

Технічні науки

УДК 66.047.75

Марчевський Віктор Миколайович

кандидат технічних наук, професор кафедри МАХНВ

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Марчевский Виктор Николаевич

кандидат технических наук, профессор кафедры МАХНВ

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Marchevsky Victor

Philosophy Doctor of Technical Sciences, Professor

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID: 0000-0001-6530-0467

Новохат Олег Анатолійович

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри МАХНВ

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новохат Олег Анатолиевич

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры МАХНВ

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Novokhat Oleh

Philosophy Doctor of Technical Sciences, Senior Tutor

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID: 0000-0002-1198-6675

Маргарян Артем Арманович

магістрант

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Маргарян Артем Арманович

магістрант

Национального технического университета Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Margarian Artem

Master Student of the

National technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ORCID: 0000-0001-8138-9860

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЦЕОЛІТУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЦЕОЛИТА

MODELING OF ZEOLITE DRYING PROCESS

***Анотація.** Об'єктом дослідження є процес сушіння цеоліту. Обґрунтовано фізичну модель процесу сушіння цеоліту. Складено та розв'язано математичну модель процесу сушіння цеоліту. Для розв'язання використано методи математичного аналізу та програмне забезпечення MathCAD. Виконано експерименти з дослідження кінетичних закономірностей процесу сушіння цеоліту з метою підтвердження адекватності математичної моделі. В якості дослідних зразків використано сипучий цеоліт фракції 0–1 мм. Сушіння відбувалось за товщини шару цеоліту, рівній 5 мм. За джерело теплової енергії використано сушильну камеру потужністю 850 Вт. Встановлено кінетичні закономірності процесу сушіння цеоліту. Визначено чисельні*

значення часу сушіння цеоліту в різних періодах сушіння. Згідно аналізу результатів дослідження процесу сушіння цеоліту встановлено, що кінетичні закономірності цього процесу подібні процесу сушіння капілярно-пористих тіл. Тривалість періодів сушіння залежить від густини теплового потоку і зменшується зі збільшенням густини теплового потоку. Також визначений вплив параметрів процесу сушіння на вологовміст в кінці першого періоду. Температура цеоліту в першому періоді сушіння не є постійною, а збільшується. Це свідчить про надлишок теплової енергії, що подається в цей період. Проведено перевірку адекватності математичної моделі шляхом розрахунку критерію Фішера та встановлено, що повторюваність результатів розв'язку математичної моделі процесу сушіння цеоліту становить 97%. Це дозволить розробити алгоритм розрахунку промислових сушарок, а також зменшити енерговитрати та час виробництва цеоліту в цілому. Отримані криві сушіння цеоліту дають змогу прогнозувати характер протікання процесу.

Ключові слова: фізична модель, математична модель, процес сушіння цеоліту.

Анотація. Объектом исследования является процесс сушки цеолита. Обоснованно физическую модель процесса сушки цеолита. Составлена и решена математическая модель процесса сушки цеолита. Для решения использованы методы математического анализа и программное обеспечение MathCAD. Выполнены эксперименты по исследованию кинетических закономерностей процесса сушки цеолита с целью подтверждения адекватности математической модели. В качестве опытных образцов использовано сыпучий цеолит фракции 0-1 мм. Сушка происходила при толщине слоя цеолита, равной 5 мм. Источником тепловой энергии использовано сушильную камеру

мощностью 850 Вт. Установлено кинетические закономерности процесса сушки цеолита. Определены численные значения времени сушки цеолита в разных периодах сушки. Согласно анализу результатов исследования процесса сушки цеолита установлено, что кинетические закономерности этого процесса подобны процессу сушки капиллярно-пористых тел. Продолжительность периодов сушки зависит от плотности теплового потока и уменьшается с увеличением плотности теплового потока. Также определено влияние параметров процесса сушки на влагосодержание в конце первого периода. Температура цеолита в первом периоде сушки не является постоянной, а увеличивается. Это свидетельствует об избытке тепловой энергии, подаваемой в этот период. Проведена проверка адекватности математической модели путем расчета критерия Фишера и установлено, что повторяемость результатов решения математической модели процесса сушки цеолита составляет 97%. Это позволит разработать алгоритм расчета промышленных сушилок, а также уменьшить энергозатраты и время производства цеолита в целом. Полученные кривые сушки цеолита позволяют прогнозировать характер протекания процесса.

Ключевые слова: физическая модель, математическая модель, процесс сушки цеолита.

Summary. The object of research is the zeolite drying process. The physical model of the zeolite drying process is substantiated. A mathematical model of the zeolite drying process was compiled and solved. To solve the mathematical model were used methods of mathematical analysis and software MathCAD. An experiment to study the kinetic regularities of the process of drying the zeolite was performed in order to confirm the adequacy of the mathematical model. As prototypes used bulk zeolite fraction of 0-1 mm. Drying occurred at a thickness of 5 mm of the zeolite layer. According to the source of

thermal energy, a drying chamber of 850 W was used. The kinetic laws of the zeolite drying process have been established. The numerical values of the drying time of the zeolite in different periods of drying are determined. According to the analysis of the results of the study of the drying process of a zeolite, it was established that the kinetic regularities of this process are similar to the drying process of capillary-porous bodies. The duration of the drying periods depends on the heat flow density and decreases with increasing heat flow density. Also a certain influence of the drying process parameters on the moisture content at the end of the first period. The temperature of the zeolite in the first period of drying is not constant, but increases. This indicates an excess of thermal energy supplied during this period. The adequacy of the mathematical model was checked by calculating the Fisher criterion and the repeatability of the results was found; that the decoupling of the mathematical model of the zeolite drying process is 97%. It allows to develop an algorithm for calculating industrial dryers, generally reduce energy consumption and production time of the zeolite. The obtained curves of drying of the zeolite can predict the nature of the process.

Key words: *physical model, mathematical model, zeolite drying process.*

Постановка проблеми. Сушіння цеоліту є вкрай важливим, оскільки цеоліт – це матеріал, здатний поглинати як пари вологи, так і запахи, інертні гази, та інші речовини на рівні молекулярного сита. Визначальним процесом для отримання якісного природного цеоліту є процес сушіння, оскільки в природному стані він містить вологу. Завдяки цьому значно розширюється поле можливостей використання цеоліту в якості наповнювача паперу і картону. Тому дослідження сушіння цеоліту з метою отримання кінетичних закономірностей та основних параметрів процесу є актуальним.

Розвиток впровадження цеолітів йде швидкими темпами. Тому, для

забезпечення великого попиту на тару і упаковку з цеолітом, потрібне всебічне вдосконалення застарілого обладнання та розроблення нового. Процес сушіння цеоліту досить енергоємний. Нагрівання цеоліту здійснюють шляхом конвективного теплообміну у псевдозрідженому шарі, теплоносієм, нагрітим до високих температур. Наукові методи розрахунку процесу сушіння цеоліту в літературі висвітлено недостатньо. Тому дослідження кінетики сушіння цеоліту та створення обґрунтованої методики розрахунку процесу є задачами актуальними.

Моделювання процесу

Рушійною силою процесу сушіння в першому періоді є різниця між тиском насиченої водяної пари в пограничному шарі на поверхні цеоліту та парціальним тиском пари в навколишньому середовищі, а в другому періоді сушіння – різниця між величинами поточного та кінцевого рівноважного вологовмісту [1].

Під час сушіння випаровування вологи може відбуватися не тільки з поверхні цеоліту, а й з більш глибоких шарів (рис. 1). Частинку цеоліту прийнято вважати сферичною радіусом R з урахуванням коефіцієнту форми, оскільки кристали цеоліту мають форму тетраедра. Частинка знаходиться під дією теплового навантаження від сушильного агента (повітря) тепловим потоком q . При цьому частинку умовно поділено на нескінченно малі шари починаючи від зовнішньої поверхні до центру. Це дозволяє скористатись сферичними координатами в представленні задачі. Таким чином вологовміст u і час сушіння зростатиме від зовнішньої поверхні до центру, а температура t

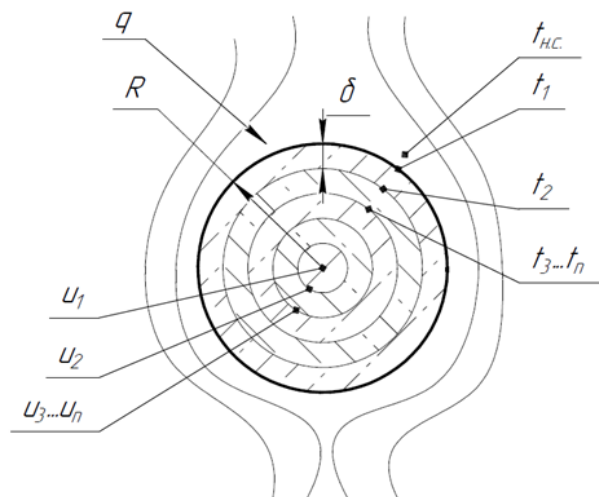


Рис. 1. Фізична модель процесу конвективного сушіння

навпаки спадатиме. Тому є доцільним дослідження процесу на зовнішній поверхні частинки – поверхні контакту фаз.

У цеоліті, як капілярно-пористому тілі, знаходиться вільна волога, волога в капілярах та адсорбційно зв’язана волога. У першому періоді сушіння випаровується вільна волога, а швидкість процесу обмежена інтенсивністю теплового потоку. У другому періоді сушіння швидкість спочатку обмежена дифузією вологи в зону випаровування (видалення вологи в капілярах), а під кінець сушіння лімітується руйнуванням адсорбційних зв’язків вологи з цеолітом та її випаровуванням.

До початку сушіння вологовміст та температура однакові по всьому радіусу цеоліту. Під час сушіння в поверхневих шарах, де найвища кількість поглинутої теплоти від нагрітого теплоносія, значення температури найбільше, а вологовміст найменший. Оскільки під час сушіння цеоліту тепловий потік зменшується по товщині частинки, то температура, відповідно, спадає, а вологовміст збільшується із рухом до центру частинки. В кінці сушіння вологовміст досягає рівноважного значення та вирівнюється [2].

Для того, щоб представити частинки у вигляді сферичних, потрібно враховувати характеристики дисперсних матеріалів. При розрахунку сушарок в режимі пневмотранспорту та зваженого стану дисперсного матеріалу, необхідно знати відносну швидкість висушуваного матеріалу та сушильного агенту. Визначальний вплив на цей параметр здійснюють такі характеристики дисперсних матеріалів, як розмір і форма частинок, розподілення їх за гранулометричним складом, густина та структура.

Оскільки форма кристалів цеоліту – тетраедр, то щоб перейти до сферичної форми, потрібно враховувати характеристики дисперсних матеріалів. При розрахунку сушарок в режимі пневмотранспорту та зваженого стану дисперсного матеріалу, необхідно знати відносну швидкість висушуваного матеріалу та сушильного агенту. Визначальний

вплив на цей параметр здійснюють такі характеристики дисперсних матеріалів, як розмір і форма частинок, розподілення їх за гранулометричним складом, густина та структура.

У зв'язку з тим, що кристали цеоліту мають форму тетраедра, щоб звести їх форму до сферичної необхідно прийняти коефіцієнт форми $k_\phi = 0,67$ [3].

На основі фізичної моделі можна скласти математичну модель. Технологічний режим, обладнання для конвективного сушіння та спрощення конфігурації частинок цеоліту дають можливість розглядати цей процес як одновимірний в радіальному напрямку сферичного тіла.

Математична модель даного процесу для сферичних частинок включає рівняння теплопровідності та кінетики сушіння [4]:

$$\begin{cases} c\rho_{\text{ц}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot k_\phi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right) - \rho_{\text{ц}} r \frac{\partial u}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = \beta F(p_{\text{н}} - p_{\text{п}}) + k(u - u_p) \end{cases}, \quad (1)$$

де c – приведена питома теплоємність вологого цеоліту, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; $\rho_{\text{ц}}$ – густина абсолютно сухого цеоліту, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – швидкість зміни температури, $\frac{\text{К}}{\text{с}}$; k_ϕ – коефіцієнт форми; λ – коефіцієнт теплопровідності цеоліту $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$; $\frac{\partial T}{\partial R}$ – градієнт температур, $\frac{\text{К}}{\text{м}}$; $\frac{\partial^2 T}{\partial R^2}$ – швидкість зміни градієнту температур $\frac{\text{К}}{\text{м}^2}$; r – питома теплота пароутворення, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ – швидкість сушіння цеоліту, с^{-1} ; β – коефіцієнт вологовіддачі, $\frac{1}{\text{м}^2\cdot\text{Па}\cdot\text{с}}$; F – поверхня контакту фаз, м^2 ; $p_{\text{н}}$ – тиск насичення на поверхні частинок цеоліту, Па; $p_{\text{п}}$ – парціальний тиск пари в теплоносії, Па; k – константа швидкості сушіння в другому періоді, с^{-1} , u – вологовміст цеоліту, $\text{кг}/\text{кг}$; u_p – рівноважний вологовміст, $\text{кг}/\text{кг}$.

Граничні умови процесу (третього роду):

$$-\alpha(T_{\text{н.с.}} - T_1) = \frac{\lambda_1}{\delta}(T_1 - T_2), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $T_{\text{н.с.}}$ – температура теплоносія, К; T_1 – температура зовнішньої поверхні цеоліту, К; λ_1 – коефіцієнт теплопровідності першого шару цеоліту, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; δ – товщина одного шару, м; T_2 – температура цеоліту на відстані δ від зовнішньої поверхні частинки цеоліту.

Початкові умови:

$$T = T_0; u = u_0; \tau = 0. \quad (3)$$

Співвідношення парціального тиску пари до тиску насичення дорівнює відносній вологості:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}. \quad (4)$$

Тоді парціальний тиск пари можна визначити завдяки співвідношенню:

$$p_{\text{п}} = \varphi \cdot p_{\text{н}}. \quad (5)$$

При цьому, використання системи рівнянь математичної моделі (1) для розрахунку промислових апаратів не може бути використано, якщо коефіцієнти переносу представлені у вигляді констант. Таким чином, щоб зробити коректним використання математичної моделі слід врахувати фактори, які впливають як на початкові дані, так і на коефіцієнти переносу.

Питома теплоємність волого матеріалу залежить як від температури, так і від вологовмісту, який змінюється з часом [5].

З використанням залежності питомої теплоємності води від температури, оскільки питома теплоємність цеоліту змінюється значно менше ніж у води [6], її можна прийняти постійною, можна розрахувати питому теплоємність вологого матеріалу в залежності від вологовмісту, який змінюється за часом, за формулою:

$$c(u(\tau)) = c_w(T) \frac{u(\tau)}{1+u(\tau)} + c_z \frac{1}{1+u(\tau)}, \quad (6)$$

де $c_w(T)$ – питома теплоємність води в залежності від температури

$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; $u(\tau)$ – вологовміст цеоліту в залежності від часу $\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$; c_z – питома теплоємність цеоліту $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

Коефіцієнт теплопровідності вологого цеоліту також залежить як від температури, так і від вологовмісту, що змінюється за часом [7].

Аналогічно до питомої теплоємності, коефіцієнт теплопровідності вологого цеоліту можна розрахувати за формулою:

$$\lambda(u(\tau)) = \lambda_w(T) \frac{u(\tau)}{1+u(\tau)} + \lambda_z \frac{1}{1+u(\tau)}, \quad (7)$$

де $\lambda_w(T)$ – коефіцієнт теплопровідності води в залежності від температури $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; λ_z – коефіцієнт теплопровідності цеоліту $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Також слід враховувати рівноважний вологовміст при сушінні (десорбції) в залежності від відносної вологості цеоліту [8]. За допомогою цієї залежності можна визначити рівноважний вологовміст в залежності від відносної вологості сушильного агенту.

Для розв'язання математичної моделі було використано метод сіток для знаходження функції температури від часу і радіусу (2 змінні), та метод скінченних різниць для знаходження функції вологовмісту за часом. Ці методи було реалізовано в MathCAD.

За отриманими даними побудовано графічні залежності вологовмісту цеоліту фракції до 1 мм від часу сушіння (рис. 2), а також температури

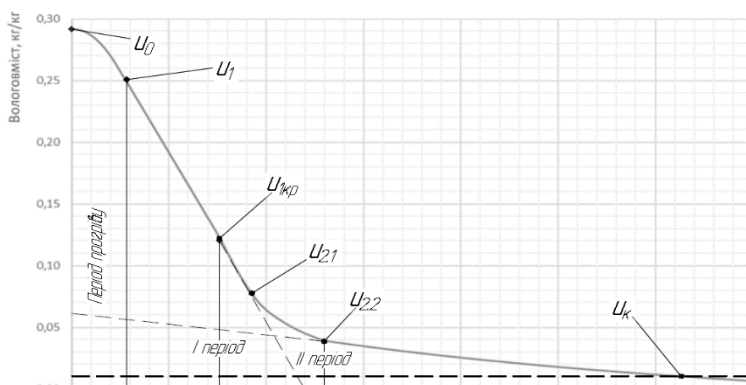


Рис. 2. Теоретична залежність вологовмісту від часу сушіння

зовнішньої поверхні частинок цеоліту (рис. 3).

Аналіз кривих на рисунках 2 та 3 показує, що розподілення періодів сушіння співпадає за часом. Для того, щоб коректно виконати

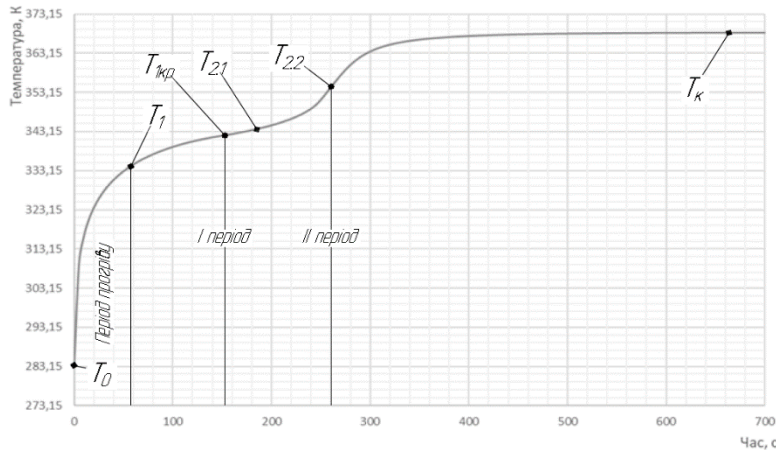


Рис. 3. Залежність температури зовнішньої поверхні цеоліту від часу сушіння

розв'язок математичної моделі, криву сушіння необхідно розділити, як кусково-задану функцію. При цьому, слід зауважити, що функції мають бути кусково-гладкими (диференційовними) та монотонними (приріст не змінює знаку). Для цього необхідно визначити характерні точки, в яких функція буде переходити з одного відрізка на інший. Таким чином можна буде програмно реалізувати умови переходу. Залежність вологовмісту (рис. 2) має характерні точки, які було визначено експериментально: u_0 – початкова точка прогріву; u_1 – початок 1-го періоду сушіння; $u_{1кр}$ – точка початку сповільнення швидкості сушіння (точка перегину); $u_{2.1}$ – умовно початок 2-го періоду сушіння; $u_{2.2}$ – точка закінчення сповільнення швидкості сушіння (точка перегину); u_k – точка кінцевого вологовмісту ($w = 1\%$, $u_k = 0,01 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$).

Цим точкам на рисунку відповідають аналогічні точки на температурній кривій (рис. 3).

На відрізку u_0u_1 функція змінюється як від'ємна парабола з вершиною в точці u_0 , та дотична в точці u_1 до прямої.

На відрізку $u_1u_{1кр}$ функція від'ємно лінійна та проходить через точки u_1 та $u_{1кр}$, завдяки чому можна визначити коефіцієнт β як тангенс кута нахилу прямої:

$$\beta = \frac{tg\alpha}{F(p_s - p_n)}; \quad (8)$$

$$tg\alpha = \frac{u_1 - u_{1кр}}{\tau_{1кр} - \tau_1}, \quad (9)$$

На цьому відрізку видаляється вільна волога з поверхні цеоліту, а швидкість процесу обмежена інтенсивністю теплового потоку.

На відрізку $u_{1кр} u_{2.2}$ функція додатньо параболічна, що проходить через точки $u_{1кр}$ і $u_{2.2}$ та має дотичні прямі з першого та другого періодів сушіння в цих точках відповідно. Цю зону можна назвати перехідною зоною з 1-го в 2-гий період сушіння. Точка $u_{2.1}$ знаходиться умовно на цьому проміжку.

Останній відрізок від точки $u_{2.2}$ до кінцевої u_k наближено представлений від'ємно лінійною функцією, коефіцієнт k якої знаходиться аналогічно 1-му періоду сушіння. На цьому відрізку видаляється адсорбційно зв'язана волога, та після точки u_k починає видалятися кристалогідратна волога.

На температурній кривій відрізок $T_0 T_{1кр}$ характеризується швидким ростом температури. На відрізку $T_{1кр} T_{1-2}$ швидкість росту температури відносно меншає, та на відрізку $T_{1-2} T_{2-1}$ ступінчато зростає, а на відрізку від точки T_{2-1} до T_k поступово зупиняє ріст.

Перевірка адекватності математичної моделі

Як видно на рисунках 4 та 5 експериментальні криві вологовмісту та

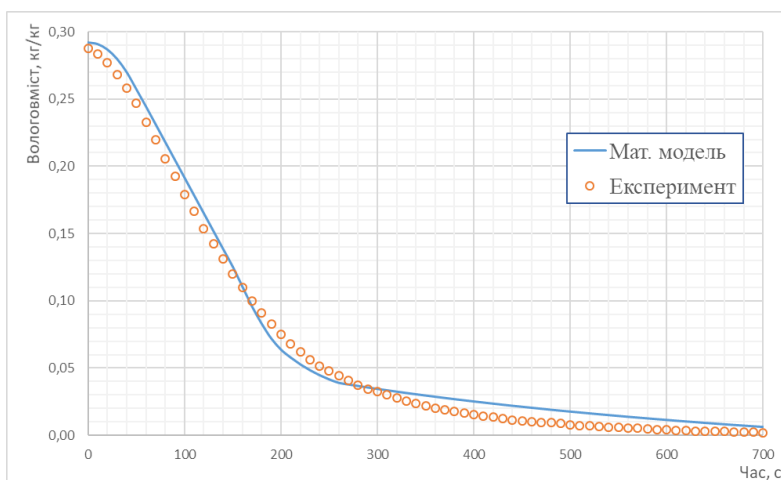


Рис. 4. Теоретична та експериментальна залежності вологовмісту від часу сушіння

температури зовнішньої поверхні цеоліту змінюються аналогічно розв'язку математичної моделі.

Перший період сушіння та період прогріву порівняно малі відносно другого періоду,

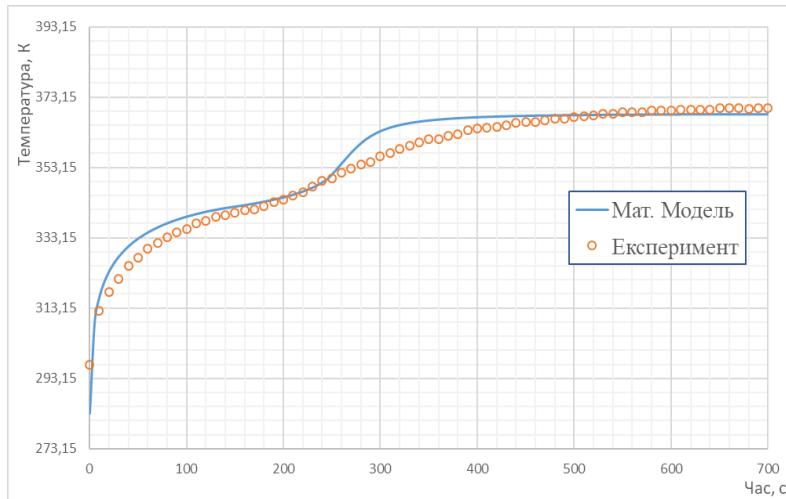


Рис. Теоретична та експериментальна залежності температури цеоліту від часу сушіння

із зовнішньою поверхнею цеоліту.

Також перевірено адекватність математичної моделі за допомогою критерію Фішера. Вірогідність повторюваності результатів математичної моделі становить 97%.

Висновки. Визначено кінетичні закономірності процесу сушіння цеоліту та перевірено адекватність математичної моделі за допомогою критерію Фішера із вірогідністю повторюваності 97%

Література

1. Лыков А.В., Теория сушки, М.: Энергия, 1968. 472 с., ил.
2. Karavatskii A., Marhesky V. and 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. Vol. 2. No. 5(86). Pp. 14-22.
3. Муштаев В.И., Ульянов В.М. и Тимонин А.С., Сушка в условиях пневмотранспорта, М.: Химия, 1984. – 232 с., ил.
4. Фролов В.Ф., Моделирование сушки дисперсных материалов, Л.: Химия, 1987. - 208 с., ил.

що пояснюється швидким видаленням поверхневої вологи в першому періоді сушіння, та повільною дифузією вологи в зону випаровування. При цьому зміна температури показує, що зона поверхні співпадає

5. Water - Heat Capacity (Specific Heat) // Engineering ToolBox, 2004.
URL: <https://www.engineeringtoolbox.com/>. [Дата звернення: 15 травня 2019].
6. Sondre Kvalvåg Schnell, Molecular Simulations of Zeolites: Heterogeneous Systems at Equilibrium and Non-Equilibrium, Kristiansund: CPI-Wöhrmann Print Service – Zutphen, 2013.
7. Chaplin Martin Explanation of the Thermodynamic Anomalies of Water.
URL: <http://www1.lsbu.ac.uk>. [Дата звернення: 15 травня 2019].
8. Hongyu Huang, Seiya Ito, Fujio Watanabe, Masanobu Hasatani and Noriyuki Kobayashi Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites. July 2011. URL: <https://www.researchgate.net/>. [Accessed 15 травня 2019].