

## ПРОЦЕС КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ В АПАРАТАХ ПРОТОЧНОГО ТИПУ

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

### Анотація

*Розроблена математична модель роботи камерної конвективної сушарки проточного типу і проведено числовий експеримент. Результати числового експерименту порівняно з отриманими раніше експериментальними даними.*

**Ключові слова:** сушарка, сушіння, відносна вологість, конвекція.

### Abstract

*A mathematical model of the chamber convective dryer of the flow type has been developed and a numerical experiment has been performed. The results of a numerical experiment compared with previously obtained experimental data.*

**Keywords:** dryer, drying, relative humidity, convection.

### Вступ

Конвективне сушіння є одним з основних технологічних процесів промисловості, на яку витрачається велика кількість енергії. Енергетичні витрати можна зменшити, використовуючи оптимальні тепловологісні режими сушіння і оптимальні режимні параметри роботи сушильної техніки для тієї чи іншої сировини. Для пошуку оптимальних режимних параметрів роботи сушарок різних типів доцільно застосування метод математичного моделювання.

### Основна частина

Найбільш проста постановка задачі тепломасоперенесення в процесі сушіння полягає у вивченні просторово-часової зміни вмісту вологи і температури в середині матеріалу. Для спрощення рішення цієї задачі в ряді робіт [1,2] приймається, що коефіцієнт вологопровідності не залежить від вологості матеріалу, а також нехтують термовологопровідністю, як механізмом, що дає незначний вклад за температур менших від 100°. В цьому випадку види перенесення внутрішньої вологи апроксимуються рівнянням дифузії з ефективним коефіцієнтом дифузії [3]. Для опису процесу переносу теплоти всередині тіла можна використати диференціальне рівняння теплопровідності. Моделі такого роду є непоганим наближенням для опису основних характеристик процесів тепломасоперенесення при сушінні вологих матеріалів.

В реальних умовах в процесі сушіння спостерігається зміна вмісту вологи і температури не тільки вологого матеріалу, але і сушильного агента. В цьому випадку для вирішення системи диференціальних рівнянь, яка описує процеси масо-і теплоперенесення, може бути використаний математичний апарат задачі про поглинання речовини твердим тілом з обмеженого об'єму навколишнього середовища [4]. На просторово-часову зміну температури і вологи всередині твердого тіла можуть значно впливати гідродинамічний режим роботи апарату, співвідношення кількості матеріалу, що висушується і сушильного агента, витрати твердої та газової фаз, що надходять в апарат і видаляються з апарату. З врахуванням викладеного, в роботі розроблено математичну модель процесу сушіння каплярно-пористого матеріалу в камерній сушарці проточного типу.

При постановці завдання було прийнято, що рівновага між сушильним агентом і вологим матеріалом описується нелінійним рівнянням ізотерми Брунауера, Еммета і Теллера (БЕТ) і зроблені деякі спрощення:

– періоди прогріву матеріалу і сушарки є малими (і ними можна знехтувати) в порівнянні із загальною тривалістю сушіння, яка характеризується періодом постійної швидкості сушіння (I період) і періодом спадаючої швидкості сушіння (II період);

– у перший період сушіння вся теплота, що підводиться до матеріалу, витрачається тільки на інтенсивне поверхнєве випаровування вологи, а сам матеріал знаходиться при температурі мокрого термометра;

– період спадаючої швидкості сушіння характеризується уповільненням випаровування вологи з поверхні матеріалу і його температура поступово підвищується;

– при досягненні вологості матеріалу до рівноважної його температура стає рівною температурі навколишнього середовища;

– швидкість процесу сушіння лімітується як зовнішньою, так і внутрішньою дифузією;

– сушильний агент нагрівається від основного (зовнішнього) і додаткового (внутрішнього) калориферів;

– сушіння вологого матеріалу здійснюється з частковою рециркуляцією сушильного агента.

З врахуванням прийнятих припущень було складено математичний опис процесу, який включає наступні рівняння:

– рівняння дифузії і теплопровідності для твердого матеріалу;

– рівняння рівноваги;

– рівняння матеріального і теплового балансів сушарки проточного типу;

– початкові і граничні умови.

Для вирішення поставленого завдання був використаний інтервально-ітераційний метод, суть якого полягає в тому, що час усього процесу сушіння представляється рядом послідовно з'єднаних малих тимчасових інтервалів. У межах кожного малого тимчасового інтервалу сушіння процес описується системою лінійних диференціальних рівнянь. Рівняння нелінійної ізотерми десорбції замінюємо рівнянням дотичної до рівноважної кривої. Для кожного невеликого тимчасового інтервалу поставлена задача вирішується за допомогою методу інтегральних перетворень Лапласа. Здійснюючи операцію ітерації аналітичних рішень для всіх тимчасових інтервалів, знаходили загальну картину зміни процесу сушіння.

На рис.1 приведені для порівняння розраховані на ЕОМ і експериментально знайдені [4] кінетичні криві процесу сушіння обмазки зварювальних електродів.

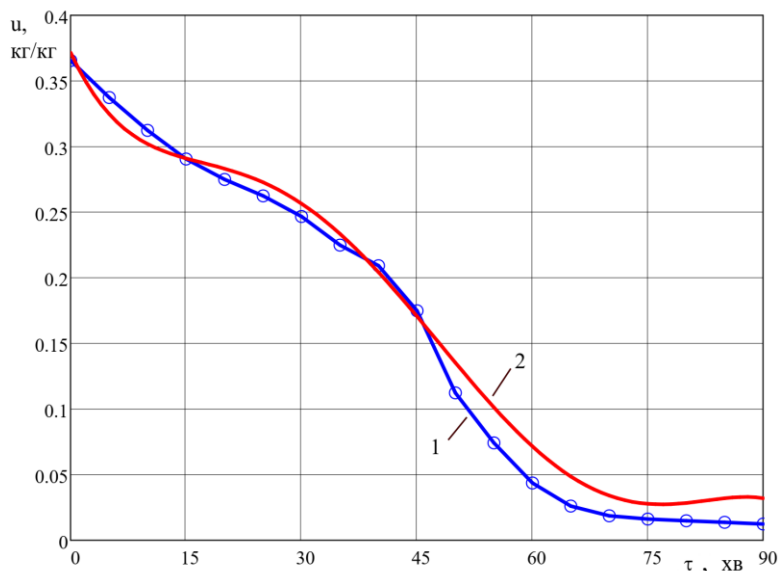


Рис.1. Криві сушіння обмазки електродів

1 – експериментальні дані [4];

2 – результат розрахунку

З розрахункових кривих, наведених на рисунку видно, що на початку процесу сушіння відбувається видалення вологи з матеріалу за деяким нелінійним законом. Це пов'язано з прийнятими припущеннями про те, що періоди прогрівання матеріалу і сушарки не враховуються. Для даних умов, коли в початковий момент часу вологовміст повітря в сушарці має мінімальне значення, а його температура – максимальне значення, спостерігається інтенсивне видалення вологи з матеріалу. Потім, у зв'язку з підвищенням вмісту вологи в сушильному агенті і зменшенням його температури, швидкість сушіння поступово сповільнюється і стає постійною, що характерно для першого періоду. З настанням другого періоду крива сушіння виражається деякою кривою лінійною. При цьому вологість матеріалу в кінці

другого періоду асимптотично наближається до рівноважного значення. Задовільний збіг експериментальних даних і результатів обчислень дозволяє зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі реальному процесу.

Проведені дослідження сприятимуть подальшому розвитку аналітичної теорії теплопровідності і дифузії в області вирішення крайових задач нестационарного перенесення теплоти і речовини в капі-

лярно-пористих тілах за змінних в час умовах і більш глибокому розумінню суті процесів, що протікають при сушінні, необхідної для підвищення ефективності роботи сушильних апаратів.

### **Висновки**

Розроблена математична модель задовільно збігається з експериментальними даними і може бути використана для розроблення режимних параметрів роботи камерних сушильних установок проточного типу.

Проведені дослідження сприятимуть подальшому розвитку аналітичної теорії теплопровідності і дифузії в області вирішення крайових задач нестационарного перенесення теплоти і речовини в капілярно-пористих тілах за змінних в час умовах і більш глибокому розумінню суті процесів, що протікають при сушінні, необхідної для підвищення ефективності роботи сушильних апаратів.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Сажин Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин . - М.: Наука, 1997. - 448 с.
2. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В. Ф. Фролов. - Л.: Химия. 1987. - 208 с.
3. Співак О. Ю. Дослідження процесу сушіння обмазки зварювальних електродів методом математичного моделювання / О. Ю. Співак // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2019, № 1(26). – С. 61-65.
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(15). – С. 85-90.

**Мазур Володимир Іванович** студент групи ТЕ-19мз, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Задорожний Вадим Вячеславович** студент групи ТЕ-20м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Співак Олександр Юрійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [spivak000@gmail.com](mailto:spivak000@gmail.com).

**Mazur V.I.** – student of group TE-19mz, department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

**Zadorozhniy V.V.** – student of group TE-20m, department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Spivak O.Y.** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [spivak000@gmail.com](mailto:spivak000@gmail.com).