

## Вплив дисперсії розмірів пор на початковий етап процесу осушення пористих тіл

Ярослав Бурак<sup>1</sup>, Богдана Гайвась<sup>2</sup>, Василь Кондрат<sup>3</sup>

<sup>1</sup> д. ф.-м. н., чл.-кор. НАНУ, професор, Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудасва, 15, Львів, 79005, e-mail: burak@cmm.lviv.ua

<sup>2</sup> к. ф.-м. н., с. н. с., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудасва, 15, Львів, 79005

<sup>3</sup> д. ф.-м. н., с. н. с., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудасва, 15, Львів, 79005, e-mail: kon@cmm.lviv.ua

*Сформульовано повну систему співвідношень для опису початкового етапу процесу осушення пористого пружного шару із врахуванням дисперсії розмірів пор та їхньої зв'язаності. Масоперенесення у зовнішньому середовищі описується з використанням моделі дифузного пограничного шару. Побудовано і кількісно проаналізовано розв'язок задачі про початковий етап осушення, коли формується двофазна зона. Встановлено, зокрема, що дисперсія розмірів пор, з якою пов'язане виникнення двофазної зони (рідина-газ), може суттєво впливати на перебіг процесу осушення. Визначено область значень структурних та кінетичних характеристик пористого тіла (розмірів пор, дисперсії, коефіцієнта проникності), для яких необхідно враховувати вплив дисперсії розмірів пор на процес осушення.*

**Ключові слова:** осушення, пористе тіло, дисперсія розмірів пор.

**Вступ.** Характерною особливістю структури пористих тіл є дисперсія розмірів пор. У роботах [1, 2] запропоновано підхід до врахування ефектів впливу дисперсії при описі процесу осушування. Однак у цих роботах не аналізувався початковий етап осушування, при якому відсутня зона осушених пор (газова зона) [1], також не проводився аналіз залежності характеристик двофазної зони [2], яка зумовлена дисперсією розмірів пор, від параметра дисперсії.

Метою цієї роботи є формулювання й аналіз математичної моделі початкового етапу природнього осушування насиченого рідиною пористого шару з урахуванням дисперсії розмірів пор.

### 1. Постановка задачі

Розглянемо віднесений до декартової системи координат  $(x, y, z)$  насичений водою пористий безмежний шар, який займає область  $-L_0 < y < L_0$ . Радіус  $\rho$  пор є випадковою величиною зі щільністю розподілу ймовірностей  $\phi(\rho)$ . Усі можливі радіуси пор належать проміжку  $[\rho_{\min}, \rho_{\max}]$ , де  $\rho_{\min}$  значно більше за середню довжину вільного пробігу молекул газу, так що кнудсенівської дифузії [1] не виникає. На поверхнях  $y = -L_0$ ,  $y = L_0$  шар контактує з газовим середовищем, яке

є сумішшю повітря і ненасиченої водяної пари, при цьому фізичні умови контакту ідентичні для обох поверхонь. Тому процес осушування є симетричним відносно серединної поверхні шару.

У зв'язку з ненасиченістю пари в довколишньому газі, відбувається випаровування рідини з пор. При цьому спочатку осушуються пори найбільшого радіуса; наповнення водою дрібних пор, внаслідок різниці капілярного тиску в порах різного радіуса і їх сполученості, не буде змінюватися за рахунок підсмоктування її з ширших пор. В околі поверхонь пористого тіла виникає двофазна зона, в якій пори малого радіуса заповнені водою, а великого радіуса — частково або повністю газом. Двофазна область з часом буде поширюватися в глибину тіла до моменту, коли потік рідини підсмоктування зрівняється з потоком пари внаслідок осушення. Швидкість осушення при цьому є практично постійною. Надалі в околі поверхонь шару будуть утворюватися зони осушених пор (газові зони), які створюють додатковий опір руху пари назовні, що призводить до зменшення швидкості осушення. Як було сказано вище, обмежимося дослідженням першого етапу осушування, пов'язаного з формуванням двофазної зони.

**1.1. Масоперенесення у довколишньому газі.** Оскільки умови осушення шару є симетричними відносно поверхні  $y = 0$ , то надалі процеси масоперенесення будемо аналізувати в області  $y > 0$ . Для опису перенесення маси в пограничному шарі використаємо модель пограничного (дифузного) шару [1], який займає область  $(L_0, L_0 + \delta)$ , де  $\delta$  — товщина дифузного шару. Перенесення пари та повітря в дифузному шарі будемо описувати рівняннями Стефана-Максвела [1]

$$-\gamma_{ae}v + D_1 \frac{d\gamma_{ae}}{dy} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dy} \left( -\gamma_{ve}v + D_1 \frac{d\gamma_{ve}}{dy} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\left( \frac{\gamma_{ae}}{M_a} + \frac{\gamma_{ve}}{M_v} \right) RT = P_g = const. \quad (3)$$

Тут  $M_a, M_v$  — молекулярні маси повітря та пари;  $R, T$  — газова стала та абсолютна температура;  $P_g$  — тиск газу в пограничному шарі;  $\gamma_{ae}, \gamma_{ve}$  — густини повітря та пари;  $D_1$  — коефіцієнт бінарної дифузії;  $v$  — середньомасова швидкість газової суміші. Відзначимо, що рівняння (1) є умовою рівності нулеві потоку повітря  $j_{ae} = \gamma_{ae}v - D_1 \frac{d\gamma_{ae}}{dy}$  у дифузному шарі. Рівняння (2) відповідає умові

сталості потоку пари  $j_{ve} \equiv j = \gamma_{ve}v - D_1 \frac{d\gamma_{ve}}{dy}$ .

Прийmemo надалі, що на зовнішній границі дифузного шару  $y = L_0 + \delta$  густини  $\gamma_{ve}$  пари і  $\gamma_{ae}$  повітря відповідають характеристикам зовнішнього середовища  $\gamma_{v1}, \gamma_{a1}$  [1, 2]

$$\gamma_{ve} = \gamma_{v1}, \gamma_{ae} = \gamma_{a1} \quad \text{при} \quad y = L_0 + \delta. \quad (4)$$

На поверхні  $y = L_0$  шару пара є насиченою, і її густина дорівнює густині  $\gamma_{n1}$  насиченої пари

$$\gamma_v = \gamma_{n1} \quad \text{при} \quad y = L_0. \quad (5)$$

**1.2. Перенесення у двофазній зоні.** При моделюванні перенесення у двофазній зоні приймаємо, що рух вологи викликаний дифузійним та конвективним потоками пари і потоком рідини, який зумовлений градієнтом капілярного тиску. Тут, як і раніше, знехтуємо сумарним потоком повітря в цій зоні. Тоді рівняння перенесення в двофазній зоні набувають вигляду [2]

$$\gamma_a \frac{K_g}{\mu_g} \frac{dP}{dy} + D \frac{d\gamma_a}{dy} = 0, \quad (6)$$

$$j = -\gamma_{n1} \frac{K_g}{\mu_g} g_g \frac{dP}{dy} - D(\gamma_{n1} - \gamma_n) P_k^{-1} g_g \frac{dP_k}{dy} - \gamma_L \frac{K_L}{\mu_L} g_L \frac{d(P - P_k)}{dy}, \quad (7)$$

де  $K_g(\rho)$ ,  $K_L(\rho)$  — коефіцієнти проникливості відносно газу та рідини в двофазній зоні;  $\mu_L, \mu_g$  — коефіцієнти в'язкості рідини та газу;  $P_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho}$ ,  $\theta$  — кут змочування,  $\rho$  — радіус капілярів,  $\sigma$  — поверхневий натяг рідини. Функції  $g_L(y)$ ,  $g_g(y)$  визначають відповідно відносну долю насичених рідиною та газом пор у перерізі  $y = const$  і записуються через щільність розподілу  $\varphi(\rho)$

$$g_L(y) = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_f(y)} \varphi(\rho) d\rho, \quad g_g(y) = 1 - g_L(y) = \int_{\rho_f(y)}^{\rho_{\max}} \varphi(\rho) d\rho. \quad (8)$$

Тут  $\rho_f$  — радіус пори, в якій проходить границя розділу рідина-газ у перерізі за координатою  $y$  ( $\rho_{\min} < \rho_f < \rho_{\max}$ ). Відзначимо, що вирази (8) можна записати так

$$g_L(\rho) = \int_{\rho_{\min}}^{\rho} \varphi(\rho) d\rho, \quad g_g(\rho) = 1 - g_L(\rho) = \int_{\rho}^{\rho_{\max}} \varphi(\rho) d\rho.$$

Тоді  $g_L(\rho)$ ,  $g_g(\rho)$  визначають відповідно відносну долю насичених рідиною і газом пор радіуса  $\rho$ .

Коефіцієнти проникності відносно газу  $K_g$  та рідини  $K_L$  у перерізі  $y = const$  визначимо так [2]

$$K_L(y) = \frac{k_{L0}}{\rho^2} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_f(y)} \varphi(\rho) \rho^2 d\rho, \quad K_g(y) = \frac{k_{g0}}{\rho^2} \int_{\rho_f(y)}^{\rho_{\max}} \varphi(\rho) \rho^2 d\rho. \quad (9)$$

У виразі (9)  $k_{L0}$ ,  $k_{g0}$  — коефіцієнти фільтрації рідини та газу в двофазній зоні, а  $\overline{\rho^2} = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \varphi(\rho) \rho^2 d\rho$ .

Як показує кількісна оцінка, для макрокапілярів  $\frac{\gamma_L \mu_g}{\gamma_g \mu_L} \gg 1$  та  $\gamma_n \approx \gamma_{n1}$ ,

тому складова  $\gamma_L \frac{K_L}{\mu_L} g_L \frac{dP_k(y)}{dy}$  визначає перенесення в шарі  $(L_0, L_{\min})$ , де  $L_0 - L_{\min}$  — ширина двофазної зони в пористому шарі. Таким чином, задача масоперенесення в двофазній зоні  $(L_0, L_{\min})$  зводиться до наступної крайової задачі

$$\gamma_L \frac{K_L}{\mu_L} g_L \frac{dP_k}{dy} = j \quad (10)$$

за умови

$$\rho_f(L_0) = \rho_{\min}. \quad (11)$$

## 2. Розв'язування задачі

**2.1. Пограничний шар.** Розв'язок рівняння (1) перенесення повітря в пограничному шарі має вигляд

$$\gamma_{ae}(y) = C e^{\frac{v}{D_1} y}. \quad (12)$$

Константа інтегрування  $C$ , визначена з граничної умови (4), є

$$C = \gamma_{a1} e^{-\frac{v}{D_1}(L_0 + \delta)}, \quad (13)$$

так що вираз (12) для густини повітря в області  $y \in (L_0, L_0 + \delta)$  можна записати

$$\gamma_{ae} = \gamma_{a1} e^{-\frac{v}{D_1}(L_0 + \delta - y)}. \quad (14)$$

З умови (3) сталості тиску  $P_g$  довоколишнього газу отримуємо

$$\gamma_{ve} = -\frac{M_v}{M_a} \gamma_{ae} + C_1, \quad (15)$$

де константа  $C_1$ , визначена згідно (4), має наступний вигляд

$$C_1 = \gamma_{v1} + \frac{M_v}{M_a} \gamma_{a1} = \frac{M_v}{RT} P_g. \quad (16)$$

Вираз (15) для густини пари при цьому запишемо так

$$\gamma_{ve} = -\frac{M_v}{M_a} \gamma_{a1} e^{-\frac{v}{D_1}(L_0+\delta-y)} + \frac{M_v}{RT} P_g. \quad (17)$$

Для визначення середньомасової швидкості  $v$  газу використаємо умову (5), яку, відповідно до виразу (17), запишемо так

$$\gamma_n = \frac{M_v}{M_a} \gamma_{a1} \left( 1 - e^{-\frac{v}{D_1} \delta} \right) + \gamma_{v1}.$$

Звідси

$$v = -\frac{D_1}{\delta} \ln \left( 1 - \frac{\gamma_n - \gamma_{v1}}{\gamma_{a1}} \frac{M_a}{M_v} \right) = -\frac{D_1}{\delta} \ln \left( \frac{P_g - P_n}{P_{a1}} \right), \quad (18)$$

де  $P_{a1} = \gamma_{a1} RT / M_a$ ,  $P_n = \gamma_n RT / M_v$ .

Вираз (17) для густини пари в дифузному шарі тепер подамо так

$$\gamma_{ve} = -\frac{M_v}{M_a} \gamma_{a1} \left( \frac{P_g - P_n}{P_{a1}} \right)^{\frac{1}{\delta}(L_0+\delta-y)} + \frac{M_v}{RT} P_g. \quad (19)$$

Враховуючи, що

$$\frac{d\gamma_{ve}}{dy} = -\frac{M_v}{M_a} \gamma_{a1} \left( \frac{P_g - P_n}{P_{a1}} \right)^{\frac{1}{\delta}(L_0+\delta-y)} \ln \left( \frac{P_g - P_n}{P_{a1}} \right),$$

для визначення конвективно-дифузійного потоку пари  $j$  отримаємо формулу

$$j = -\frac{M_v}{RT} P_g \frac{D_1}{\delta} \ln \frac{P_g - P_n}{P_{a1}}. \quad (20)$$

**2.2. Двофазна зона.** Підставимо одержаний вираз (20) для потоку  $j$  у співвідношення (10)

$$\frac{2\sigma\gamma_L K_L(\rho)g_L(\rho)}{j\mu_L\rho^2}d\rho = -dy. \quad (21)$$

Інтегруючи це рівняння, отримаємо таку формулу для ширини двофазної зони

$$\Delta L = L_0 - L_{\min} = \frac{2\sigma\gamma_L}{\mu_L j} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \frac{g_L(\rho)}{\rho^2} K_L(\rho) d\rho, \quad (22)$$

де через  $L_{\min}$  позначено координату внутрішньої межі між двофазною зоною і областю насичених рідиною пор.

Для прикладу розглянемо рівномірний за радіусом розподіл пор. При цьому щільність розподілу ймовірностей  $\varphi(x)$  є сталою величиною і дорівнює  $\varphi(\rho) = (\rho_{\max} - \rho_{\min})^{-1}$ . Доля насичених рідиною пор тепер визначається виразом  $g_L(\rho_f) = \frac{\rho_f - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}}$ , а проникливість пор відносно рідини —  $K_L(\rho_f) = \frac{(\rho_f)^3 - \rho_{\min}^3}{\rho_{\max}^3 - \rho_{\min}^3}$ . Тоді рівняння перенесення (10) та гранична умова (11) набудуть вигляду

$$\frac{\gamma_L}{\mu_L L_0} k_{L0} \frac{1}{3} \frac{[(\rho_f(\kappa))^3 - \rho_{\min}^3] (\rho_f(\kappa) - \rho_{\min})}{(\rho_{\max} - \rho_{\min})^2 (\rho_{\max}^2 + \rho_{\max}\rho_{\min} + \rho_{\min}^2)} \frac{\partial}{\partial \kappa} \left( \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho_f(\kappa)} \right) = j, \quad (23)$$

$$\rho_f(1) = \rho_{\min},$$

де  $\kappa = y / L_0$ .

Розв'язок даної задачі дає залежність між радіусом капілярів і координатою розташування меніска для кожного з них. Введемо заміну змінних

$z_f = \frac{\rho_{\min}}{\rho_f(\kappa)}$ . Тоді задачу (23) можна записати так

$$\left( \frac{1}{z_f^4} - \frac{1}{z_f^3} - \frac{1}{z_f} + 1 \right) \frac{\partial z_f}{\partial \kappa} = \tilde{A}_1, \quad z_f(1) = 1.$$

Тут

$$\tilde{A}_1 = \frac{j}{\rho_{\min}^3 \tilde{A}}, \quad \tilde{A} = \frac{\gamma_L}{\mu_L L_0} k_{L0} \frac{1}{3} \frac{2\sigma \cos \theta}{(\rho_{\max} - \rho_{\min})^2 (\rho_{\max}^2 + \rho_{\max}\rho_{\min} + \rho_{\min}^2)}. \quad (24)$$

Розв'язок цієї задачі запишемо у вигляді

$$\kappa = 1 - \frac{2 + 7z_f^3 - 6z_f^4 + 6z_f^3 \ln z_f - 3z_f}{6\tilde{A}_1 z_f^3}.$$

Використовуючи співвідношення (24), цей вираз можна перетворити до наступного вигляду

$$\kappa = 1 - \frac{Bk_{L0}}{18} \frac{z^3}{z_f^3 L_0 \rho_{\max}} \frac{2 + 7z_f^3 - 6z_f^4 + 6z_f^3 \ln z_f - 3z_f}{(1-z)(1-z^3)}, \quad (25)$$

де  $z = \rho_{\min} / \rho_{\max}$ ,  $B = 2\sigma\gamma_L / \mu_L j$ .

Якщо покласти  $z_f = z$  у формулі (25), то отримаємо вираз координати межі двофазна зона – насичена рідиною зона  $\kappa = \kappa_{\min}$

$$\kappa_{\min} = 1 - \frac{Bk_{L0}}{18} \frac{1}{L_0 \rho_{\max}} \frac{2 + 7z^3 - 6z^4 + 6z^3 \ln z - 3z}{(1-z)(1-z^3)}. \quad (26)$$

Перетворимо тепер співвідношення (22) для ширини двофазної зони. Інтеграл у правій частині цього виразу можна подати

$$\int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \frac{g_L(\rho)}{\rho^2} K_L(\rho) d\rho = \frac{k_{L0}}{\rho_{\max}^4 (1-z)(1-z^3)} \left[ \rho_{\max}^3 \frac{(1-z^3)}{3} - \rho_{\min} \rho_{\max}^2 \frac{(1-z^2)}{2} \right] + \frac{k_{L0}}{\rho_{\max}^4 (1-z)(1-z^3)} \left[ -\rho_{\min}^3 \ln \frac{1}{z} + \rho_{\min}^3 (1-z) \right].$$

Використовуючи отримане співвідношення, вираз (22) тепер запишемо

$$\Delta L = L_0 - L_{\min} = \frac{Bk_{L0}}{\rho_{\max}} \left[ \frac{1}{3(1-z)} - \frac{z(1+z)}{2(1-z^3)} + \frac{z^3}{(1-z)(1-z^3)} \ln z + \frac{z^3}{(1-z^3)} \right]. \quad (27)$$

У безрозмірній формі формула для знаходження ширини двофазної зони  $\Delta\kappa = \Delta L / L_0$  є такою

$$\Delta\kappa = 1 - \kappa_{\min} = \frac{Bk_{L0}}{L_0 \rho_{\max}} \left[ \frac{1}{3(1-z)} - \frac{z(1+z)}{2(1-z^3)} + \frac{z^3}{(1-z)(1-z^3)} \ln z + \frac{z^3}{(1-z^3)} \right]. \quad (28)$$

Якщо позначити вираз у квадратних дужках у правій частині (28) через  $f(z)$ , то для області  $0 < z \leq 1$   $0 \leq f(z) \leq \frac{1}{3}$ . Рівність  $f(1) = 0$  вказує на те, що при

рівності мінімального та максимального радіусів двофазна зона вироджується в поверхню. Постановка та розв'язок відповідної задачі осушення одержані раніше [5].

Отже, співвідношення (27) або (28) дають змогу визначити для прийнятого наближення залежність ширини двофазної зони від тиску атмосферного повітря, коефіцієнта дифузії, густини насиченої пари та в'язкості рідини при заданих температурі, відношенні мінімального і максимального радіусів пор, проникливості матеріалу відносно рідини на початковому етапі сушки. З використанням формули (28) подамо, зокрема, значення  $k_{L0}^*$ , при якому двофазна зона займає всю ширину пористого шару,

$$k_{L0}^* = \frac{L_0 \rho_{\max}}{B \left[ \frac{1}{3(1-z)} - z \frac{(1+z)}{2(1-z^3)} + \frac{z^3}{(1-z)(1-z^3)} \ln z + \frac{z^3}{(1-z^3)} \right]}.$$

При  $k_{L0} < k_{L0}^*$  ширина двофазної зони буде меншою від ширини пористого шару. В цьому випадку, після її формування, в околі поверхонь шару утворюються зони осушених пор (газові зони), які з часом розширюються, а двофазні зони переміщуються до серединної поверхні шару. Інакше процес осушення буде проходити при  $k_{L0} > k_{L0}^*$ . У цьому випадку газові зони виникають тільки після часткового осушення двофазної зони, бо лише тоді потік пари з шару зрівняється з потоком води підживлення вузьких пор. Це необхідно враховувати при моделюванні подальшого перебігу процесу осушення.

**2.3. Кількісний аналіз.** Проводилися кількісні дослідження ширини двофазної зони залежно від значення максимального розміру пор  $\rho_{\max}$ , відношення мінімального та максимального радіусів  $z = \rho_{\min} / \rho_{\max}$ , ширини дифузного шару  $\delta$  для  $L_0 = 0,5$  м;  $P_g = 10^5$  Па;  $D_1 = 2,915 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек,  $\gamma_a = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>,  $P_n = 0,0203$  кГ/см<sup>2</sup>,  $T = 300^\circ$  К,  $\sigma = 72,8 \cdot 10^{-3}$  Н/м,  $\eta_0 = 0,8$ . При цьому параметр  $k_{L0}$  коефіцієнта проникливості  $K_L$  записано у вигляді  $k_{L0} = k_{00} \cdot 10^{-(8+n)}$ , де  $k_{00} = 1$ ,  $n = 4, 5, 6, 7, 8$ . На рис. 1 подано залежність безрозмірної ширини двофазної зони від параметра  $z$  для товщини пограничного шару  $\delta = 2 \cdot 10^{-5}$  м (пунктирні криві),  $\delta = 10^{-5}$  м (суцільні криві),  $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$  м (штрихові криві) при  $\rho_{\max} = 10^{-5}$  м, та  $k_{L0} = 10^{-12}$  м<sup>2</sup> (жирні лінії),  $k_{L0} = 10^{-13}$  м<sup>2</sup> (тонкі лінії). Бачимо, що ширина двофазної зони зростає зі зменшенням  $z$ , що відповідає зменшенню середнього розміру пор та збільшенню дисперсії їхнього розподілу. Більша ширина



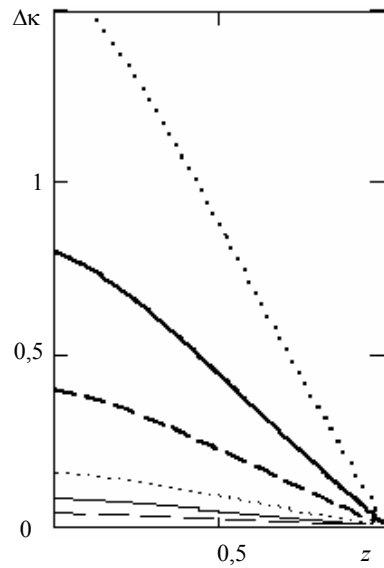


Рис. 1. Вплив дисперсії розмірів пор на ширину двофазної зони

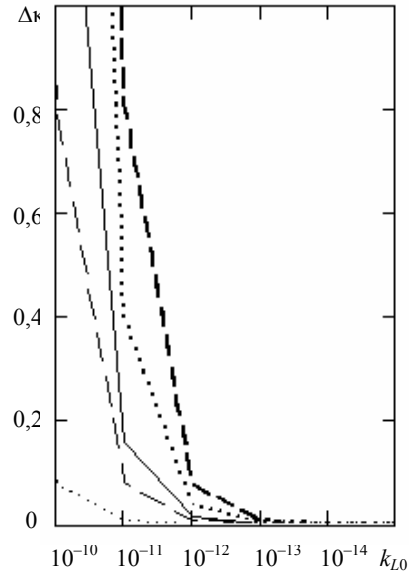


Рис. 2. Залежність ширини двофазної зони від коефіцієнта проникливості для різних  $z$

двофазної зони відповідає також більшому коефіцієнту проникності середовища та більшій ширині пограничного шару, який створює певний опір випаровуванню. Це ілюструють також графіки, подані на рис. 2, де показано залежність ширини двофазної зони від коефіцієнта проникливості при  $\rho_{\max} = 10^{-4}$  м,  $z = 5 \cdot 10^{-4}$  (суцільна жирна лінія),  $z = 0,9$  (штрихова жирна лінія),  $z = 0,95$  (пунктирна жирна крива),  $z = 0,98$  (суцільна тонка лінія),  $z = 0,99$  (штрихова тонка лінія),  $z = 0,999$  (пунктирна тонка лінія). Бачимо, що при  $k_0 > 10^{-14}$  м<sup>2</sup> двофазна зона може зайняти всю область пористого шару.

На рис. 3, 4 показана залежність ширини двофазної зони від коефіцієнта проникності тіла для дрібнопористого ( $\rho_{\max} = 10^{-5}$  м, рис. 3) та крупнопористого ( $\rho_{\max} = 10^{-4}$  м, рис. 4) матеріалів та товщин пограничного шару  $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  м (суцільна крива),  $\delta = 3 \cdot 10^{-5}$  м (пунктирна крива),  $\delta = 10^{-5}$  м (штрихова крива). При цьому взято  $z = 10^{-3}$ . Бачимо, що більш крупнопористим матеріалам, для яких максимальні (а також і середні) радіуси  $\rho_{\max}$  пор більші, відповідають менші ширини двофазної зони. У разі малої товщини двофазної зони, набагато меншої від товщини пористого шару, коли маса вологи у цій зоні нехтовно мала порівняно з масою всієї вологи, можна знехтувати першим етапом осушення і

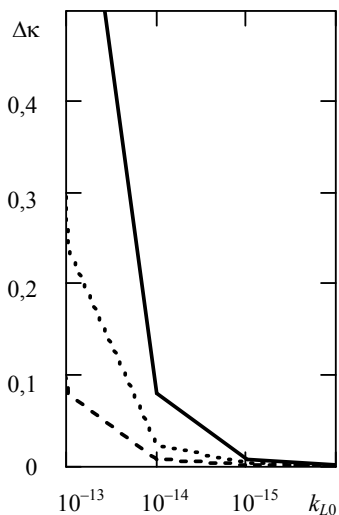


Рис. 3. Залежність ширини двофазної зони від коефіцієнта проникливості при максимальному радіусі  $\rho_{\max} = 10^{-5}$  м

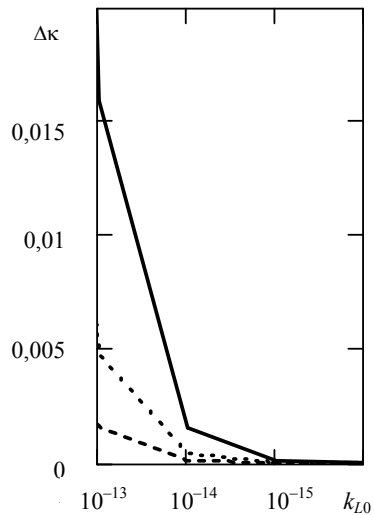


Рис. 4. Залежність ширини двофазної зони від коефіцієнта проникливості при максимальному радіусі  $\rho_{\max} = 10^{-4}$  м

розглядати весь процес у наближенні нехтування дисперсією розмірів пор [5]. Як видно з рисунків, такі умови осушення можуть виникати для крупнопористих тіл з малою дисперсією розмірів пор та малим коефіцієнтом проникності. В іншому випадку необхідно враховувати вплив двофазної зони.

**Висновки.** Таким чином, у роботі проведено математичне моделювання першого етапу осушення пористого тіла, пов'язаного з формуванням двофазної зони, зумовленої дисперсією поперечних розмірів пор, та кількісне дослідження залежності ширини двофазної зони від поперечних розмірів пор та їхньої дисперсії, коефіцієнта проникності, товщини пограничного шару в довколишньому газовому середовищі. Встановлено значення параметрів, за яких потрібно враховувати дисперсію розмірів пор на процес осушення. Отримані результати є базовими для моделювання другого етапу осушення, кількісного аналізу й оптимізації режимів сушки.

### Література

- [1] Хейфец Л. И. Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. — М.: Химия, 1982. — 320 с.
- [2] Неймарк А. В., Письмен Л. М., Бабенко В. Е., Хейфец Л. И. Кинетика сушки пористой частицы с учетом капиллярных свойств // Теоретические основы Химической технологии. — 1975. — Т. 9, № 3. — С. 369-374.
- [3] Лыков А. В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 471 с.
- [4] Лыков Ф. В. Тепломассообмен. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.

- [5] Бурак Я., Кондрат В., Гайвась Б. До математичного моделювання процесу сушки пористих тіл // Інформаційно-математичне моделювання складних систем. — МІМУЗ'. — Львів: 2002. — С. 153-159.

## **Influence of Pore Size Dispersion on Early Stage of Drying of Porous Bodies**

Yaroslav Burak, Bogdana Gayvas, Vasyi Kondrat

*The complete set of relationships for describing an early stage of drying of a porous elastic layer accounted pore sizes dispersion and its connectedness is formulated. Mass transfer in the external medium is described by the model of diffusive boundary layer. A solution for the problem of the drying in early stage is constructed and analyzed quantitatively for the case when a two-phase (liquid – gas) zone is formed. It is established particularly that pore size dispersion, causing the two-phase zone, can affect substantially on the drying process. The range spaces of structural and kinetic characteristics of a porous body such as pore sizes, dispersion and permeability coefficient etc., when effect of pore size dispersion on drying is necessary to be taken into account is defined.*

## **Влияние дисперсии размеров пор на начальном этапе процесса сушки пористых тел**

Ярослав Бурак, Богдана Гайвась, Василий Кондрат

*Сформулирована полная система соотношений для описания начального этапа процесса сушки пористого упругого шара с учетом дисперсии размеров пор, а также их связности. Массоперенос во внешней среде описывается с использованием модели диффузионного шара. Построено и количественно проанализировано решение задачи о начальном этапе сушки, когда формируется двухфазная зона. Показано, в частности, что дисперсия размеров пор, с которой связано возникновение двухфазной зоны (жидкость-газ), может существенно влиять на процесс сушки. Определена область значений структурных и кинетических характеристик пористого тела (размеров пор, дисперсии, коэффициента проницаемости), для которых необходимо учитывать влияние дисперсии размеров пор на процесс сушки.*

Отримано 16.11.05