

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 681.12

DOI 10.31649/2311-1429-2019-1-61-65

О. Ю. Співак

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ОБМАЗКИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

На підставі спрощеної моделі масопровідності розроблена математична модель процесу сушіння обмазки зварювальних електродів. Модель враховує процес зневоднення в зонах із постійною і зі спадаючою швидкістю сушіння і побудована на отриманні аналітичного рішення нестационарної задачі масопровідності з граничними умовами третього роду для сушіння трубчастих тіл циліндричної форми. Адекватність даної математичної моделі порівнювалася з виконаними автором експериментальними дослідженнями сушіння рутилової обмазки зварювальних електродів.

Математична модель спрощена. При розробленні математичної моделі прийняті такі допущення: 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, а швидкість процесу випаровування визначається теплою, що підводиться до поверхні тіла; температура вологого тіла в будь-який момент часу однакова по його товщині;

Модель розроблена в полярних координатах. Вважалося, що обмазка зварювальних електродів є правильним геометричним тілом (циліндром), в якому при сушінні концентрація вологи змінюється тільки за однією координатою. Граничні умови записані у вигляді граничних умов третього роду (у вигляді рівнянь конвективної масовіддачі) від поверхні вологого тіла в навколишнє середовище.

Результати роботи можуть бути використані для числового розрахунку тривалості сушіння капілярно-пористих тіл циліндричної форми, таких, як наприклад, локшина, та визначення вмісту вологи в них у процесі сушіння.

Ключові слова: сушіння, обмазка електродів, масопровідність.

Вступ. 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

Приймемо 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 теплою, 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 дифузії) 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 концентрації 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).

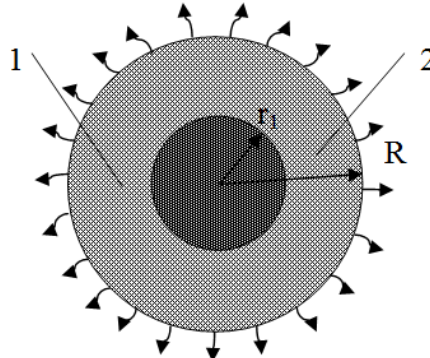


Рисунок 1 – Процес масовіддачі від обмазки зварювального електрода
1 – електрод, 2 – обмазка

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 β – коефіцієнт масовіддачі;

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

Рішення диференційного рівняння для такої задачі відоме [3].

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

де μ_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 обмязці для будь-якого моменту часу отримаємо, проінтегрувавши формулу (6) по радіусу обмязки 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.

На рис. 2 подані графіки зміни відносної вологості, отримані за результатами числового експерименту за запропонованою математичною моделлю для електродів діаметром 3, 4 і 5 мм в порівнянні з експериментальними результатами на рутілових електродах діаметром 5 мм. Детально методика експериментальних досліджень описана в роботі [4].

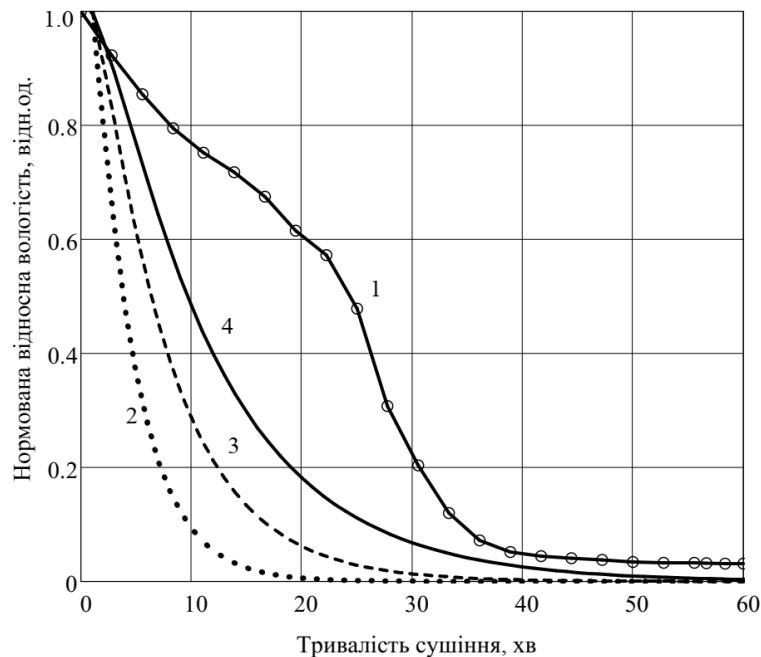


Рисунок 2 – Порівняння результатів експериментальних досліджень з математичним моделюванням
1 – результати експерименту; 2, 3, 4 – розрахунки для електродів відповідно 3, 4 і 5 мм

Відхилення розрахункових результатів від експериментальних в зоні сушіння з постійною швидкістю можна пояснити спрощеннями, введеними в математичну модель. Саме через це довелося нормувати залежності на максимальне значення, оскільки спрощена модель масопровідності не враховує початкової вологості обмязки.

Висновки

На підставі спрощеної моделі масопровідності розроблена математична модель процесу сушіння обмазки зварювальних електродів, адекватність якої перевірено за результатами натурального експерименту.

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

СПИСОК 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. 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.

REFERENCES

1. Rudobashta S. P. Massoperenos v systemakh s tvrdoy fazoy / S. P. Rudobashta. – M.: Khymyya, 1980. – 248 s.
2. Lykov M. V. Sushka v khymycheskoy promyshlennosti / M. V. Lykov. – M.: Khymyya, 1970. – 432 s.
3. Ysachenko V. P. Teploperedacha / V. P. Ysachenko, V. A. Osypova, S. A. Sukomel. – M.: Vysshaya shkola, 1981. – 326 s.
4. Spivak O. YU. Eksperymental'ni doslidzhennya kinetyky sushynnya obmazky zvaryval'nykh elektrodov / O. YU. Spivak, L. Bodnar, K. O. Ishchenko // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. – 2013. – №2. – S. 85-90.
5. Spivak O. YU. Zmina parametriv sushyl'noho ahenta v protsesi sushynnya obmazky zvaryval'nykh elektrodov / O. YU. Spivak, L. A. Bodnar, YA. A. Yefremov // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. – 2014. – №1. – S. 146-150.

Співак Олександр Юрійович – к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики, Вінницького національного технічного університету. ORCID 0000-0002-1988-1886. E-mail: spivak000@gmail.com.

O. Spivak

STUDY OF DRYING PROCESS OF WELDING ELECTRODES BY METHOD OF MATHEMATICAL MODELING

Vinnitsia National Technical University

Based on the simplified model of mass conductivity, a mathematical model of the process of drying the welding of electrodes was investigated. The model takes into account the dewatering process in zones with constant and waning drying rate and is based on obtaining an analytical solution of the non-stationary problem of mass conductivity with boundary conditions of the third kind for drying tubular bodies of cylindrical shape. The adequacy of this mathematical model was compared with the experiments carried out by the author of the drying of the rutile coating of the welding electrodes.

The mathematical model is simplified. When developing a mathematical model, the following assumptions were made: moisture evaporation from the coating ends is absent; The wet coating of the welding electrodes is a capillary-porous body, and the liquid moves freely within the porous structure; the evaporation of a liquid occurs only on the outer surface of the body, and the rate of the evaporation process is determined by the heat supplied to the surface of the body; the temperature of a wet body at any time is the same in thickness;

The model is made in polar coordinates. It was believed that the welding of electrodes is a regular geometric casing (cylinder), in which, during drying, the moisture concentration changes only in one coordinate. The boundary conditions are written in the form of boundary conditions of the third kind (in the form of equations for the return of convective mass) from the surface of the wet body to the environment.

The results of the work can be used for numerical calculation of the duration of drying of capillary-porous bodies of cylindrical shape (eg pasta) and determination of moisture content in them during the drying process.

Keywords: drying, coated welding electrodes, mass conductivity

Spivak O. – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor department of thermal power engineering, Vinnitsia National Technical University. ORCID 0000-0002-1988-1886. E-mail: spivak000@gmail.com.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ОБМАЗКИ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Винницкий национальный технический университет

На основании упрощенной модели массопроводности разработана математическая модель процесса сушки обмазки сварочных электродов. Модель учитывает процесс обезвоживания в зонах с постоянной и с падающей скоростью сушки и построена на получении аналитического решения нестационарной задачи массопроводности с граничными условиями третьего рода для сушки трубчатых тел цилиндрической формы. Адекватность данной математической модели сравнивалась с выполненными автором экспериментальными исследованиями сушки сварочных электродов с рутиловым покрытием.

Математическая модель упрощена. При разработке математической модели приняты следующие допущения: испарение влаги с торцов обмазки отсутствует; влажный материал обмазки является капиллярно-пористым телом и жидкость свободно перемещается внутри пористой структуры; испарение жидкости происходит только на внешней поверхности тела, а скорость процесса испарения определяется теплотой, подводимой к поверхности тела; температура влажного тела в любой момент времени одинакова по его толщине;

Модель разработана в полярных координатах. Считалось, что обмазка сварочных электродов является правильным геометрическим телом (цилиндром), в котором при сушке концентрация влаги меняется только по одной координате. Граничные условия записаны в виде граничных условий третьего рода (в виде уравнений конвективной массоотдачи) от поверхности влажного тела в окружающую среду.

Результаты работы могут быть использованы для численного расчета продолжительности сушки капиллярно-пористых тел цилиндрической формы (например макарон) и определения содержания влаги в них в процессе сушки.

Ключевые слова: сушка, обмазка электродов, массопроводность.

Спивак Александр Юриевич – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики, Винницкого национального технического университета. ORCID: 0000-0002-1988-1886. E-mail: spivak000@gmail.com.