

(при високих температурах сушіння), то потрібно визначати відносний коефіцієнт термодифузії вологи – δ . Вказаних вище критеріїв достатньо для розрахунку кінетики процесу сушіння тіла і його температури у період спадаючої швидкості сушіння. У період постійної швидкості сушіння інтенсивність теплообміну – q (Дж/(м²·с)) і вологообміну – j (кг/(м²·с)) визначаються за наведеними вище формулами тепло – і масообміну. При цьому між q та j існує простий взаємозв'язок $q = jr_0$. Знаючи основні параметри, які характеризують процес сушіння та його основні кінетичні характеристики процесу сушіння вологого матеріалу, можна визначити тривалість сушіння і застосувати потрібний режим, щоб отримати найкращі результати.

Чинником, який сприяє поглибленню зони випаровування, є наявність температурного градієнта, під впливом якого волога переміщується за напрямом потоку тепла. Щоб зменшити підведення вологи до поверхні j потрібно зменшити коефіцієнт вологопровідності a_m і збільшити величину $\delta dt/dU$. Коефіцієнт термовологопровідності δ із зменшенням вологості також зменшується, тому в міру сушіння потрібно збільшувати величину dt/dU . Ця величина визначається з температурної кривої $t = f(U)$, як тангенс кута $\text{tg } \psi$ нахилу дотичної до вісі вологості (вологовмісту), тобто $\text{tg } \psi = dt/dU$.

Вибір раціонального режиму сушіння визначається такими вимогами:

- якість висушуваного матеріалу;
- збереження фізико-механічних властивостей деревини;
- мінімальна тривалість процесу сушіння;
- мінімальна усадка;
- технічна та технологічна реалізація режиму у сушильних камерах.

Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини (монографія). – Коломия: Вік. – 2005. – 364 с.
2. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

УДК 66.047

*Проф. Я.М. Ханик, д-р техн. наук; аспір. Т.І. Римар;
О.М. Креховецький, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"*

ГІДРОДИНАМІКА І КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГЛИНИ У ЩІЛЬНОМУ ШАРІ ПІД ЧАС ІЧ-НАГРІВАННЯ

Наведено результати досліджень гідродинаміки та кінетики комбінованого сушіння глини з використанням ІЧ-нагрівання. Показано характер гідродинамічних залежностей, які змінюються зі зміною висоти шару глини. Вивчено кінетику процесу сушіння глини комбінованим способом.

Prof. Ya.M. Hanyk; T.I. Rymar; O.M. Krehovets'kyj – NU "L'vivs'ka Politekhnik"

Hydrodynamics and kinetics of process of drying of clay in a dense layer during the infrared heating

In work the results of researches of hydrodynamics and kinetics of the combined drying of clay are resulted with the use of the infra-red heating. Character of hydrodynamic

dependences which change with the change of height of layer of clay is shown. Kinetics of process of drying of clay is trained by the combined method.

Під час виготовлення ряду керамічних виробів виникає проблема якісного та інтенсивного сушіння сировини, зокрема, глини. Процес сушіння відчутно впливає на економіку виробництва, оскільки його здійснення потребує значних енергетичних затрат, які становлять 10-20 % від собівартості готових виробів [1]. Одним із методів одержання керамічних виробів є метод сухого пресування їх із прес-порошку. Прес-порошок з вологістю 5÷8 % отримують шляхом сушіння шлікеру вологістю 50÷60 % в баштовій розпилювальній сушарці. Отриманий прес-порошок на пресах пресують до утворення тонкостінних виробів: личкувальної, фасадної плитки та плоскої черепиці.

Тому, доцільно дослідити процес сушіння подібних матеріалів, використовуючи сучасні методи зневоднення. Дослідження проводили із застосуванням комбінованого сушіння (конвективний метод з ІЧ-нагріванням та профільтовуванням теплоносія через шар матеріалу). Цей метод дає змогу отримати тепло безпосередньо у зоні сушіння додатковим ІЧ-нагріванням, яке здійснюється шляхом спалювання газу за допомогою пальників інфрачервоного горіння, тобто повністю використовували, як тепло, отримане у процесі спалювання газу, так і тепло ІЧ-випромінювання, яке рухається крізь шар вологого матеріалу.

Проводили дослідження гідродинаміки як сухого, так і вологого матеріалу. Об'єктом дослідження були циліндричні частинки глини розміром $d \times h = 6 \cdot 10^{-3} \times 5 \cdot 10^{-3}$ м з початковою вологістю ≈ 18 %. У результаті досліджень гідродинаміки шару сухої глини отримали параболічну залежність $\Delta P = f(\omega)$, показану на рис. 1, що свідчить про вплив на гідравлічний опір як в'язкісних, так і інерційних сил.

Результати досліджень (рис. 1) показують, що гідравлічний опір шару глини є малим у разі значної фіктивної швидкості теплоносія і майже не залежить від зміни висоти шару досліджуваного матеріалу. Так, за швидкості повітря 1,2 м/с через шар матеріалу висотою $H = 20 \cdot 10^{-3}$ м необхідно створити перепад тиску рівний 390 Па, а для $H = 60 \cdot 10^{-3}$ м – 435 Па.

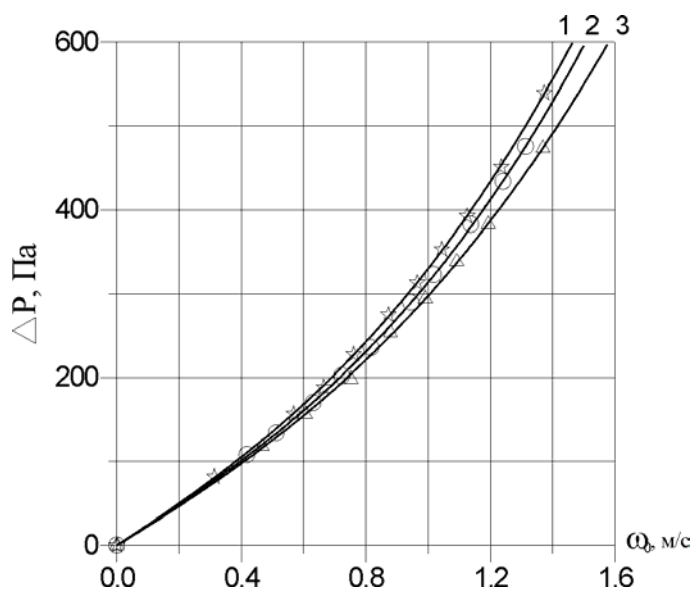


Рис. 1. Залежність гідравлічного опору сухого шару глини від фіктивної швидкості руху теплоносія:
 1 – $60 \cdot 10^{-3}$ м;
 2 – $40 \cdot 10^{-3}$ м;
 3 – $20 \cdot 10^{-3}$ м

Результати досліджень гідродинаміки вологого шару глини показують, що швидкість фільтрування є сталою, і не залежить від зміни вологості. Одночасне незначне збільшення гідравлічного опору до величини $\Delta P_c = 100$ Па пояснюється явищами "зсідання" матеріалу у процесі сушіння. Залежність гідравлічного опору від зміни швидкості руху теплоносія описується рівняннями [2]:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \omega} = A + B \cdot \omega; \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \omega} = A, \quad (2)$$

де: ΔP – перепад тисків, Па; H – висота шару глини, м; ω – фіктивна швидкість руху теплоносія, м/с; A і B – коефіцієнти, A , Н·с/м⁴; B , Н·с²/м⁵.

На основі експериментальних даних розраховані коефіцієнти A і B , які входять в наведені рівняння, що дає змогу прогнозувати гідродинаміку процесу сушіння у щільному шарі матеріалу.

Проведено ряд досліджень щодо впливу зміни температури (рис. 2), швидкості теплоносія (рис. 3) та висоти шару матеріалу (рис. 4) на кінетику комбінованого сушіння з використанням додаткового ІЧ-нагрівання та профільтовуванням теплоносія через шар матеріалу.

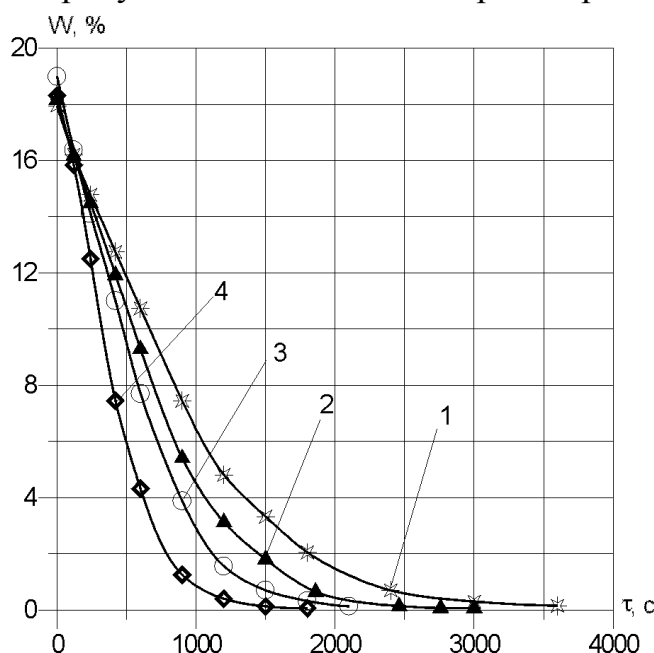


Рис. 2. Кінетика сушіння глини (циліндричні частини розміром $d \times h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) за умов:

$H = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м};$

$\Delta P = 98 \text{ Па};$

1 – 80 °C;

2 – 110 °C;

3 – 150 °C;

4 – 175 °C

Як випливає з наведених графічних залежностей, процес сушіння глини характеризується наявністю першого та другого умовних періодів. Відсутність періоду механічного витіснення і винесення вологи пояснюється самою природою матеріалу, який є капілярно-пористим колоїдним тілом, і характеризується наявністю значної кількості осмотично і адсорбційно зв'язаної вологи. Тривалість періоду постійної швидкості є значно меншою, ніж тривалість другого періоду, незважаючи на те, що практично 70 % вологи випаровується у першому періоді. Таке явище пояснюється тим, що у періоді падаючої швидкості процес лімітується молекулярною дифузією вологи із внут-

рішніх шарів матеріалу до поверхні. Цей процес, як відомо, описується законом Фіка [2]:

$$M = -D \cdot F^* \cdot \tau \cdot \frac{dc}{dn}, \quad (3)$$

де: M – маса речовини, що переноситься, кг; F^* – поверхня перенесення речовини шляхом молекулярної дифузії, м²; τ – час, с; dc/dn – градієнт концентрацій; D – коефіцієнт молекулярної дифузії, м²/с.

Результати досліджень впливу зміни температури на кінетику процесу сушіння (рис. 2) показують, що збільшення температури від 80°C до 175°C (у 2,18 разів) приводить до зменшення часу сушіння від 4300 с до 2300 с (у 1,7 разів). Вказане зростання швидкості сушіння можна пояснити, виходячи із залежності, що описує інтенсивність сушіння у період постійної швидкості (формула Ньютона) [3]:

$$q_n = \alpha_q (t_c - t_n), \quad (4)$$

де: q_n – інтенсивність теплообміну, Вт/м²; α_q – коефіцієнт теплообміну, Вт/м²·°C; t_c – температура теплоносія, °C; t_n – температура поверхні матеріалу, °C.

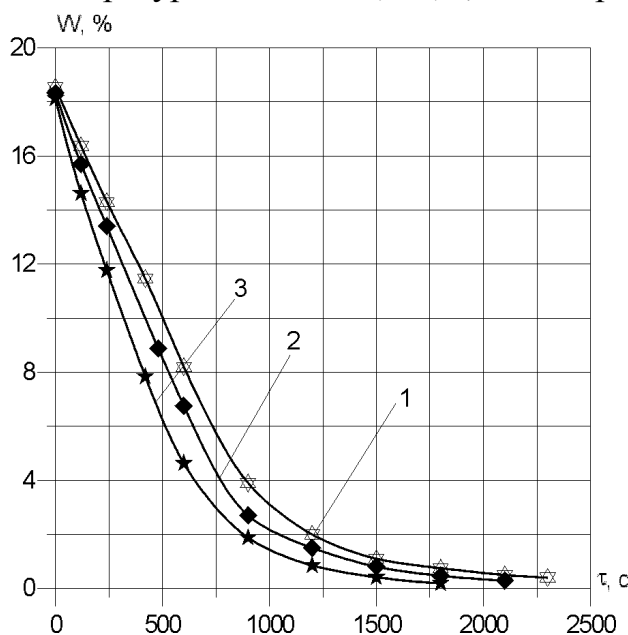


Рис. 3. Кінетика сушіння глини (циліндричні частини розміром $d \times h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) за умов:

$H = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
 $T = 150 \text{ }^\circ\text{C};$
 1 – 98 Па;
 2 – 196 Па;
 3 – 400 Па

Так, збільшення температури теплоносія приводить до збільшення рушійної сили теплообміну ($t_c - t_n$) і, відповідно, до зменшення тривалості процесу зневоднення.

У разі збільшення перепаду тиску (рис. 3) від 96 Па до 400 Па (у 4,16 разів) загальний час сушіння зменшується від 4250 с до 3300 с (у 1,3 разів). Із збільшенням висоти шару матеріалу (рис. 4) від $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (утричі) тривалість сушіння збільшується від 2500 с до 5000 с (удвічі).

Враховуючи той факт, що досліджуваний матеріал є капілярно-пористим колоїдним тілом, коефіцієнт молекулярної дифузії є незначним. Варто зазначити також, що у другому періоді підведення тепла за рахунок конвективного теплообміну не є інтенсивним, оскільки поверхня частин висихає, і коефіцієнт теплопровідності її зменшується, оскільки термічний опір сухої поверхні матеріалу зростає. Крім цього, рушійна сила передачі тепла від теп-

лоносія до поверхні зменшується, оскільки температура поверхні частин зростає, а різниця температур на поверхні зменшується.

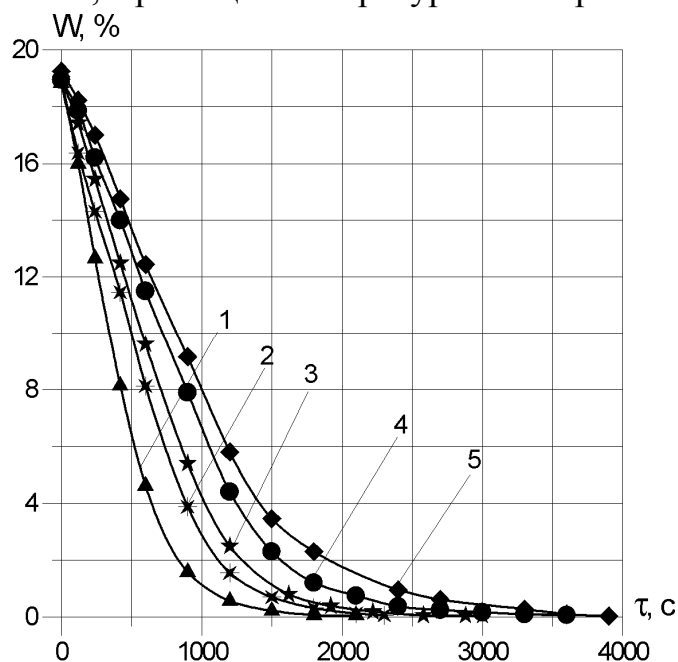


Рис. 4. Кінетика сушіння глини (циліндричні частини розміром $d \times h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) за умов:

$T = 150 \text{ }^{\circ}\text{C};$
 $\Delta P = 98 \text{ Па};$
 1 – $20 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
 2 – $30 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
 3 – $40 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
 4 – $50 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
 5 – $60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

У промисловості процес сушіння керамічних мас триває до досягнення матеріалом вологості 6 %, згідно з технологічними вимогами, за наявності першого та другого періодів. У разі сушіння комбінованим методом необхідна вологість досягається матеріалом уже у першому періоді, який завершується за вологості матеріалу $\approx 4 \%$. Таким чином уникаємо необхідності сушіння у другому періоді, де швидкість сушіння лімітується швидкістю молекулярної дифузії, яка є незначною для капілярно-пористих матеріалів.

Отримані результати дають змогу зробити висновок, що комбінований процес сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів конвективним методом з одночасним ІЧ-нагріванням та профільтровуванням теплоносія через шар матеріалу має істотні переваги як з точки зору економії енергозатрат, так і з точки зору інтенсивності сушіння порівняно з існуючими методами.

Література

1. Роговой М.И. Теплотехническое оборудование керамических заводов. – М.: Стройиздат, 1983. – 367 с.
2. Касаткин А.Г. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия. 1973.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

**УДК 658.527.011.56 Асист. Н.О. Думанський – НУ "Львівська політехніка";
 доц. О.І. Думанський, канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України**

МЕТОДИ ПОШУКУ ЕФЕКТИВНОГО РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ З ВИМУШЕНИМ ЄДИНИМ РИТМОМ РОБОТИ

Проведено аналіз наявних методів обчислення коефіцієнта накладання втрат, який залежить від кількості обладнання та коефіцієнта стабільності його роботи. Також запропоновано новий метод дослідження – апроксимація табличних даних.