



DOI 10.32782/2078-0877-2025-25-1-3

УДК 66.047.3.085.1; 66.047-912

В. М. Марчевський, канд. техн. наук, професор

ORCID: 0000-0001-6530-0467

О. А. Новохат, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1198-6675

В. В. Філіпов, аспірант

ORCID: 0009-0000-5098-5539

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: novokhatoleh@gmail.com

КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ СУШІННЯ БІШОФІТУ ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Анотація. Процес сушіння бішофіту є важливим етапом його виробництва, проте потребує значних енерговитрат. У статті описано кінетику процесу сушіння бішофіту інфрачервоним випромінюванням за низькотемпературного режиму до 90 °С. Наведено переваги цього методу та можливі труднощі його застосування. Представлено кінетичні закономірності сушіння бішофіту інфрачервоним випромінюванням у межах густини теплового потоку 0,9–1,45 кВт/м². Описано експериментальну установку. Результати досліджень виконані у вигляді графічних залежностей вологовмісту бішофіту, часу та швидкості сушіння. Запропоновано рівняння, за яким у межах указанного діапазону густини теплового потоку можна визначити константу сушіння бішофіту. Це дасть змогу попередньо визначити інтенсивність сушіння бішофіту інфрачервоним випромінюванням обраним інфрачервоним випромінювачем.

Ключові слова: бішофіт, мінерал, інфрачервоне сушіння, радіаційне сушіння, випромінювання, кінетика, дегідратація, вологовміст.

Постановка проблеми. Сушіння природного мінералу бішофіту є важливим технологічним процесом, що зменшує в ньому значну кількість вологи. Її надмірна кількість може впливати на фізико-хімічні властивості бішофіту, можливість транспортування, зберігання та подальшу ефективність у застосуванні. Так, зокрема, видалення надлишку вологи зменшує вірогідність злежування та комкування цього мінералу. А отримання сухого магнієвмісного концентрату розширює сфери застосування.

Найбільш поширеним способом зневоднення бішофіту є сушіння за допомогою газоподібного теплоносія, насамперед у сушарках з киплячим шаром, шахтних, барабаних та конвеєрних сушарках. Одним з недоліків таких способів сушіння є значні енерговитрати на нагрівання сушильного агента, можливий перегрів поверхні кристалічного мінералу під час сушіння. Останнє може погіршити фізико-хімічні властивості бішофіту та зменшити його вихід через втрату кристалізаційної води.

Одним з перспективних способів зневоднення бішофіту є інфрачервоне сушіння, що є різновидом радіаційного. Адже використання інфрачервоного випромінювання має низку переваг. Зокрема, воно має здатність проникати вглиб матеріалу, не нагріваючи повітря над ним (за винятком дисперсійної вологи в повітрі). Також сучасні інфрачервоні панелі мають гнучку та низьку інерційність керування потоку теплоти, генерованих ними.

Проте практичне застосування інфрачервоного випромінювання для сушіння бішофіту вимагає знання основних кінетичних закономірностей цього процесу. На основі них можна дібрати необхідні технологічні параметри сушіння та визначити доцільність цього способу загалом.

Аналіз останніх досліджень. Загальновідомим є те, що для сушіння бішофіту зазвичай використовують конвективний тип сушіння. Проте авторами показано, що сушіння інфрачер-

воним випромінюванням має низку переваг як для капілярно-пористих тіл [1], зокрема їжі [2–5], так і для матеріалу кристалічної структури [6–8].

За високотемпературного впливу на бішофіт під час сушіння можливе явище його дегідратації – видалення кристалізаційної води з молекул хлориду магнію [9–11]. У деяких випадках принаймні часткова дегідратація є допустима й цілеспрямована під час сушіння [12]. Науковцями досліджується структура бішофіту за різного ступеня дегідратації [13].

Авторами проведено досліди із сушіння бішофіту для визначення поліноміального рівняння, що описує криві сушіння [14]. Проте отримані рівняння шостого порядку мають низку точність у разі змінення хоча б одного параметра сушіння.

Отже, у літературі недостатньо досліджено процес сушіння бішофіту за низькотемпературного режиму без дегідратації кристалізаційної води. Також майже відсутні дані щодо застосування інфрачервоного випромінювання для сушіння бішофіту.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Для визначення доцільності сушіння бішофіту інфрачервоним випромінюванням та надання практичних рекомендацій необхідно встановити кінетичні закономірності цього способу сушіння. Це вимагає встановлення закономірностей впливу різних факторів на протікання процесу сушіння, зокрема густини теплового потоку та початкової вологості. Тому в статті за мету ставиться визначити кінетичні закономірності процесу інфрачервоного сушіння кристалічного бішофіту.

Основна частина. Для визначення кінетичних закономірностей сушіння бішофіту інфрачервоним випромінюванням створено експериментальну установку, представлену на рис. 1.

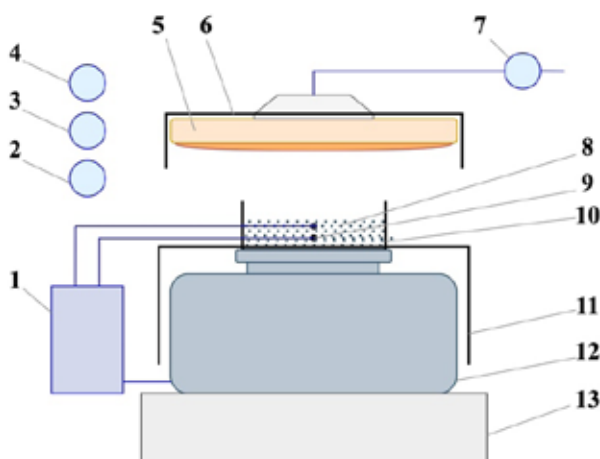


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – персональний комп’ютер; 2 – термометр; 3 – барометр; 4 – гігрометр; 5 – інфрачервоний випромінювач; 6 – рефлектор; 7 – ватметр; 8 – бішофіт; 9 – температурний датчик; 10 – ємність; 11 – захисний екран; 12 – електронні ваги; 13 – вібростійка поверхня

Експериментальна установка складається з електронних ваг, які в режимі реального часу вимірюють поточні значення маси. Для мінімізації впливу зовнішніх коливань на вимірювання ваги розташовані на вібростійкій поверхні.

На робочі площадці електронних ваг розміщується ємність, усередині якої засипається досліджуваний матеріал – кристалічний бішофіт. На поверхні та всередині шару бішофіту розміщуються температурні датчики (термопари).

Значення температури бішофіту від термопар і його поточної маси від електронних ваг передаються та фіксуються на персональному комп’ютері.

Поблизу установки встановлено термометр, барометр і гігрометр для вимірювання показників навколишнього середовища, а саме температури, тиску та вологості відповідно.

Над досліджуваним матеріалом розташовано інфрачервоний випромінювач, що спрямовано до нього робочою поверхнею. Зміну теплового потоку від випромінювача до бішофіту здійснюється зміною поданої на випромінювач напруги. При цьому його електрична потужність вимірюється ватметром.

Для зменшення теплових втрат у навколишнє середовище над випромінювачем міститься рефлектор.

Відстань між робочою поверхнею інфрачервоного випромінювача та поверхнею бішофіту визначається за допомогою штангенциркуля.

Як дослідний матеріал використано кристалічний природний мінерал бішофіт, що складається з хлориду магнію та кристалізаційної води $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [15]. Відповідно, крім води у вигляді плівки на поверхні кристалів, вода також міститься в складі молекул.

Відомо, що з підвищенням температури сушіння з бішофіту може видалятися кристалізаційна вода. Це притаманне й іншим кристалогідратам [16]. Зазвичай за температури до 50°C видаляється лише поверхнева вільна волога. За температури до $90\text{--}100^\circ\text{C}$ бішофіт може втратити до 2 молекул води, за температури 130°C – до чотирьох, якщо температура вища $160\text{--}190^\circ\text{C}$ – втрачається вся кристалізаційна вода з утворенням чистого хлориду магнію.

Під час експериментальних досліджень метою було збереження структури бішофіту. Тому температура сушіння не перевищувала 90°C .

Досліди проводили за густини теплового потоку на поверхні бішофіту рівним $0,9\text{ кВт/м}^2$, $1,2\text{ кВт/м}^2$ та $1,45\text{ кВт/м}^2$.

Перед експериментами бішофіт витримувався в ексикаторі, у результаті чого його вологість була рівномірною і становила близько 13 %. З побудованої за дослідними даними графічної залежності (рис. 2) вихід бішофіту після сушіння становить близько 87 %. Отже, у результаті зневоднення видалено приблизно 13 % вологи, що узгоджується з вихідними даними.

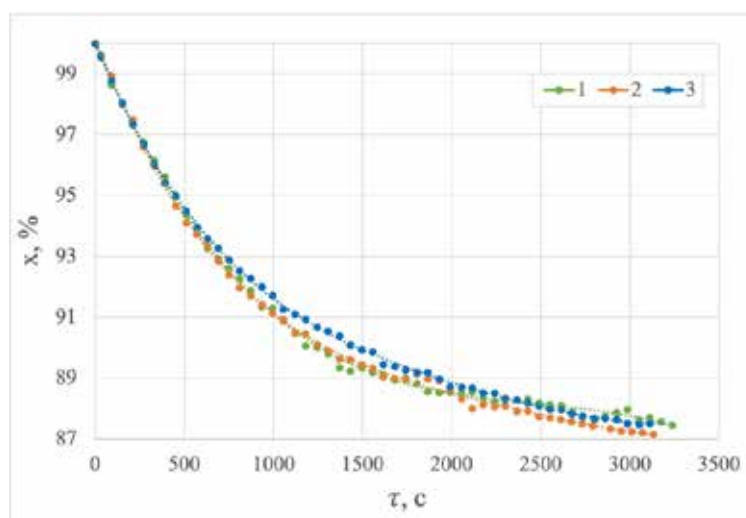


Рис. 2. Графічна залежність виходу бішофіту від часу сушіння

За отриманими експериментальними даними побудовано криві сушіння – залежності вологовмісту бішофіту від часу сушіння (рис. 3).

З рисунку видно, що на кривих сушіння бішофіту відсутній період прогріву, коли зростає швидкість сушіння. Це пов'язано з відносно великим значенням густин теплового потоку,

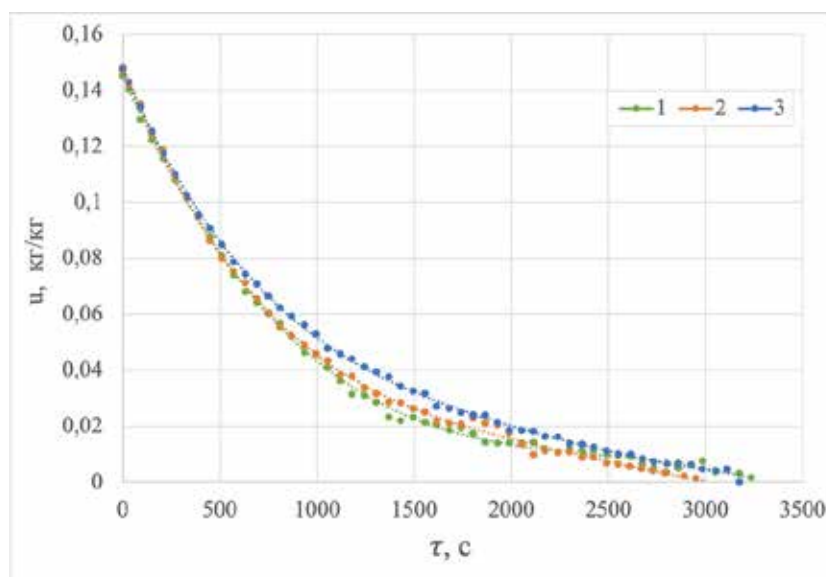


Рис. 3. Криві сушіння бішофіту

а також здатністю інфрачервоного випромінювання проникати вглиб вологи, що значно пришвидшує її нагрівання та перехід до активного випаровування.

За збільшення кривих сушіння на початку цього процесу (рис. 4) можна спостерігати тенденцію прямолінійного зменшення вологовмісту, так званий період постійної швидкості. Але як видно на рис. 3, його тривалість порівняно із загальним часом сушіння незначна й далі процес зневоднення відбувається зі спадною швидкістю.

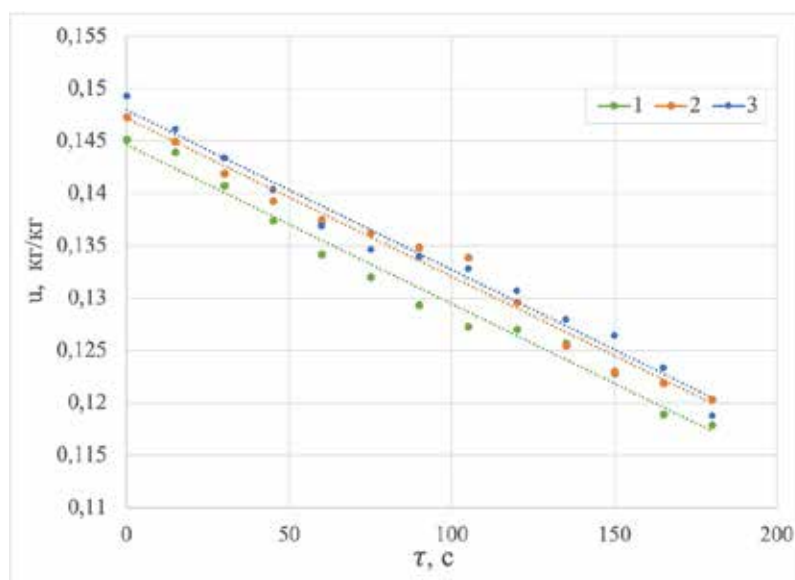


Рис. 4. Криві сушіння на початку процесу

Отже, можна констатувати, що за робочої температури сушіння в межах 70–90 °С відбувається видалення поверхневої вологи. При цьому період прогріву зі зростанням швидкості сушіння не спостерігається на графіках через украй малу його тривалість. Період постійної швидкості присутній, проте він швидко закінчується в межах загальної тривалості сушіння. А більшість часу відбувається сушіння бішофіту за спадною швидкості.

Для підтвердження припущень щодо зміни швидкості сушіння бішофіту побудовано графічні залежності швидкості від часу за густини теплових потоків $0,9 \text{ кВт/м}^2$, $1,2 \text{ кВт/м}^2$ та $1,45 \text{ кВт/м}^2$ відповідно (рис. 5–7).

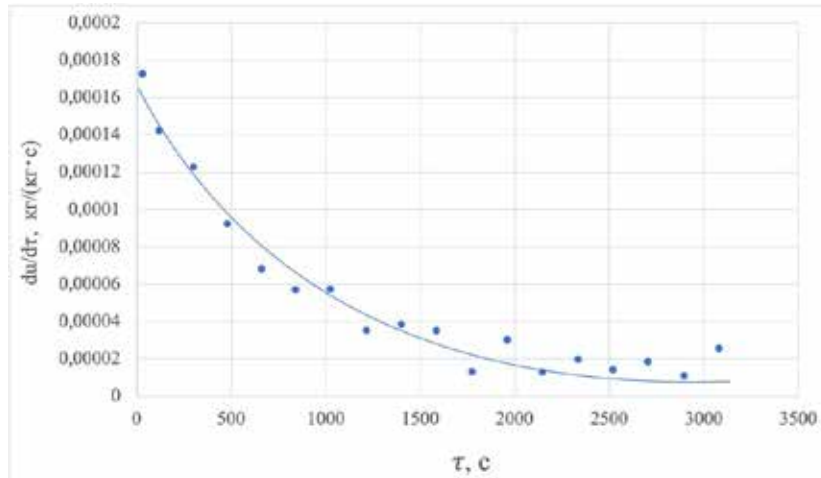


Рис. 5. Зміна швидкості сушіння бішофіту в часі ($0,9 \text{ кВт/м}^2$)

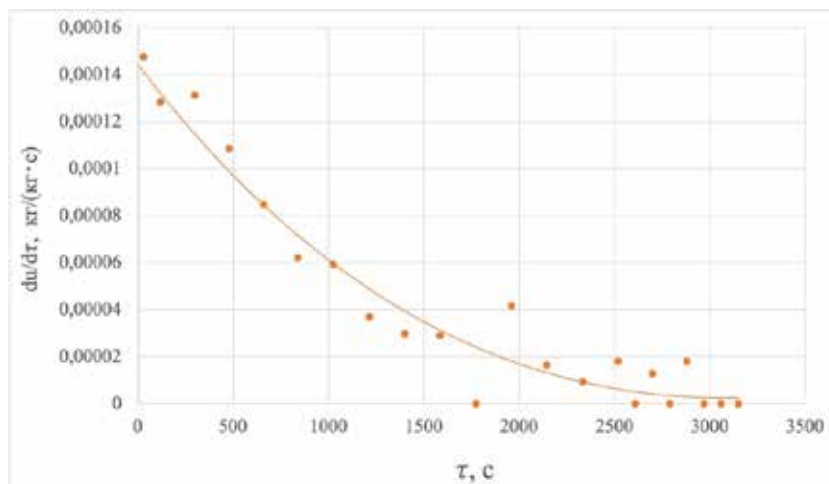


Рис. 6. Зміна швидкості сушіння бішофіту в часі ($1,2 \text{ кВт/м}^2$)

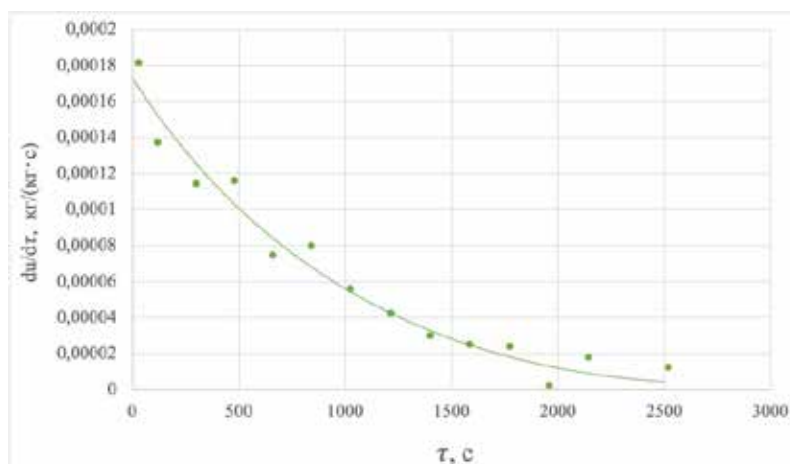


Рис. 7. Зміна швидкості сушіння бішофіту в часі ($1,45 \text{ кВт/м}^2$)

Як видно з рисунків 5–7, швидкість сушіння лише на початку процесу постійна (або мінімально спадна), а далі інтенсивність спадання швидкості сушіння зростає.

Проте в координатах швидкості сушіння бішофіту від його поточного вологовмісту можна спостерігати лінійну залежність з достатнім рівнем збіжності (рис. 8–10).

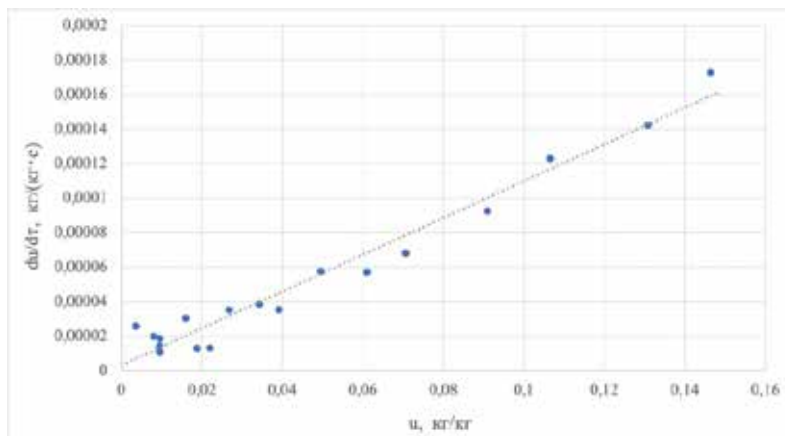


Рис. 8. Залежність швидкості сушіння та вологовмісту (0,9 кВт/м²)

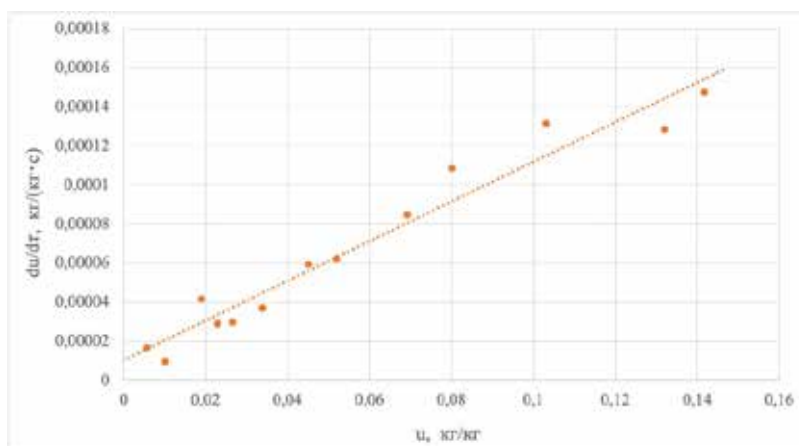


Рис. 9. Залежність швидкості сушіння та вологовмісту (1,2 кВт/м²)

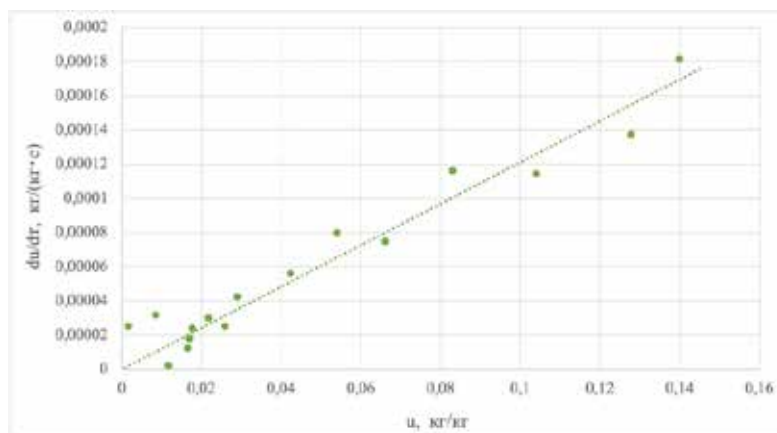


Рис. 10. Залежність швидкості сушіння та вологовмісту (1,45 кВт/м²)

Наведені апроксимуючі лінії є рівнянням типу:

$$du/d\tau = ku, \quad (1)$$

де u – вологовміст бішофіту, кг/(кг·с) або с⁻¹;

τ – поточний час сушіння бішофіту, с;

k – константа швидкості сушіння бішофіту, с⁻¹.

Густина теплового потоку q , кВт/м ²	0,9	1,2	1,45
Константа швидкості сушіння k , с ⁻¹	0,001	0,0011	0,00123
Рівень достовірності R	0,9634	0,9519	0,9633

Графічну кореляція даних згідно з таблицею показано на рис. 1 (достовірність $R^2=0,9838$).

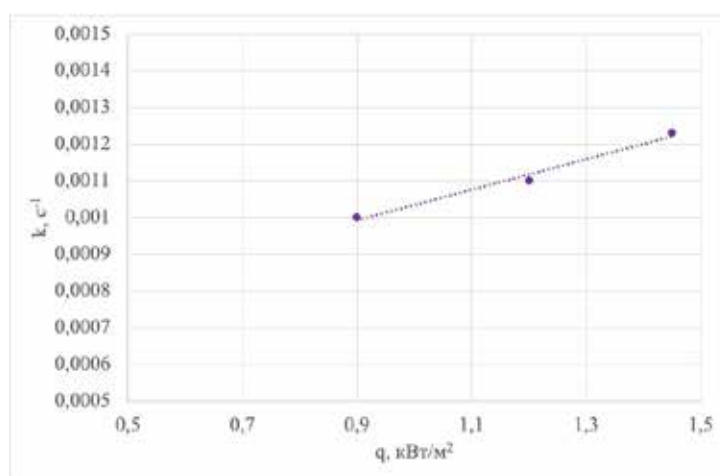


Рис. 11. Кореляція константи швидкості сушіння

Рівняння апроксимуючої прямої згідно з рис. 11 має такий вигляд:

$$k = 0,004q + 0,006 \quad (2)$$

Це рівняння може бути використано для наближеного визначення константи швидкості сушіння бішофіту в діапазоні густин теплового потоку 0,9–1,45 кВт/м². Екстраполяція цього рівняння має обмежене використання, на що вказує наявність вільного члена 0,006. Адже за відсутності теплового потоку константа швидкості сушіння не може мати позитивне значення.

Висновки. Згідно з отриманими експериментальними даними встановлено, що інфрачервоне сушіння кристалічного бішофіту має перспективи щодо його застосування в промислових сушарках. Отримані кінетичні закономірності спростять визначення необхідних технологічних параметрів сушильного обладнання. Проте для забезпечення рівномірності зневоднення матеріалу та інтенсифікації сушіння бажано поєднати цей спосіб сушіння з іншим типом – конвективним, зокрема сушіння в киплячому або фонтувальному шарі. Також використання інфрачервоного випромінювання можливе як доповнення для швидкого нагрівання вологого матеріалу або більш гнучкого керування величини теплового потоку.

Отримане рівняння описує залежність константи швидкості реакції від густини теплового потоку. Його можна використати для попереднього встановлення необхідних параметрів сушіння бішофіту інфрачервоним випромінюванням та доцільності застосування цього способу загалом.

Список використаних джерел

1. Karvatskii A., Marchevsky V., Novokhat O. Numerical modeling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 2(5 (86), P. 14–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96741>
2. Huang D., Yang P., Tang X., Luo L., Sunden B. Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 110, P. 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>
3. Da-Long Jiang, Shivanand S. Shirkole, Hao-Yu Ju, Hao-Yu Ju et al. An improved infrared combined hot air dryer design and effective drying strategy analysis for sweet potato. *LWT*. 2025. Vol. 215. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117204>
4. Kocabiyik H. Drying of carrot slices using infrared radiation [Text] H. Kocabiyik, D. Tezer International Journal of Food Science & Technology. 2009. Vol. 44, Issue 5. P. 953–959. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01767.x>
5. Ai Z., Ren H., Lin Y., Sun W., Yang Z., Zhang Y., Zhang H., Yang Z., Pandiselvam R., Liu Y. Improving drying efficiency and product quality of stevia rebaudiana leaves using innovative medium-and short-wave infrared drying (mswid). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2022. Vol. 81. <https://doi.org/103154.0.1016/j.ifset.2022.103154>
6. Kushniruk V., Novokhat O. Analysis of intensification of zeolite drying on a vibrating conveyor dryer with infrared emitters. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. 2 (1 (70)), P. 6–9. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.279032>
7. Novokhat O. A., Vozniuk V. T., Hritsiuk H. I., Lysii V. Determination of kinetic regularities of the process of drying perlite by radiation method. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8(1), P. C11–C17, [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(1\).c2](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(1).c2)
8. Marchevsky V., Novokhat O., & Margarian A. Analysis of the research results of the zeolite drying process. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. 1(3(45), P. 21–23. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.163361>
9. K. Sugimoto R. E. Dinnebier J. C. Hanson. Structures of three dehydration products of bischofite from in situ synchrotron powder diffraction data ($\text{MgCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; $n = 1, 2, 4$). *Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials*. 2007. B63, P. 235–242. <https://doi.org/10.1107/S0108768107002558>
10. Ping Li, Bingxin Liu, Xing Lai, Weihua Liu, Li Gao, Zhongfeng Tang. Thermal decomposition mechanism and pyrolysis products of waste bischofite calcined at high temperature. *Thermochimica Acta*. 2022. Vol. 710. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179164>
11. Jiaying Xu, Tingxian Li, Taisen Yan, Jingwei Chao, Ruzhu Wang. Dehydration kinetics and thermodynamics of magnesium chloride hexahydrate for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021. Vol. 219. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110819>
12. Xuyong Liu, Xiangmei Cui. Research Progress in Dehydration Technology of Bischofite for Preparing Anhydrous Magnesium Chloride. *Proceedings of the 2016 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE)*. 2016. Zhuhai, China. P. 261–267. <https://doi.org/10.2991/iccahe-16.2016.45>
13. Wu Yu-Long, Huang Xiao-Fang, Yang Ming-De, Zou Shu-Ping, Dang Jie, Hu Hu-Sheng. Study on the mechanisms and kinetics of complex's thermal decomposition getting anhydrous magnesium chloride. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008. Vol. 81. 133–135. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.05.004>
14. Галстян А. С., Марчевський В. М., Улітько Р. М. Кінетика сушіння кристалічного бішофіту. *Збірник наукових праць Одеської національної академії харчових технологій*. 2010. С. 113–116.
15. Holleman, A.F., Wiberg, E. Inorganic Chemistry. *Academic Press*. San Diego, 2001. ISBN 0-12-352651-5.
16. Jianxin Zhang, Arshe Said, Bing Han, Marjatta Louhi-Kultanen. Semi-batch evaporative crystallization and drying of cobalt sulphate hydrates. *Hydrometallurgy*. 2022. Vol. 208. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105821>

Стаття надійшла до редакції 23.02.2025 р.

**V. Marchevskyi, O. Novokhat, V. Filipov***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***KINETIC REGULARITIES OF BISCHOFITE DRYING BY INFRARED RADIATION*****Summary***

The drying process of bischofite is a crucial stage in its production but requires significant energy consumption. This study examines the kinetics of bischofite drying using infrared radiation under a low-temperature regime of up to 90 °C. The advantages and potential challenges of this method are discussed. The kinetic regularities of bischofite drying by infrared radiation are presented within a heat flux density range of 0,9–1,45 kW/m². The experimental setup is described in detail. The research results are provided in the form of graphical dependencies of bischofite moisture content, drying time, and drying rate. A mathematical equation is proposed to determine the drying constant within the specified heat flux density range. This approach allows for a preliminary assessment of the drying intensity of bischofite using an infrared emitter of choice.

Keywords: Bischofite, mineral, infrared drying, radiation drying, radiation, kinetics, dehydration, moisture content.