$\frac{D_0}{h^2} \left[ \sigma(2u_1^2 + 2u_0^2) + 2u_1 - 2u_0 \right] = \frac{du_1}{dt}.$$

Наведемо праву частину до стандартної форми квадратного рівняння, врахуємо, що на зовнішній поверхні  $u_0 = 1$ :

$$u_1^2 + \mu \cdot u_1 - (\mu - 1) = \frac{\mu \cdot h^2}{2D_0} \frac{du_1}{dt},$$

де  $\mu = 1/\sigma$ . Означимо надалі  $a = \frac{\mu \cdot h^2}{2D_0}$ . Розв'язуємо рівняння методом розділення змінних. Інтегруємо обидві частини:

$$a \int \frac{du_1}{u_1^2 + \mu \cdot u_1 - (\mu - 1)} = \int dt.$$

Розв'язання рівняння дає:

$$u_1 = \frac{\lambda_2 \cdot (e^{\theta t} - 1)}{\lambda_2 e^{\theta t} - \lambda_1}.$$

Зробимо заміну змінної  $\tau = \theta \cdot t$ , означимо  $\eta = \lambda_1/\lambda_2$ . Для різних значень цього параметру залежність показана на рис. 1.

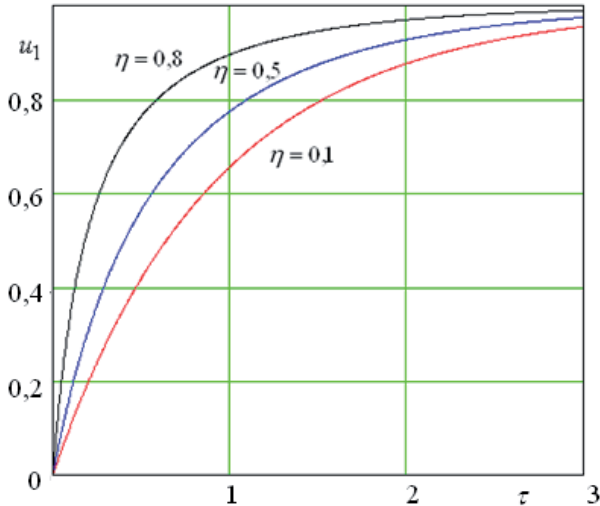


Рис. 1. Залежність концентрації на внутрішній поверхні від параметру часу

Одержані залежності демонструють динаміку зміни концентрації для різних співвідношень констант дифузії. Відзначимо, що ці константи входять до параметру  $\eta$ .

**5. Аналіз одержаних залежностей з метою одержання констант матеріалу**

Проведемо аналіз одержаних залежностей. Початкова ділянка графіків (приблизно до  $u_1 = 0,4$ ) близька до лінійної. Відповідно, похідна до залежності приблизно може бути визначена, як:

$$\frac{du_1}{d\tau} \approx \frac{0,4}{\tau_e}$$

де  $\tau_e$  – параметр часу, що відповідає закінченню лінійної ділянки (рис. 2).

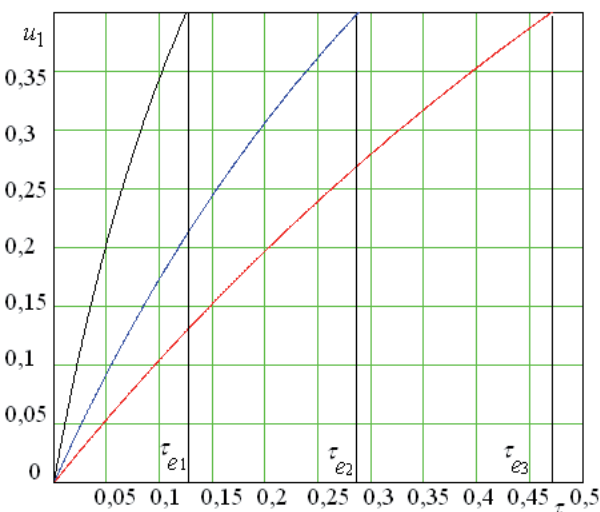


Рис. 2. Початкова ділянка залежностей

Таким чином, якщо експериментально вдасться визначити час  $t_e$ , що відповідає накопиченню концентрації до 0,4, можна записати два рівняння:

$$0,4 = \frac{e^{\theta \cdot t_e} - 1}{e^{\theta \cdot t_e} - \eta}$$

$$\frac{0,4}{t_e} = \frac{\theta \cdot e^{\theta \cdot t_e} (1 - \eta)}{(e^{\theta \cdot t_e} - \eta)^2}$$

З першого рівняння одержуємо:

$$\eta = 2,5 - 1,5e^{\theta \cdot t_e}$$

Підставляючи у друге рівняння, одержуємо залежність між параметром  $\theta$  і часом  $t_e$ :

$$\frac{1}{t_e} = \frac{\theta \cdot e^{\theta \cdot t_e} (2,5 - 1,5e^{\theta \cdot t_e})}{(e^{\theta \cdot t_e} - 1)^2}$$

Автор даної роботи одержав ірраціональне рівняння відносно двох параметрів. Розв'язок його можна проводити для окремих значень часу за допомогою оператора root(f(x),x) програмного середовища MathCAD. Нагадаємо, що параметр:

$$\eta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{\mu^2 + 4\mu - 4} - \mu}{\sqrt{\mu^2 + 4\mu - 4} + \mu} = 2,5 - 1,5e^{\theta \cdot t_e}$$

Перераховуючи значення параметру гальмування одержимо графік  $\theta \cdot t_e = f(\sigma)$  (рис. 3), з якого можна визначити коефіцієнт гальмування, виходячи зі значення добутку часу на параметр  $\theta$ .

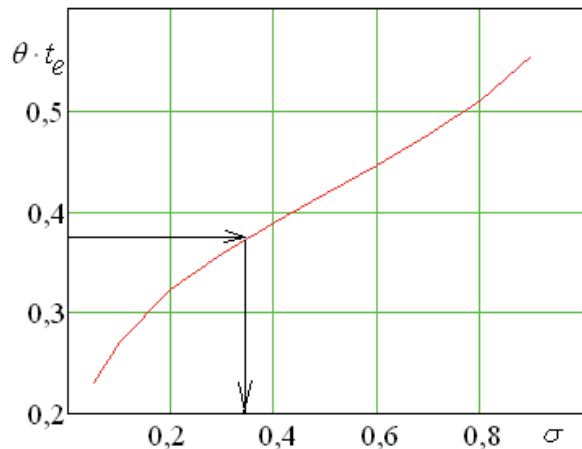


Рис. 3. Знаходження коефіцієнту гальмування

Знайшовши коефіцієнт гальмування, можна знайти коефіцієнт дифузії, враховуючи означення  $\theta$ :

$$\theta = \frac{2D_0}{h^2} \frac{\sqrt{\mu^2 + 4\mu - 4}}{\mu}$$

$$D_0 = \frac{\theta \cdot h^2}{2 \left( \sqrt{1 + \frac{4}{\sigma}} - 4\sigma \right)}$$

Таким чином коефіцієнти дифузії визначаються за результатами експрес експериментів за значеннями часу досягнення концентрації 0,4 від основної.

## 6. Обговорення результатів розробки експрес методів визначення параметрів дифузії фрактальних матеріалів

Експрес методика вимагає досить швидкий порядок визначення коефіцієнтів дифузії. Розроблений підхід дозволяє використовувати початковий етап експерименту по накопиченню вологи фрактальним матеріалом і може використовувати спрощений підхід до проведення експериментів. Основний результат експерименту при цьому — параметр часу  $\tau_e$ , що відповідає закінченню лінійної ділянки на діаграмі накопичення вологи (рис. 2). Експериментальне визначення цього параметру дозволяє розрахувати обидва параметри дифузії в явному вигляді. Відзначаємо, що в відомих методах наведені рекомендації для визначення тільки однієї константи. Причому для цього треба зробити комплекс досить складних досліджень.

## 7. Висновки

В статті розв'язана задача з визначення коефіцієнтів дифузії фрактальних матеріалів на основі експрес експериментів з врахуванням математичної моделі проходження вологи.

У результаті проведених досліджень:

1. На базі наближеного розв'язання рівняння дифузії одержані залежності підвищення концентрації вологи в матеріалі.
2. Показано, що різниця в коефіцієнтах дифузії для окремого матеріалу впливає на початковий етап насичення вологою матеріалу.
3. Запропоновано використовувати дані початкового етапу насичення для визначення констант дифузії.
4. Розроблений план експерименту для швидкого визначення даних констант.

Експеримент потребує значення одного параметру — часу досягнення концентрації на внутрішній поверхні 0,4 від основної. Це значення дозволяє знайти проміжний параметр  $\theta$ , після чого знаходиться коефіцієнт гальмування. Коефіцієнт дифузії знаходиться за допомогою виведеної формули. Таким чином доведено, що для визначення обох коефіцієнтів дифузії достатньо одного експериментального параметру.

## Література

1. Yoneda, M. Measurement of Water Absorption Perpendicular to Fabric Plane in Two- and Multi-layered Fabric Systems [Text] / M. Yoneda, Y. Mizuno, J. Yoneda // International Journal of Clothing Science and Technology. — 1994. — Vol. 6, № 2/3. — P. 57–64. doi:10.1108/09556229410063495
2. Floarea, O. Calcule De operatii si utilaje din industria chimica editura tehnica [Text] / O. Floarea, O. Smigelschi. — Bucaresti, 1976. — 382 p.

3. Лобко, В. Н. Численный метод определения коэффициента диффузии газообразующей примеси в твердом теле по результатам интегрального варианта метода проникаемости [Текст] / В. Н. Лобко, И. Н. Бекман // Журнал технической физики. — 2010. — Вып. 9, Т. 80. — С. 75–79.
4. Лукин, В. Д. Циклические адсорбционные процессы [Текст] / В. Д. Лукин, А. В. Новосельский. — Л.: Химия, 1989. — 256 с.
5. Riabchykov, N. Linear mathematical model of water uptake perpendicular to fabric plane [Text] / N. Riabchykov, V. Vlasenko, S. Arabuli // Vlakna a textil. — 2011. — № 2(18). — P. 24–29.
6. Sousa Figueiro, R. M. E. Moisture Management Performance of Multifunctional Yarns Based on Wool Fibers [Text] / R. M. E. Sousa Figueiro, H. F. da Cunha Soutinho, C. Freitas // Advanced Materials Research. — 2010. — Vol. 123–125. — P. 1247–1250. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.123-125.1247
7. Hollies, N. R. S. Water Transport Mechanisms in Textile Materials: Part II: Capillary-Type Penetration in Yarns and Fabrics [Text] / N. R. S. Hollies, M. M. Kaessinger, B. S. Watson, H. Bogaty // Textile Research Journal. — 1957. — Vol. 27, № 1. — P. 8–13. doi:10.1177/004051755702700102
8. Suprun, N. P. Modeling of masstransfere processes in textiles [Text] / N. P. Suprun // Vlakna a textil. — 2001. — № 2. — P. 125.
9. Рябчиков, М. Л. Нестационарна модель водовбирання текстильними матеріалами по товщині [Текст] / М. Л. Рябчиков, В. І. Власенко, С. І. Ковтун // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — 2009. — № 2(132). — С. 325–334.
10. Жук, В. В. Тригонометрические ряды Фурье и элементы теории аппроксимации [Текст] / В. В. Жук, Г. И. Натансон. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1983. — 384 с.

## ЭКСПРЕС МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФфуЗИИ ФРАКТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Решена задача по определению коэффициентов диффузии фрактальных материалов на основе экспрес экспериментов с учетом математической модели прохождения влаги. На основе приближенного решения уравнения диффузии получены зависимости между константами диффузии и параметрами процесса на начальном этапе поглощения жидкости. Доказано, что для определения обоих коэффициентов диффузии достаточно одного экспериментального параметра.

**Ключевые слова:** диффузия, фрактальный материал, константы, экспрес методика, прохождение влаги.

*Щуцька Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Київський коледж легкої промисловості», Київ, Україна, e-mail: polischuka@mail.ru.*

*Щуцкая Анна Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Киевский колледж легкой промышленности», Киев, Украина.*

*Shchutska Ganna, Higher State Educational Establishment «Kyiv College of Light Industry», Ukraine, e-mail: polischuka@mail.ru*