

До математичного моделювання та вивчення процесу осушення пористих тіл

Богдана Гайвась¹, Ярослав Бурак², Василь Кондрат³

¹ к. ф.-м. н., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудаєва, 15, Львів, 79005

² д. ф.-м. н., чл.-кор. НАН України, професор, Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудаєва, 15, Львів, 79005, e-mail: burak@cmm.lviv.ua

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

Сформульовано нелінійні задачі осушення початково насичених рідиною пористих тіл за умови малої дисперсії поперечних розмірів пор та характерних умов взаємодії з довкіллям. Детально розглянуто перебіг процесу електроосмотичного осушення.

Ключові слова: осушення, пористі тіла, електроосмос.

Вступ. Осушування, як видалення вологи з тіла, є елементом технологічних процесів у різних галузях виробництва і техніки (деревообробці, будівництві, хімічному виробництві тощо). Вивченню проблеми осушування матеріалів, розробці теоретичних засад і математичних моделей процесу, методів розв'язування відповідних задач математичної фізики, а також дослідженням різних аспектів сушки присвячена значна кількість робіт. Зазначимо серед них роботи Ликова А. В. [1], Сажина Б. С. [2], Фролова В. Ф. [3], Абрамеца А. М., Чураєва А. В. [4], Хейфеца Л. І., Неймарка А. В. [5], Куца П. С. [6], Луцика П. П. [7] та інших. Огляду результатів досліджень тепломасоперенесення в пористих середовищах присвячені статті [8], [9]. В експериментальних роботах [10], [11] розглядалася можливість інтенсифікації сушки зовнішнім постійним електричним полем (електроосмотична сушка).

Характерною особливістю опису процесу осушування капілярно-пористих тіл є необхідність якомога повнішого врахування на континуальному рівні їх капілярних властивостей [5]. Зазначимо, що підхід, який базується на використанні потенціалу масоперенесення [1], не дозволяє цього робити в достатньому обсязі. Тому для опису процесу осушування застосуємо підхід, запропонований у роботі [5], де за рушійні сили масоперенесення в порах прийнято градієнти парціальних тисків складників порового газу та капілярний тиск. На цій основі сформулюємо повну систему співвідношень, що описують сушку пористих тіл для характерних способів моделювання зовнішнього впливу на них, за нехтування дисперсією розмірів пор. Окремо розглянемо можливість опису процесу осушування за умови дії зовнішнього постійного електричного поля.

1. Постановка задачі

Розглянемо капілярно-пористе тіло, яке займає область (V) евклідового простору та обмежене гладкою поверхнею (S). Приймемо, що твердофазний скелет тіла є жорстким та масонепроникним, так що масоперенесення відбувається лише в області пор. Пористість вважаємо відкритою. В початковий момент часу тіло насичене рідиною. Будемо розглядати клас матеріалів, у яких поперечний розмір пор характеризується малою дисперсією, якою надалі будемо нехтувати. Тіло на поверхні (S) контактує з середовищем, яке є сумішшю сухого повітря та пари води. За умови ненасиченості водяної пари у навколишньому повітрі, волога випаровуватиметься з пор, які будуть поступово осушуватися від поверхні (S) у глибину тіла. У зв'язку з рівністю поперечних розмірів пор, цей процес буде відбуватись однаково у довільному паралельному до поверхні (S) перерізі тіла. В результаті утворюються дві зони — осушених та заповнених рідиною пор. Межею розділу зон у кожній порі є меніск рідини, випуклість чи увігнутість якого визначається властивостями поверхні пор (її гідрофільністю чи гідрофобністю). Огинаючи по вершинах менісків поверхню позначимо (S^*).

Зазначимо, що осушування пор не буває повним. У гідрофільних порах залишається вода у вигляді пристінкового шару (зв'язана вода). В зоні осушених пор присутні повітря та пара води. Надалі будемо вважати, що поперечний розмір пор суттєво більший за середню довжину вільного пробігу наявних молекул. Це дозволяє для потоків повітря \vec{j}_a та пари \vec{j}_v двокомпонентної суміші в осушеній зоні записати такі вирази [5]

$$\vec{j}_k = \rho_k \vec{v} - D \vec{\nabla} \rho_k, \quad k = \{a, v\} \quad (1)$$

де ρ_a, ρ_v — густини повітря та пари відповідно, D — коефіцієнт бінарної дифузії в порах, \vec{v} — середньомасова швидкість газової суміші.

Потік повітря всередину тіла кількісно значно менший від потоку пари назовні, породженого фазовим переходом вода-пара. У зв'язку з цим надалі будемо нехтувати потоком повітря, тобто прийmemo

$$\vec{j}_a = 0. \quad (2)$$

Будемо нехтувати також локальною зміною густини пари ρ_v з часом, тобто покладемо [5]

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

де t — час.

Таке наближення приводить до рівняння балансу маси пари

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_v = 0. \quad (4)$$

Із співвідношень (1)-(4) випливають рівняння Стефана-Максвелла для бінарної газової суміші в осушеній зоні

$$\rho_a \vec{v} - D \vec{\nabla} \rho_a = 0, \quad \vec{\nabla} \cdot (\rho_v \vec{v} - D \vec{\nabla} \rho_v) = 0. \quad (5)$$

Середньомасову швидкість \vec{v} визначаємо з закону Дарсі [5]

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu_g} \vec{\nabla} P_g. \quad (6)$$

Тут K — коефіцієнт проникливості, який залежить від радіуса та форми пор, μ_g — коефіцієнт динамічної в'язкості газу, P_g — тиск газу у порах.

Прийmemo, що для газової суміші виконується рівняння стану ідеального газу

$$P_g = \left(\frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_v}{M_v} \right) RT, \quad (7)$$

де M_a, M_v — молярні маси повітря та пари; R, T — газова стала і абсолютна температура.

Використовуючи для газової суміші рівняння стану (7) та закон Дарсі (6), запишемо рівняння Стефана-Максвелла стосовно ключових функцій густин повітря ρ_a та пари ρ_v

$$\begin{aligned} \rho_a \frac{K}{\mu_g} \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_v}{M_v} \right) RT + D \vec{\nabla} \rho_a &= 0, \\ \vec{\nabla} \cdot \left[\rho_v \frac{K}{\mu_g} \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_v}{M_v} \right) RT + D \vec{\nabla} \rho_v \right] &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Записані рівняння чинні в області осушених пор, яка обмежена поверхнями (S) та (S^*). Зазначимо, що система диференціальних рівнянь (8) є нелінійною.

На рухомій поверхні (S^*) густину пари прийmemo рівною густині ρ_{vn} насиченої пари [5]

$$\rho_v = \rho_{vn} \quad (9)$$

Крайові умови на поверхні (S) визначаються характером взаємодії тіла з довкіллям та способом його моделювання. У розглядуваному випадку контакту тіла по поверхні (S) із середовищем, яке є сумішшю повітря та пари, за природної сушки можна прийняти, що, у разі віддалення від поверхні (S), густини пари ρ_{ve} і повітря ρ_{ae} набувають властивих атмосферному повітрю сталих значень ρ_{v0}, ρ_{a0} , тобто [12]

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \rho_{ve} = \rho_{v0}, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \rho_{ae} = \rho_{a0}, \quad (10)$$

де r — віддаль від поверхні (S). Тут і надалі величини з індексом e відповідають зовнішньому середовищу.

За умови сталості атмосферного тиску в зовнішній щодо тіла області процеси масоперенесення будемо описувати рівняннями Стефана-Максвелла

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \rho_{ae} - \frac{\rho_{ae}}{D_e} \vec{v}_e &= 0, \\ \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \rho_{ve} - \frac{\rho_{ve}}{D_e} \vec{v}_e \right) &= 0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$P_{ge} = \left(\frac{\rho_{ae}}{M_a} + \frac{\rho_{ve}}{M_v} \right) RT = const. \quad (12)$$

На поверхні (S) прийемо неперервність нормальної складової потоку пари з осушуваного тіла, тобто

$$\vec{n} \cdot \vec{j}_v = \left(\vec{\nabla} \rho_{ve} - \frac{\rho_{ve}}{D_e} \vec{v}_e \right) \cdot \vec{n}, \quad (13)$$

а також рівність густини компонент суміші, що впливає з рівності парціальних тисків на поверхні (S)

$$\rho_{ae} = \rho_a, \quad \rho_{ve} = \rho_v. \quad (14)$$

Значимо, що (8)-(14) є повною системою співвідношень, яка описує масоперенесення у разі природного осушення пористого тіла [12].

Часто при дослідженні процесу сушки, особливо за умов інтенсифікації обдувом, зовнішню задачу ставлять лише для примежевого шару деякої скінченної товщини δ [5]. Тоді масоперенесення в області примежевого шару описується рівняннями (11), (12). На поверхні (S) тіла виконується умова спряження (13), а на зовнішній поверхні (S^{**}) примежевого шару умова

$$\rho_{ae} = \rho_{a0}, \quad \rho_{ve} = \rho_{v0}. \quad (15)$$

У цьому випадку процес осушення описується системою співвідношень (8), (9), (11)-(15).

Зауважимо, що ряд авторів, зокрема роботи [13], не розглядають примежевого шару в околі поверхні тіла, натомість на поверхні (S) задають умову масообміну типу Ньютона

$$\vec{n} \cdot \vec{j}_v = \beta(\rho_v - \rho_{v0}), \quad (16)$$

а також умову

$$\rho_a = \rho_{a0} \cdot \beta \quad (17)$$

Тут β — коефіцієнт масообміну тіла з середовищем. При цьому параметр масо-віддачі залежить від умов впливу (обдуву) на поверхню (S) тіла [13].

У такому разі зовнішню задачу масоперенесення не розглядаємо і осушення тіла будемо описувати системою співвідношень (8), (9), (16), (17).

Введемо поняття відносної вологості тіла наступним чином

$$f = \frac{m}{m_0},$$

де m , m_0 — відповідно актуальна та початкова маси рідини в тілі. Швидкість зміни маси рідини буде визначатись рівнянням

$$\frac{dm}{dt} = - \int_{(S)} (\vec{n} \cdot \vec{j}_v) dS \quad (18)$$

та початковою умовою

$$m = m_0 \quad \text{при } t = 0. \quad (19)$$

Тут вектор \vec{j}_v густини потоку пари з тіла є розв'язком сформульованих вище задач (8)-(14) або (8), (9), (11)-(15), або ж (8), (9), (16), (17).

Якщо за ключову функцію вибрати відносну вологість f , то співвідношення (18), (19) набудуть вигляду

$$\frac{df}{dt} = - \frac{1}{m_0} \int_{(S)} (\vec{n} \cdot \vec{j}_v) dS, \quad (20)$$

$$f = 1 \quad \text{при } t = 0. \quad (21)$$

Зазначимо, що в загальному випадку, у зв'язку з нелінійністю рівнянь (8), (11), знаходження точних розв'язків задачі осушування є суттєвою математичною проблемою. Наближені розв'язки задач для канонічних областей (шару та кулі) наведені, зокрема, в роботах [12], [14].

2. Вплив зовнішнього постійного електричного поля

У роботі [11] проведено експериментальне дослідження електроосмотичного осушення деревини і звернуто увагу на можливість практичного використання такого методу осушування. У низці робіт [10], [15]-[17] розглядаються як теоретичні основи явища електроосмосу, так і можливість його практичного використання з метою видалення вологи з тіла. Така можливість зумовлена тим, що в

околі межі контакту порова рідина-скелет існує подвійний електричний шар, дифузна частина якого може переміщатись разом з рідиною. Силова взаємодія зарядів дифузного шару із зовнішнім електричним полем спричиняє їх переміщення. При цьому виникає також напрямлений рух порової рідини — електроосмос. Прийmemo, що матеріал електродів такий, що біполярний осмос відсутній [11]. Наявність сил електричної природи призводить до зміни характеру протікання процесу осушування тіла. На початковому етапі осушена зона виникає в тілі лише коло частини (S_1) поверхні (S) зі сторони діючих електричних сил (осушена зона 1). Інша частина поверхні тіла (S_2) залишається зволоженою і, за умови переважання електричної сили над капілярною, зумовленою кривизною поверхні контакту рідина-газ, через неї буде спостерігатись електроосмотичний витік рідини. Розширення осушеної зони призводить до зростання електричного опору та спаду напруги на ній. У зв'язку з цим буде зменшуватись напруга та напруженість електричного поля в області, заповненій рідиною. Зменшення кількості рідини внаслідок осушування спричинить також зменшення її сумарного електричного заряду. Пондеромоторна сила $\rho_q \vec{E}$ (ρ_q — середня густина заряду дифузного шару, \vec{E} — напруженість електричного поля в порах), яка діє на рідину зі сторони електричного поля, в процесі осушування буде зменшуватись. Капілярна сила на цьому етапі змінюється незначно. При їх зрівноваженні електроосмотичний витік рідини через поверхню (S_2) припиняється і там також починає утворюватись осушена зона. З цього моменту осушені зони поширюються від поверхонь (S_1) , (S_2) вглиб тіла назустріч одна одній. Таким чином, процес осушення є двоетапним.

1-ий етап осушення. Рівняння масоперенесення в осушеній зоні та крайові умови прийmemo в тому ж наближенні, що й раніше, тобто у вигляді (8)-(17). Однак на цьому етапі відбувається рух рідини під дією електричних сил у напрямку поверхні (S_2) зі швидкістю $\vec{v}_f = \frac{K_f}{\mu} (\rho_q \vec{E} - \vec{\nabla} P_k)$, де K_f — коефіцієнт проникливості тіла щодо рідини, μ_f — її динамічна в'язкість, P_k — тиск, спричинений викривленням поверхні на межі контакту рідина-газ.

Приймаємо, що рідина вільно виходить з пор. На цьому етапі не будемо розглядати фазового переходу рідина-пара в околі поверхні (S_2) . Кількість рідини в тілі таким чином буде зменшуватись як внаслідок осушування з поверхні (S_1) , так і внаслідок електроосмотичного видалення вологи через поверхню (S_2) . При цьому рівняння балансу маси матиме вигляд

$$\frac{dm}{dt} = - \int_{(S_1)} (\vec{n}_1 \cdot \vec{j}_{v1}) dS_1 - \int_{(S_2)} (\vec{n}_2 \cdot \vec{j}_{v2}) dS_2, \quad (22)$$

де \vec{n}_1, \vec{n}_2 — зовнішні нормалі до поверхонь (S_1) і (S_2) ; \vec{j}_{v1} — потік пари через поверхню (S_1) , який має вигляд (1), і є розв'язком задачі (8)-(14), або (8), (9), (11)-(15); $\vec{j}_{v2} = \vec{j}_f$ — потік води через поверхню (S_2)

$$j_f = \text{Пр} \rho_f \vec{v}_f, \quad (23)$$

тут Пр — пористість тіла.

2-ий етап осушення. У момент часу, коли електрична та капілярна сили зрівноважуються, тобто

$$\int_{(V_f)} \rho_q \vec{E} dV - P_k S_1^* = 0, \quad (24)$$

витік рідини припиняється і виникає осушена зона 2, яка розширюється від поверхні (S_2) у глибину тіла. У рівнянні (24) (V_f) — область тіла, зайнята рідиною, S_1^* — площа поверхні контакту газ-рідина.

Задача осушування зони 2 формулюється аналогічно задачі (8)-(14); (8)-(9), (11)-(15); (8)-(9), (16)-(17) осушування зони 1, а рівняння балансу маси вологи в тілі буде таким

$$\frac{dm}{dt} = - \int_{(S_1)} (\vec{j}_{v1} \cdot \vec{n}_1) dS_1 - \int_{(S_2)} (\vec{j}_{v2} \cdot \vec{n}_2) dS_2 \quad (25)$$

Визначення електричних величин. Напруженість електричного поля будемо визначати з відповідних задач електростатики. Для першого етапу це є рівняння

$$\Delta \varphi_j = 0, \quad \vec{E}_j = -\vec{\nabla} \varphi_j, \quad (j=1, 2), \quad (26)$$

записаних відповідно для області (V_1) ($j=1$), обмеженої поверхнями (S_1) та (S_1^*) , і заповненої рідиною області (V_f) ($j=2$). До рівнянь (26) долучаємо граничні умови

$$\varphi_1 = \varphi_{01} \text{ на поверхні } (S_1), \quad \varphi_2 = \varphi_{02} \text{ на поверхні } (S_2), \quad (27)$$

та умови спряження

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad \vec{n}_1 \cdot (\vec{j}_1 - \vec{j}_2) = 0 \text{ на поверхні } (S_1^*), \quad (28)$$

де

$$\vec{j}_j = \sigma_j \vec{E}_j, \quad (j=1, 2) \quad (29)$$

\vec{j}_1, \vec{j}_2 — вектори густин електричного струму, а σ_1, σ_2 — коефіцієнти електропровідності в областях (V_1) та (V_f) відповідно, \vec{n}_1 — нормаль до поверхні (S_1^*) , φ_1, φ_2 — електричні потенціали, $\varphi_{01}, \varphi_{02}$ — задані величини.

Для другого етапу сушки задачу електростатики запишемо так

$$\Delta\varphi_m = 0, \quad \vec{E}_m = -\vec{\nabla}\varphi_m, \quad (m=1,2,3), \quad (30)$$

для областей (V_1) ($m=1$), (V_f) ($m=2$) та області (V_2) ($m=3$), обмеженої поверхнями (S_2^*) та (S_2) , за граничних умов

$$\varphi_1 = \varphi_{01} \text{ на поверхні } (S_1), \quad \varphi_3 = \varphi_{02} \text{ на поверхні } (S_2), \quad (31)$$

та умов спряження

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \varphi_2, \quad \vec{n}_1 \cdot (\vec{j}_1 - \vec{j}_2) = 0 \text{ на поверхні } (S_1^*), \\ \varphi_2 = \varphi_3, \quad \vec{n}_2 \cdot (\vec{j}_2 - \vec{j}_3) = 0 \text{ на поверхні } (S_2^*), \end{aligned} \quad (32)$$

де \vec{n}_2 — нормаль до поверхні (S_2^*) .

Середню густину електричного заряду дифузного шару для бінарного розчину електроліту, згідно теорії подвійного електричного шару та роботи [18], будемо визначати виразом

$$\rho_q = \sqrt{\frac{2\varepsilon_f C \Pi}{f R T k_p}} \frac{z F_f \tilde{\varphi}_1}{T_\Gamma}, \quad (33)$$

де ε_f — середня абсолютна діелектрична проникливість рідкої фази, T_Γ — звивистість, f — параметр форми пор, k_p — коефіцієнт проникливості пористого середовища, $\tilde{\varphi}_1$ — потенціал поверхні найбільшого наближення іонів [19], $z = z_+ = -z_-$, z_+, z_- — валентності катіонів та аніонів, F_f — стала Фарадея, C — концентрація електроліту.

Таким чином, задача електроосмотичного осушення пористого тіла включає співвідношення (8)-(14), (22)-(32) або (8), (9), (11)-(15), (22)-(32), або ж (8), (9), (16), (17), (22)-(32).

Зазначимо також, що використання ізотермічної моделі для опису електроосмотичного осушування накладає відповідні обмеження на величину зовнішнього електричного поля.

Висновки. За квазістаціонарного наближення, для пористих тіл з малою дисперсією поперечних розмірів пор, сформульовано повні системи співвідношень для опису процесів природного або стимульованого обдувом чи зовнішнім постійним електричним полем осушення. В останньому випадку (електроосмотичне

осушення) показано, що необхідно розрізняти два етапи осушення. При цьому стимулююча дія електричного поля спостерігається лише на першому етапі. Це потрібно враховувати при побудові режимів електроосмотичного осушення.

Література

- [1] *Лыков А. В.* Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 471 с.
- [2] *Сажин Б. С.* Основы теории сушки. — М.: Химия, 1989. — 320 с.
- [3] *Фролов В. Ф.* Моделирование сушки дисперсных материалов. — Л.: Химия, 1987. — 348 с.
- [4] *Абрамец А. М., Лиштвен И. И., Чураев Н. В.* Массоперенос в природных дисперсных системах. — Минск: Наука і техника, 1992. — 288 с.
- [5] *Хейфец Л. И., Неймарк Ф. В.* Многофазные процессы в пористых средах. — М.: Химия, 1982. — 320 с.
- [6] *Куц П. С.* Изменение критериев тепломассообмена в процессе сушки капиллярно-пористых материалов. Процессы сушки капиллярно-пористых материалов. — Минск: 1990. — С. 3-8.
- [7] *Луцки П. П.* Уравнения теории сушки деформируемых твердых тел // Промышленная теплотехника. — 1985. — Т. 7, № 6. — С. 8-20.
- [8] *Павлюкевич Н. В.* О кинетической теории процессов переноса в пористых средах // ИФЖ. — 1993. — Т. 64, № 4. — С. 763-766.
- [9] *Мартыненко О. Г., Павлюкевич Н. В.* Тепло- и массоперенос в пористых средах // ИФЖ. — 2003. — Т. 76, № 1. — С. 5-11.
- [10] *Бернацкий А. Ф., Целебровский Ю. В., Чунчин В. А.* Электрические свойства бетона. — М.: Энергия, 1980. — 188 с.
- [11] *Патякин В. И., Базаров С. М., Авдашкевич С. В., Сугаилов У. У.* Электроосмос в капиллярно-пористых телах // Материалы 4-ого Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. — Т. 8. Тепломассообмен в капиллярно-пористых телах. — С. 170-174.
- [12] *Неймарк Ф. 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.
- [13] *Галин Н. М., Кириллов П. Л.* Тепло-массообмен (в ядерной энергетике). — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 376 с.
- [14] *Бурак Я., Кондрат В., Гайвась Б.* До математичного моделювання процесу сушки пористих тіл. Інформативно-математичне моделювання складних систем. — Львів: Сплайн. — 2002. — С. 153-159.
- [15] *Духин С. С.* Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. — К.: Наук. думка, 1975. — 245 с.
- [16] *Liapis F. I., Grimes B. A.* Film mass transfer coefficient expression for electroosmotic flows // J. Colloid and Interface Sci. — 2000. — Vol. 229, № 2. — P. 540-543.
- [17] *Минин О. В.* Теоретическое обоснование возможности индуцирования пондеромоторной термодинамической силы в твердом теле и газе // ИФЖ. — 2003. — Т. 76, № 5. — С. 11-16.
- [18] Фізико-математичне моделювання складних систем / *Бурак Я., Чапля Є, Нагірний Т.* та ін. Під ред. *Бурака Я.* та *Чаплі Є.* — Львів: СПОЛОМ, 2004. — 264 с.
- [19] *Фридрихсберг Д. А.* Курс коллоидной химии. — Л.: Химия, 1974. — 352 с.

On Mathematical Modelling and Investigation of Porous Bodies Drying Process

Bogdana Gajvas, Yaroslav Burak, Vasyl Kondrat

Nonlinear problems are formulated for drying process of porous bodies primordially saturated by liquid under small dispersion of crosscut pore size and characteristic condition of interaction with environment. It is considered in details running the process of electroosmotic drying.

К математическому моделированию и изучению процесса сушки пористых тел

Богдана Гайвась, Ярослав Бурак, Василий Кондрат

Сформулированы нелинейные задачи сушки изначально насыщенных жидкостью пористых тел при условиях малой дисперсии поперечных размеров пор и характерных условиях взаимодействия с окружающей средой. Подробно рассматривается протекание процесса электроосмотической сушки.

Отримано 10.10.04