

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

### Анотація

*Запропонована математична модель процесу сушіння обмазки зварювальних електродів. Результати роботи можуть бути використані для чисельного розрахунку тривалості сушіння капілярно-пористих тіл циліндричної форми та визначення вмісту вологи в них у процесі сушіння.*

**Ключові слова:** сушіння, обмазка електродів, масопровідність.

### Abstract

*The mathematical model of the drying process of coated welding electrodes was proposed. The results of the work can be used to numerically calculate the drying time of capillary-porous bodies of cylindrical shape and determine the moisture content in them during the drying process.*

**Keywords:** drying, coated welding electrodes, mass conductivity

### Постановка проблеми

Задача теоретичного аналізу процесів переносу теплоти і вологи в реальних капілярно-пористих колоїдних тілах, що базується на елементарних процесах перенесення, для сушіння вологих матеріалів досить складна і на даний момент поки що не вирішена ні аналітичним ні числовим шляхом. З врахуванням того, що в реальних умовах параметри сушильного агента не залишаються сталими, а змінюються внаслідок взаємодії з вологим матеріалом, практичне використання теорії внутрішнього тепло- і масообміну є досить обмеженим. В таких випадках для моделювання процесу сушіння зручніше використовувати модель масопровідності, в якій постулатом є незначний вплив термоградієнтного переносу вологи всередині капілярно-пористого матеріалу.

### Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в отриманні аналітичного рішення нестационарної задачі масопровідності з граничними умовами третього роду для сушіння обмазки зварювальних електродів.

### Основна частина

Прийmemo наступні допущення:

- обмазка електродів є правильним циліндром і випаровування вологи з торців обмазки відсутнє;
- вологий матеріал обмазки є капілярно-пористим тілом і рідина вільно переміщується всередині пористої структури;
- випаровування рідини відбувається тільки на зовнішній поверхні тіла;
- швидкість процесу випаровування визначається тепловою, що підводиться до поверхні тіла;
- температура вологого тіла в будь-який момент часу однакова по його товщині;

Згідно з моделлю масопровідності всі елементарні види перенесення маси в капілярно-пористих тілах замінюються деякою еквівалентною масопровідністю [1]. Вплив температури в моделі масопровідності враховується залежністю коефіцієнта масопровідності (коефіцієнта ефективної ди-

фузії) матеріалу від температури.

Тоді потік маси в матеріалі можна описати першим законом Фіка

$$\bar{j}_m = -D_e \cdot \text{grad}C, \quad (1)$$

де  $C$  – поле концентрацій вологи;

$D_e$  – коефіцієнт ефективної дифузії, який в загальному випадку залежить від температури, структури матеріалу і локальних значень концентрації вологи.

Розрахунок балансу маси всередині вологого матеріалу, з врахуванням рівняння (1) приводить до відомого [2] рівняння масо провідності

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \text{div}(D_e \cdot \text{grad}C), \quad (2)$$

Якщо  $D_e = \text{const}$ , то рівняння масопровідності стає лінійним

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_e \nabla^2 C. \quad (3)$$

Умови однозначності до рівнянь (2) і (3) повинні мати одну початкову умову і дві граничних умови, по кожній з координат всередині тіла (Рис.1).

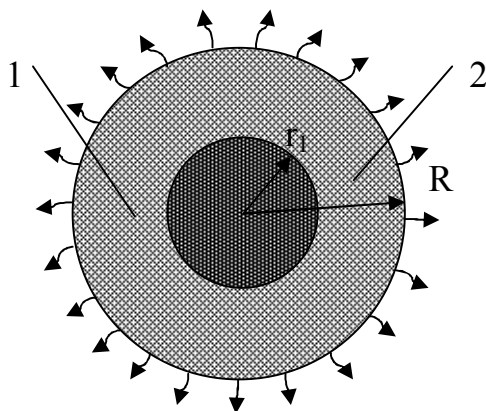


Рисунок 1 – Процес масовіддачі від обмазки зварювального електрода

1 – електрод, 2 – обмазка

Оскільки в обмазці електродів, після її формування на стержні, перед сушінням, волога розподілена рівномірно, початкову умову можна записати так

$$C|_{\tau=0} = C_0. \quad (4)$$

Обмазка зварювальних електродів є правильним геометричним тілом (циліндром), в якому при сушінні концентрація вологи змінюється тільки за однією координатою  $r$ .

Граничні умови запишемо у вигляді граничних умов третього роду (у вигляді рівнянь конвективної масовіддачі) від поверхні вологого тіла в навколишнє середовище

$$\begin{aligned} & \text{– для } r = r_1, \quad \left. \frac{dC}{dr} \right|_{r=r_1} = 0; \\ & \text{– для } r = R, \quad \left. \frac{dC}{dr} \right|_{r=R} = \frac{\beta(C_c - C_p)}{D_e}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі;

індекси "с" і "р" відносяться до поверхні і навколишнього середовища відповідно.

Рішення диференційного рівняння для такої задачі відоме [3]

$$C\left(\frac{r}{R}, Fo_m, Bi_m\right) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_n)}{\mu_n^2 [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (6)$$

де  $\mu_n$  – корені характеристичного рівняння  $\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi_m}$  ;

$J_0(\mu)$  і  $J_1(\mu)$  – функції Бесселя дійсного аргумента нульового і першого порядків

$Fo_m = \frac{D_e \tau}{R^2}$  – масообмінний критерій Фур'є;

$Bi_m = \frac{\beta R}{D_e}$  – масообмінний критерій Біо.

$C\left(\frac{r}{R}, Fo_m, Bi_m\right)$  – безрозмірна відносна вологість матеріалу.

Середнє значення відносної вологості в обмазці для будь-якого моменту часу отримуємо, проінтегрувавши формулу (6) по радіусу обмазки від  $r_1$  до  $R$

$$\bar{C}(Fo_m, Bi_m) = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1^2(\mu_n)}{\mu_n^2 [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} e^{-\mu_n^2 Fo_m}. \quad (7)$$

Результати експерименту, подані в роботах [4,5] і числові розрахунки, виконані в середовищі Mathcad підтверджують адекватність даної моделі.

### Висновки

На підставі спрощеної моделі масопровідності розроблена математична модель процесу сушіння обмазки зварювальних електродів.

Дану модель можна застосовувати для числового розрахунку тривалості сушіння капілярно-пористих тіл циліндричної форми.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой / С. П. Рудобашта. – М. : Химия, 1980. – 248 с.
2. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – М. : Химия, 1970. – 432 с.
3. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, С. А. Сукомел. – М. : Высшая школа, 1981. – 326 с.
4. Співак О. Ю. Експериментальні дослідження кінетики сушіння обмазки зварювальних електродів / О. Ю. Співак, Л. А. Боднар, К. О. Іщенко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – №2. – С. 85-90.
5. Співак О. Ю. Зміна параметрів сушильного агента в процесі сушіння обмазки зварювальних електродів / О. Ю. Співак, Л. А. Боднар, Я. А. Єфремов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2014. – №1. – С. 146-150.

**Співак Олександр Юрійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email : o\_spivak@meta.ua.

**Spivak O.Y.** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : o\_spivak@meta.ua.