

Бошков Л.З.

Одеський національний технологічний університет

Волгушева Н.В.

Одеський національний технологічний університет

Гречановський А.П.

Одеський національний технологічний університет

Гаранін Є.В.

Одеський національний технологічний університет

КОЕФІЦІЄНТИ ДИФУЗІЇ ТА ТЕРМОДИФУЗІЇ ВОЛОГИ В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ ЦЕОЛІТУ 13X

Робота присвячена визначенню коефіцієнтів перенесення теплоти та вологи у цеоліту 13X в вигляді щільного шару дисперсного матеріалу. Наголошується, що особливо важливим є доступність точних значень або надійних виразів для коефіцієнтів дифузії вологи в досліджуваних матеріалах. Відзначено, що оцінка феноменологічних параметрів, які включені в рівняння масо- та теплопередачі, є загальною проблемою інженерних задач в галузі теплоенергетики, вирішення якої необхідно для моделювання, проектування та оптимізації процесів сушіння. Доведено на підставі аналітичного огляду наукової літератури, що при аналізі зміни коефіцієнта дифузії слід враховувати пористість матеріалу внаслідок того, що розмір пор впливає на визначальний механізм дифузії вологи та відображається в значенні коефіцієнта дифузії (кнудсенівська дифузія, молекулярна дифузія). Проаналізовано залежність коефіцієнта дифузії вологи від вологовмісту, температури, розміру пор і визначального розміру частинок для різних дисперсних матеріалів. Наведено розрахункові формули для визначення коефіцієнтів дифузії вологи, відносного коефіцієнта термодифузії і вологопровідності, а також методика обробки експериментальних даних. Представлено зміну коефіцієнтів дифузії та термодифузії вологи для цеоліту 13X залежно від температури та вологовмісту в процесах кондуктивного та конвективного сушіння, що отримано на підставі експериментальних досліджень. Представлено залежність коефіцієнту дифузії вологи від температури при кондуктивному сушінні цеоліту 13X в графічному вигляді. Доведено, що коефіцієнт дифузії вологи практично не залежить від способу теплопідведення за умови, що температури незначно відрізняються. Показано, що у дослідженому діапазоні зміни параметрів відносний коефіцієнт термодифузії вологи залежить тільки від вологовмісту і температури. Визначено, що закономірності змін коефіцієнтів перенесення залежно від температури та вологовмісту для цеоліту 13X аналогічні літературним даним.

Ключові слова: сушіння, кондуктивне, конвективне, вологовміст, температура, дисперсний матеріал, експеримент.

Постановка проблеми. Оцінка феноменологічних параметрів, які з'являються в рівняннях масо- та теплопередачі та виразах швидкості на основі експериментальних даних, є загальною проблемою інженерних задач в галузі теплоенергетики [1]. Зокрема, для моделювання, імітації, проектування та оптимізації процесів сушіння особливо важливо, щоб були доступні точні значення або надійні вирази для коефіцієнтів дифузії вологи в досліджуваних твердих речовинах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежність коефіцієнта дифузії від вологи можна ввести, розглядаючи фактор Арреніуса або енер-

гію активації як функції вологовмісту [2]. Цей метод базується на узагальнених рішеннях задач масообміну і застосований для визначення коефіцієнтів дифузії вологи при сушінні.

Процеси масообміну зазвичай описуються рівняннями дифузії, феноменологічним параметром у цьому рівнянні є коефіцієнт масової дифузії [3].

У роботі [4, 5, 6] для дослідження було обрано ряд широко застосовуваних у промисловості дисперсних матеріалів. Це – абразивні шліф- та мікропорошки карбіду кремнію, карбіду бору, електрокорунд, зварювальні флюси, активоване вугілля, флюорит.

Похибка визначення коефіцієнтів перенесення залежить від вмісту води і температури зразка і становить 9-17% при визначенні a_m 2-4% при визначенні δ . Максимальні похибки відносяться до областей середньінтегральних температурах вище 70 °C і вологовмістах нижче 0,06 кг/кг [6]. Найбільший внесок у сумарну похибку вносять похибки визначення середньінтегрального вмісту води, швидкості сушіння і нагріву.

Залежності коефіцієнта дифузії води від середньінтегрального вологовмісту для порошків карбиду кремнію різних фракцій наведені в [6]. Коефіцієнт дифузії води зменшується зі зростанням вологовмісту (тобто зростає в процесі сушіння) особливо істотно при $u < 0,04$ кг/кг. При $\bar{u} = idem$ коефіцієнт дифузії тим вищий, чим більші частки. Як видно із рис. 1 одночасно з розміром частинок змінювалася і щільність шару, тобто його пористість. Спільне вплив цих чинників можна врахувати з допомогою еквівалентного

діаметра шару [6] $d_s = \frac{4\epsilon\bar{d}}{6(1-\epsilon)}$. Зі збільшенням еквівалентного діаметра шару коефіцієнти дифузії води різних абразивних порошків зростають тим помітніше, чим вища температура шару.

У дослідженій області зміни параметрів ефективний коефіцієнт дифузії води шару не залежить від способу підведення теплоти, початкового вмісту води, а є функцією тільки щільності шару, розміру частинок (ці фактори можуть бути враховані за допомогою еквівалентного діаметра) та середньінтегральної температури.

При аналізі зміни коефіцієнта дифузії також слід враховувати пористість матеріалу. У роботі [7] Дослідження вплив пористості пісковика на коефіцієнт дифузії води. Швидкість дифузії водяної пари, а також ізотерма сорбції пари були визначені для ряду типів пісковиків. Було встановлено, що коефіцієнт опору дифузії залежить від загальної пористості пісковика. В роботі отри-

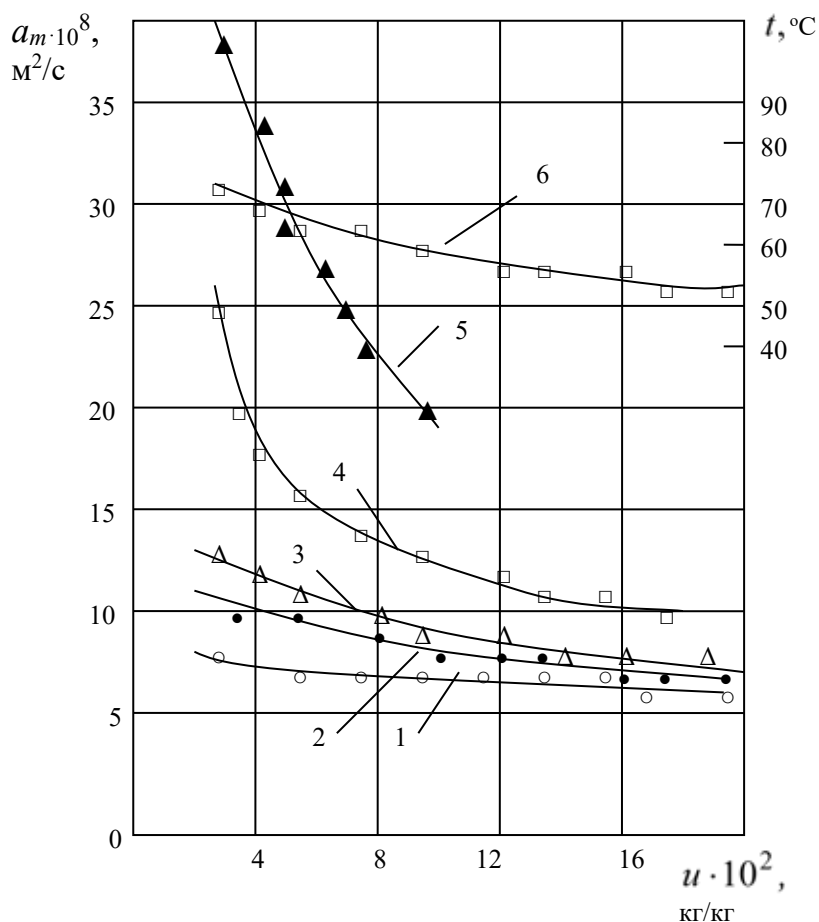


Рис. 1. Залежність ефективного коефіцієнта дифузії води від вологовмісту для порошків карбиду кремнію з різними розмірами частинок [6]

1 — $\bar{d} = 0,02$ мм, $\rho = 1350$ кг/м³; 2 — $\bar{d} = 0,05$ мм, $\rho = 1690$ кг/м³; 3 — $\bar{d} = 0,10$ мм, $\rho = 1550$ кг/м³; 4 — $\bar{d} = 0,63$ мм, $\rho = 1500$ кг/м³; 5 — $\bar{d} = 1,50$ мм, $\rho = 1040$ кг/м³; 6 — температура

мано, що для діапазону пористості від 8% до 29% залежність лінійна, значення коефіцієнту дифузії досягало $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

У [8] отримана залежність коефіцієнта дифузії водяної пари (при 25 °С) як функція середнього діаметра пор. Наведено, що для пор розміром від 10^{-8} до 10^{-7} м об'ємний коефіцієнт дифузії змінюється в діапазоні 9000-13000 мм²/год. Показано, що розмір пор впливає на визначальний механізм дифузії води, що відображається в значенні коефіцієнта дифузії: кнудсеновська диффузія, молекулярна диффузія і проміжний режим. Відзначено, що використання коефіцієнта дифузії Кнудсена, пов'язаного із середнім діаметром пор 10^{-8} м, не може пояснити значно нижчі макроскопічні коефіцієнти дифузії. Авторами [9] показано, що молекулярна адсорбція характерна для ширини пор приблизно 10^{-7} м.

У дослідженні [10] визначенні коефіцієнти дифузії видаленої води за допомогою конвекційного сушіння скибочок морквита досліджено похибку коефіцієнта дифузії на початку експерименту. Досліди проводили на скибочках моркви товщиною 15 мм в лабораторних умовах. Порівняно процеси сушіння за різними температурами сушіння з метою дослідження впливу температури на зміну коефіцієнта дифузії. Використовуючи експериментальні дані, розраховано теоретичний коефіцієнт дифузії ітераційними методами з малим часом висихання.

В роботі [11] було представлено методику визначення залежності ефективної вологопровідності від концентрації дифузанта в процесах масообміну та застосовано її для визначення під час сушіння ефективної вологопровідності гороху та її залежності від концентрації води.

Постановка завдання. Метою роботи є отримання відомостей про коефіцієнти переносу, які необхідні для аналізу процесу сушіння, а також при обробці розрахункових та дослідних даних у критеріальному вигляді. Для цього необхідно провести комплексні експериментальні дослідження кінетики сушіння, коефіцієнта дифузії та коефіцієнта термодифузії при кондуктивному та конвективному сушінні в щільному шарі цеоліту 13X, а також вивчити вплив на коефіцієнти вологоперенесення температури та вологовмісту в кінетичних режимах сушіння.

Виклад основного матеріалу. Визначення коефіцієнтів перенесення води в процесі сушіння

Із системи рівнянь [12] отримані залежності для коефіцієнтів дифузії води та відносного коефіцієнта термодифузії [4]:

$$a_m = \frac{l^2 \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I \Delta t_{II} - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \Delta t_{III} \right]}{K_m \bar{u}_{I,II} (\Delta t_{III} - \Delta t_{II})} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{K_m \bar{u}_{I,II} \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \right]}{K_{ni} \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \Delta t_{II} - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I \Delta t_{III} \right]} \quad (2)$$

У формулах (1, 2): $\bar{u}$, $\bar{t}$ – середні за висотою вологовміст і температура шару, Δt_i – характерний перепад температур, K_{ni} , K_{cmi} – безрозмірні коефіцієнти, l – Висота шару, I, II – номери парних дослідів. Коефіцієнт K_m залежить від закону розподілу вмісту води в шарі, K_{ni} , K_{cmi} – від розподілу температур та того, який перепад температур Δt_i обраний як характерний.

Процес сушіння розбивають на невеликі проміжки часу, протягом яких вологовміст змінюється незначно ($\Delta u \approx 0,005 \text{ кг/кг}$). За результатами вимірювань розраховують середні за висотою вологовміст і температуру шару, швидкості сушіння і нагріву, характерний перепад температур. Підставляючи ці величини, отримані при однакових поточних вологовмістах зразків в обох дослідів, у формули (1, 2), обчислюють a_m , δ , відносячи їх до значень $\bar{u}$, $\bar{t}$. Дані, отримані для різних проміжків часу, дозволяють визначити зміну коефіцієнтів перенесення в процесі сушіння, обумовлене зміною вологовмісту і температури шару.

Режимні умови парних дослідів слід вибирати так, щоб параметри, від яких суттєво залежать коефіцієнти перенесення, відрізнялися незначно. Для досліджених умов таким параметром є температура. Для обґрунтованого визначення K_m , K_{ni} необхідно в попередніх дослідів визначити поля потенціалів за різних режимних умов та способів теплопідведення.

За експериментальними значеннями a_m , δ , може бути розрахований коефіцієнт термодифузії води:

$$a_m^T = a_m \delta, \quad (3)$$

а за наявності відомостей про масомісткість – також коефіцієнт вологопровідності:

$$\lambda_m = \rho \cdot c_m a_m \quad (4)$$

Ефективні коефіцієнти враховують сумарне перенесення рідкої та пароподібної води. У зв'язку з тим, що в кінетичних режимах сушіння відбувається взаємопов'язана одночасна зміна вологовмісту і температури шару, доцільно розглядати їх спільний вплив на коефіцієнти пере-

носу. Результати досліджень показали, що початковий вміст води практично не впливає на a_m .

На рис. 2 представлена залежність $a_m = f_2(\bar{t})$ від температури при кондуктивному сушінні цеоліту 13X.

При $\bar{u} = idem$ коефіцієнт дифузії води тим більший, чим вище температура матеріалу. Отримано, що при $\bar{d} = idem$, $\rho = idem$ коефіцієнт дифузії залежить, головним чином, від температури.

При середньоінтегральних температурах шару нижче 70 °C переважним механізмом є капілярне перенесення рідкої води та зростання a_m з підвищенням температури пояснюється, переважно, зміною властивостей (коефіцієнта в'язкості, поверхневого натягу, крайового кута змочування) води, що знаходиться у межзерновом просторі. При температурах матеріалу вище 70 °C в області низьких вологовмістів домінуючим стає дифузійне перенесення пари, інтенсивність якого помітно підвищується зі зростанням температури. Вказані причини і зумовлюють різке зростання a_m при температурах вище 70 °C.

На рис. 3 представлено зміну відносного коефіцієнта термодифузії води шару цеоліту 13X в процесах сушіння при різних температурах і способах теплопідведення. Зі зменшенням вологовмісту δ спадає за законом, близьким до лінійного, і зі зменшенням температури помітно зростає. Про збільшення відносного коефіцієнта термодифузії при зниженні температури свід-

чать дані [6] для капілярно-пористих матеріалів. Такий характер залежності обумовлений зміною в'язкості та поверхневого натягу води при зміні температури. Вказані фактори особливо суттєво впливають на значення δ в області низьких температур і високих вологовмістів, коли переважає перенесення рідкої води.

При $\bar{u} < 0,04$ кг/кг, коли пародифузійне перенесення стає визначальним, вплив температури на δ незначно. Значення δ при кондуктивному теплопідведенні нижче, ніж конвективному, внаслідок вищих середньоінтегральних температур шару (рис. 3). Таким чином, у дослідженому діапазоні зміни параметрів відносний коефіцієнт термодифузії води залежить тільки від вологовмісту і температури.

Висновки. Коефіцієнти вологоперенесення істотно змінюються в кінетичних режимах сушіння. Закономірності їх змін в залежності від температури та вологовмісту для цеоліту 13X аналогічні літературним даним.

Дослідження зміни коефіцієнтів дифузії води цеоліту у процесах кондуктивного та конвективного сушіння при близьких середньоінтегральних температурах шару свідчить про практичну незалежність коефіцієнта дифузії води від способу теплопідведення за умови, що температури незначно відрізняються.

Дані по кінетиці процесу та коефіцієнтам теплоперенесення при кондуктивному сушінні

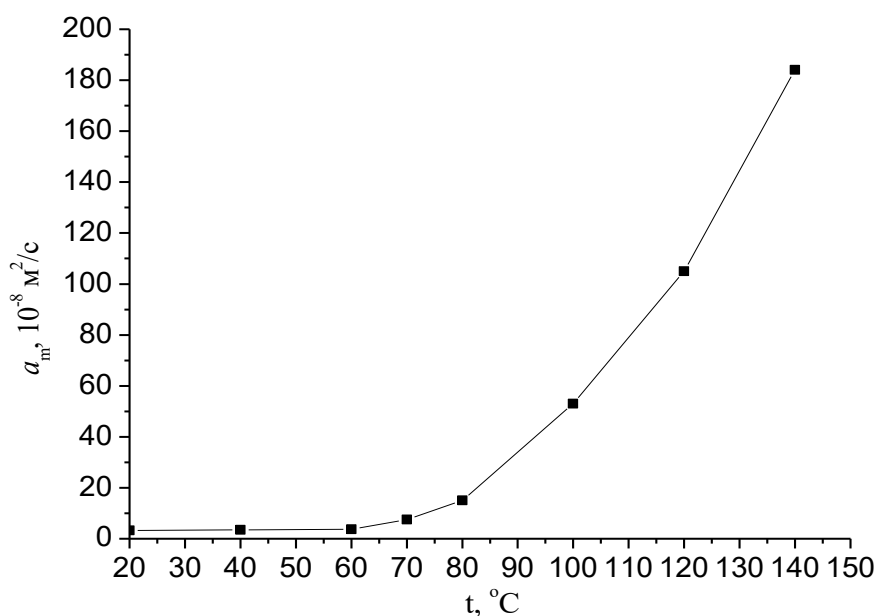


Рис. 2. Зміна ефективного коефіцієнта дифузії води цеоліту 13X у процесі сушіння $\rho = 682$ кг/м³, $d = 2,2$ мм

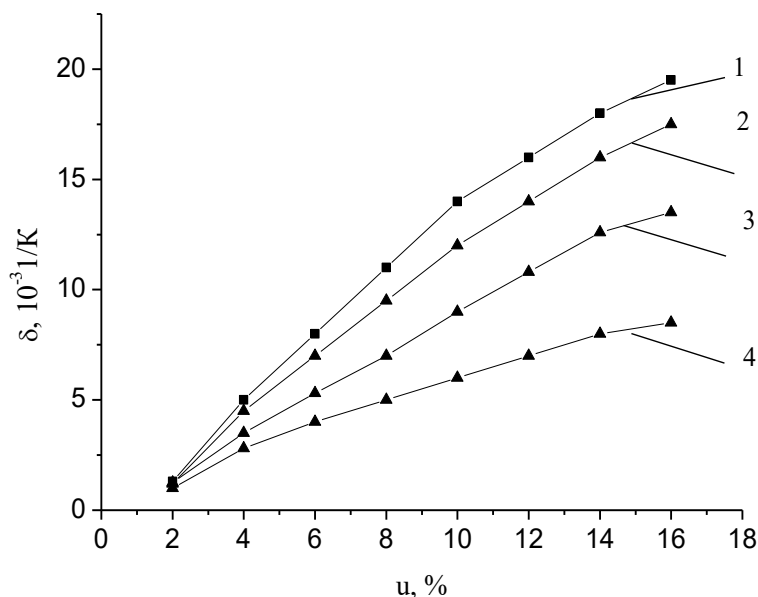


Рис. 3. Зміна відносного коефіцієнта термодифузії у процесі сушіння щільного шару цеоліту 13X. ($\rho = 682 \text{ кг/м}^3$, $d = 2,2 \text{ м}$). 1 – конвективне сушіння, $\bar{t} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; 2–4 – кондуктивне сушіння, 2 – $\bar{t} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $\bar{t} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $\bar{t} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

можуть бути використані при розрахунку поверхневих сушарок для дисперсних матеріалів, для контролю технологічних параметрів та при проектуванні нового або модернізації наяв-

ного обладнання. Відомості про коефіцієнти перенесення необхідні також при розрахунковому аналізі процесу сушіння, критеріальний обробці даних.

Список літератури:

1. Determination of diffusion and convective transfer coefficients in food drying revisited: A new methodological approach / F. J. Arranz et al. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 162. P. 30–39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.005>
2. Pathare P. B., Sharma G. P. Effective Moisture Diffusivity of Onion Slices undergoing Infrared Convective Drying. *Biosystems Engineering*. 2006. Vol. 93, no. 3. P. 285–291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.12.010>
3. Martínez Vera C., Vizcarra Mendoza M. G. Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 218. P. 256–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.016>
4. Рева Н.В Розробка методики та дослідження коефіцієнтів масо- та теплоперенесення капілярно-пористих матеріалів у процесі сушіння. Дис. канд. техн. наук, Одеса, 1982, 220с,
5. Ву З. Т. Тепловологотеренесення у дисперсних матеріалах при кондуктивному сушінні: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одеса, 1992. 17 с
6. Календер'ян, В.О., Бошкова І.Л. Тепломасоперенесення в апаратах із щільним шаром дисперсного матеріалу. – Київ: Слово, 2011. – 184 с
7. Water Vapor Diffusion and Adsorption of Sandstones: Influence of Rock Texture and Composition / M. Keppert et al. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 2016. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1155/2016/8039748>
8. Water Vapor Diffusion Properties of Obernkirchener Sandstone: Analysis of Dvs Data / C. Pichler et al. *SSRN Electronic Journal*. 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4103929>
9. Numerical analysis of moisture vapor diffusion in asphalt mixtures using digital images / E. Arambula et al. *Materials and Structures*. 2009. Vol. 43, no. 7. P. 897–911. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9554-3>
10. Aivars Aboltins1, Tatjana Rubina1 Egle Jotautiene Diffusion coefficient estimation difficulties at the beginning of drying experiment *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. – 2017. – 1327-1332

11. Martínez Vera C., Vizcarra Mendoza M. G. Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 218. P. 256–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.016>
12. Lykov AV Theory of heat and mass transfer. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1965. 558 p.

Boshkov L.Z., Volgusheva N.V., Hrechanovskyi A.P., Garanin Ye.V. COEFFICIENTS OF DIFFUSION AND THERMAL DIFFUSION OF MOISTURE IN A DENSE LAYER OF ZEOLITE 13X

The work is devoted to the determination of heat and moisture transfer coefficients in zeolite 13X in the form of a dense layer of dispersed material. It is emphasized that the availability of accurate values or reliable expressions for moisture diffusion coefficients in the materials under study is of particular importance. It is noted that the assessment of phenomenological parameters included in the mass and heat transfer equations is a general problem of engineering tasks in the field of heat and power engineering, the solution of which is necessary for modeling, designing and optimizing drying processes. It is proved on the basis of an analytical review of scientific literature that when analyzing the change in the diffusion coefficient, the porosity of the material should be taken into account due to the fact that the pore size affects the determining mechanism of moisture diffusion and is reflected in the value of the diffusion coefficient (Knudsen diffusion, molecular diffusion). The dependence of the moisture diffusion coefficient on moisture content, temperature, pore size and determining particle size for various dispersed materials is analyzed. Calculation formulas for determining the moisture diffusion coefficients, relative thermal diffusion coefficient and moisture conductivity, as well as the experimental data processing method are presented. The change in the moisture diffusion and thermal diffusion coefficients for zeolite 13X depending on temperature and moisture content in the processes of conductive and convective drying, which is obtained on the basis of experimental studies, is presented. The dependence of the moisture diffusion coefficient on temperature during conductive drying of zeolite 13X is presented graphically. It is proved that the moisture diffusion coefficient practically does not depend on the method of heat supply, provided that the temperatures differ slightly. It is shown that in the studied range of parameter changes, the relative thermal diffusion coefficient of moisture depends only on moisture content and temperature. It is determined that the patterns of changes in the transfer coefficients depending on temperature and moisture content for zeolite 13X are similar to the literature data.

Key words: drying, conductive, convective, moisture content, temperature, dispersed material, experiment.