

Analysis of the content of the website pages within the cluster, which revealed their thematic similarity, was performed. For most clusters the formation of a semantic description is possible. The results of clustering are compared with the expert partition. The values of accuracy and completeness of division into clusters are calculated.

Key words: *website, web-graph, hierarchical structure, hyperlinks, modularity functional, clustering, thematic coherence of pages, Louvain method, greedy algorithm.*

Отримано: 18.09.2020

УДК 519.6

DOI: 10.32626/2308-5878.2020-21.114-126

М. Р. Петрик, д-р фіз.-мат. наук,

Д. М. Михалик, канд. техн. наук,

І. В. Гоянюк, аспірант

Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, м. Тернопіль

ВИСОКОПРОДУКТИВНІ ОБЧИСЛЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО МАСОПЕРЕНОСУ В СЕРЕДОВИЩІ МІКРОПОРИСТИХ ЧАСТИНОК З УРАХУВАННЯМ ЗВОРОТНІХ ЗВ'ЯЗКІВ

Методами інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є побудований високошвидкісний точний аналітичний розв'язок крайової задачі фільтраційного масопереносу, що включає два взаємозв'язаних типи переносу: на мікрорівні — в мікропорах вологовмістких частинок та макрорівні — в системі макропор міжчастинкового простору в обмеженому середовищі мікропористих частинок. Шляхом розв'язання оберненої задачі з використанням експериментальних концентраційних розподілів в системі Microsoft Visual C++ розраховані профілі приведення коефіцієнтів консолідації для частинок та системи макропор і виконана перевірка моделі на адекватність.

Процеси фільтраційного масо переносу є важливими технологічними операціями при розділенні сумішей, екстрагуванні рідин із різних біологічних матеріалів в багатьох галузях промисловості. Тому дослідження методології математичного моделювання з використанням методів інтегральних перетворень Фур'є і Лапласа і побудови високошвидкісного та точного аналітичного розв'язку дозволять реалізувати високопродуктивні обчислення з ефективним розпаралелюванням обчислювального процесу для багатоядерних комп'ютерів, що є досить необхідним в переробній, хімічній, фармакології та інших галузях індустрії. Таким чином, це забезпечення виконання ефективних процедур перевірки моделі на

адекватність та побудову просторово розподілених та змінних в часі розподілів параметрів досліджуваних процесів.

Ключові слова: *високопродуктивні обчислення, математична модель фільтраційного масопереносу, інтегральне перетворення Лапласа, скінченне інтегральне перетворення Фур'є, мікропористі частинки, розподіл інтегральної сухості, ступінь адекватності математичної моделі, мікропори, макропори, математичний опис проблеми, мікропори з високим ступенем місткості і низькою проникністю у частинках, макропори з низьким рівнем місткості та високою проникністю.*

Вступ. Процеси фільтраційного масопереносу є важливими технологічними операціями при розділенні сумішей, екстрагуванні рідин із різних біологічних матеріалів в переробній, хімічній індустрії, фармакології та інших галузях. Структура біологічних матеріалів містить розгалужену систему вологовмістких клітин, міжклітинних порождин, мікропор, через які здійснюється масоперенос [1-5]. При фільтраційному переносі — відтиску у попередньо сформованому пласті мікропористих частинок біологічної природи, що піддається стискуванню, виникають внутрішні і зовнішні градієнти тисків відповідно в частинках і міжчастинковому просторі, які спричиняють відтоки рідини із пласти і частинок. При цьому внутрішні потоки маси спрямовані з середини мікропор вологовмістких частинок до їх поверхонь. Далі формуються проміжні (транзитні) потоки, спрямовані від зовнішніх поверхонь частинок в макропори міжчастинкового простору. В макропорах *intraparticle spaces* виникають зовнішні відтоки рідини на зовні пласти середовища. Така феноменологічна модель фільтраційного масопереносу з частинок для середовища клітинної структури розглянута в [4, 5]. Ця модель ґрунтується на відповідних рівняннях балансу маси у внутрічастинковому просторі (*intraparticle spaces*), включаючи і міжклітинний простір, та міжчастинковому просторі (*extraparticle spaces*). Згідно такої моделі, потік рідини з мікропорів *intraparticle spaces* розглядається як такий що є незначним у порівнянні з потоком з частинок на зовні — в макропори *extraparticle spaces* та потоком з *extraparticle spaces* назовні пласти у середовища. До того ж, розглядувана в [5] модель включає припущення про псевдо статичність потоку між *intraparticle spaces* і *extraparticle spaces*. Це означає, що інтенсивність потоку — з середини частинки на зовні частинки є пропорціональна різниці тисків всередині і назовні частинки, що є дуже наближено.

У праці розглядається математична модель масопереносу в середовищі мікропористих частинок клітинних матеріалів, яка враховує складний механізм взаємовпливів і зворотніх зв'язків внутрішні мікропотоки з частинок та макропотоки міжчастинкового простору.

Математичний опис проблеми. Припускається, що пласт мікропористого середовища частинок, що містять рідину піддається сти-

скуванню. Потоки, що виникають в intraparticle spaces спрямовані в extraparticle spaces і відтак назовні пласту середовища. Тонкі мікро частинки розглядаються нами як паралелепіпеди (прямокутні пласти-ни), відокремлені одна від одної системою макропор. Середовище частинок розглядається як дворівнева система пор: мікропори з висо-ким ступенем місткості і низькою проникністю у частинках, і макро-пори з низьким рівнем місткості та високою проникністю. Детальний аналіз дискретної і континуальної концепції для дворівневої системи пор є добре описаний в механіці руйнування та механіці ґрунтів [1]. Незважаючи на окремі аналогії між такими моделями, рідинних по-токів в дворівневих системах пор, відмінність фізики переносу ріди-ни в механічних системах руйнування і середовищах біологічних ча-стинка є значною і потребує окремого дослідження.

Математична модель такого фільтраційного масопереносу в мік-ропористому середовищі частинок біологічної природи в одновимір-ній постановці по товщині пласту частинок середовища та двовимір-ній для мікропористих частинок може бути сформульована як насту-пна система крайових задач для рівнянь в частинних похідних [6, 7]:

Задача А: Побудувати в області $D_1 = \{(t, z) : t > 0, 0 < z < h\}$ обмежений розв'язок рівняння консолидації для обмеженого середо-вища мікропористих частинок:

$$\frac{\partial P_1(t, z)}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 P_1}{\partial z^2} + \beta_2 \frac{\partial \bar{P}_2}{\partial t} \quad (1)$$

з початковою умовою:

$$P_1(t, z)|_{t=0} = P_E = const, \quad (2)$$

крайовими умовами (по змінній z)

$$P_1(t, z)|_{z=0} = 0; \quad \frac{\partial P_1}{\partial z}|_{z=h} = 0 \quad (3)$$

Задача В: Побудувати в області $D_2 = \{(t, x, z) : t > 0, 0 < x < R, 0 < z < h\}$ обмежений розв'язок рівняння консолидації для частинки

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = b_2 \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} \quad (4)$$

з початковою умовою:

$$P_2|_{t=0} = P_E, \quad (5)$$

крайовими умовами:

$$\frac{\partial P_2}{\partial x}|_{x=0} = 0 \text{ (умова симетрії); } P_2|_{x=R} = P_1(t, z). \quad (6)$$

Тут P_1 — функція розподілу тиску в макропорах extraparticle spaces середовища, P_2 — функція розподілу тиску в мікропорах intraparticle

spaces (частинці), $\bar{P}_2(t, z) = \frac{1}{R} \int_0^R P_2(t, x, z) dx$ — усереднений по r роз-

поділ P_2 в частинці, b_1, b_2 — коефіцієнти консолідації в extraparticle spaces і intraparticle spaces середовища.

Високопродуктивний аналітичний розв’язок моделі: профілі тисків в extraparticle spaces і intraparticle spaces. З використанням методів скінченного інтегрального перетворення Фур’є [8] та інтегрального перетворення Лапласа [9] та підходів, викладених в [6, 7], побудовано високошвидкісний аналітичний розв’язок моделі (1)-(6), що дозволяє ефективно розпаралелювання обчислювального процесу для багатоядерних комп’ютерів у вигляді:

$$P_1(t, z) = P_E \cdot \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{1}{1 - \frac{\beta_2}{2} \left(\frac{\sqrt{b_2}}{v_{jn} \cdot R} \operatorname{tg} \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}} + \frac{1}{\cos^2 \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}}} \right)} \right] \times \quad (7)$$

$$\times \left[e^{-v_{jn}^2 t} - \beta_2 \cdot \frac{2}{R^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-b_2 \eta_k^2 t} - e^{-v_{jn}^2 t}}{\frac{v_{jn}^2}{b_2} - \eta_k^2} \right] \cdot \frac{\sin \lambda_n z}{\lambda_n}$$

$$P_2(t, x, z) = P_E \cdot \frac{2}{R} \sum_{m=0}^{\infty} \left[e^{-b_2 \eta_m^2 t} + b_2 \eta_m^2 \int_0^t e^{-b_2 \eta_m^2 (t-\tau)} \cdot P_1(\tau, z) dz \right] \frac{(-1)^m \cdot \cos \eta_m x}{\eta_m}$$

або

$$P_2(t, x, z) = P_E \cdot \frac{2}{R} \sum_{m=0}^{\infty} \left[e^{-b_2 \eta_m^2 t} + \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{1}{1 - \frac{\beta_2}{2} \left(\frac{\sqrt{b_2}}{v_{jn} R} \operatorname{tg} \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}} + \frac{1}{\cos^2 \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}}} \right)} \right] \times \quad (8)$$

$$\times \left[\frac{\omega_{mk}(t) - \frac{e^{-v_{jn}^2 t} - e^{-b_2 \eta_m^2 t}}{v_{jn}^2}}{1 - \frac{v_{jn}^2}{b_2 \eta_m^2}} - \beta_2 \cdot \frac{2}{R^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 - \frac{v_{jn}^2}{b_2 \eta_m^2}}{\frac{v_{jn}^2}{b_2} - \eta_k^2} \right] \cdot \frac{\sin \lambda_n z}{\lambda_n} \right] \cdot \frac{(-1)^m \cos \eta_m x}{\eta_m}$$

$$\omega_{mk}(t) = \begin{cases} \frac{e^{-b_2\eta_k^2 t} - e^{-b_2\eta_m^2 t}}{b_2(\eta_m^2 - \eta_k^2)}; & m \neq k; \\ b_2\eta_m^2 \cdot e^{-b_2\eta_m^2 t}; & m = k; \end{cases}$$

$$\bar{P}_2(t, z) = \frac{1}{R} \int_0^R P_2(t, x, z) dx =$$

$$= P_E \cdot \frac{2}{R^2} \sum_{m=0}^{\infty} \left[e^{-b_2\eta_m^2 t} + \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{1}{1 - \frac{\beta_2}{2} \left(\frac{\sqrt{b_2}}{v_{jn}R} \operatorname{tg} \frac{v_{jn}R}{\sqrt{b_2}} + \frac{1}{\cos^2 \frac{v_{jn}R}{\sqrt{b_2}}} \right)} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \left[\frac{e^{-v_{jn}^2 t} - e^{-b_2\eta_m^2 t}}{1 - \frac{v_{jn}^2}{b_2\eta_m^2}} - \beta_2 \cdot \frac{2}{R^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\omega_{mk}(t) - \frac{e^{-v_{jn}^2 t} - e^{-b_2\eta_m^2 t}}{1 - \frac{v_{jn}^2}{b_2\eta_m^2}}}{\frac{v_{jn}^2}{b_2} - \eta_k^2} \right] \cdot \frac{\sin \lambda_n z}{\lambda_n} \right] \frac{1}{\eta_m^2}. \quad (9)$$

де $\lambda_n = \frac{2n+1}{2h} \pi$; $n = \overline{0, \infty}$; $\eta_k = \frac{2k+1}{2R} \pi$, $k = \overline{0, \infty}$ v_{jn} ; $j = \overline{1, \infty}$ — корені трансцендентного рівняння

$$v^2 - b_1\lambda_n^2 - \beta_2 \cdot v \frac{\sqrt{b_2}}{R} \operatorname{tg} \frac{vR}{\sqrt{b_2}} = 0. \quad (10)$$

Моделювання та ідентифікація параметрів. В процесі моделювання з використанням спеціально розроблених моделюючих програмних засобів в системі **Microsoft Visual C++** було розв'язано дві задачі: 1) обернена задача — визначення згідно експериментальних розподілів сухості мікропористого середовища та аналітичного

розв'язку моделі розподілів приведених коефіцієнтів консолідації $\frac{b_2}{b_1}$

для розробки процедури перевірки моделі на адекватність та подальшого моделювання профілів тиску в середовищі та частинках та інших параметрів; 2) пряма задача — використовуючи отримані розподіли приведених коефіцієнтів консолідації $\frac{b_2}{b_1}$, знаходження розподіли

лів тисків в extraparticle spaces $P_1(t, z)$ і intraparticle spaces $P_2(t, x, z)$ та $\bar{P}_2(t, z)$ середовища, інтегральної функції сухості частинок середовища $S(t) = \frac{1}{h} \int_0^h [1 - \bar{P}_2(t, z)] dz$, швидкості фільтраційного відтиску $-\frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial z} P_1(t, z)$.

Обернена задача. В якості експериментальних даних для знаходження розподілів приведенних коефіцієнтів консолідації $\frac{b_2}{b_1}$ використовувався експериментальний розподіл інтегральної сухості для intraparticle spaces, отриманий в [7] (рис. 1) В якості аналітичного модельного розподілу сухості частинки використовувався розподіл $S(t)$, що включає розподіл тисків $\bar{P}_2(t, z)$ згідно (9). В результаті чисельного розв'язання відповідних нелінійних систем рівнянь, отримали згідно даних рис. 2 профіль приведенних коефіцієнтів консолідації $\frac{b_2}{b_1}$ (рис. 3) від часу. Початкові дані, що використовувались при моделюванні подані у Microsoft Visual C++ — вікні (рис. 3). Тут P_e — безрозмірний початковий тиск на просторі extrae space; h , — товщина пласту мікропористого; R — половина товщини частинки; β_2 — фактор еластичності.

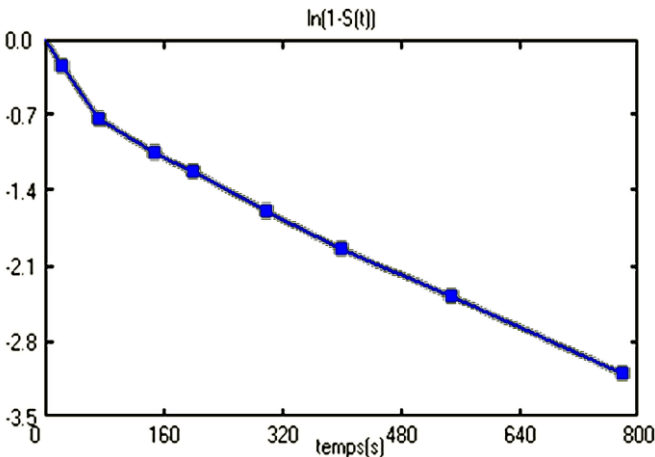


Рис. 1. Експериментальний розподіл інтегральної сухості згідно [7]

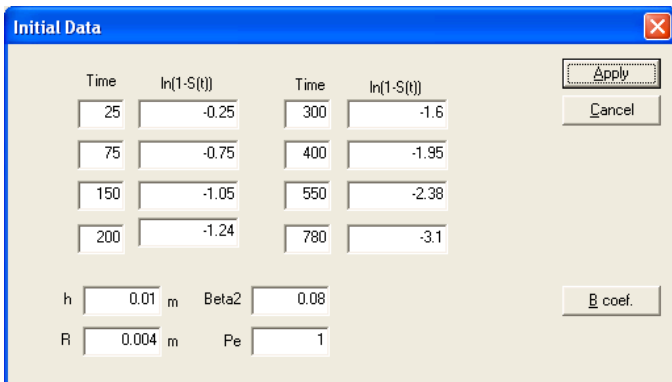


Рис. 2. Microsoft Visual-C++ — вікно даних для моделювання оберненої задачі

Пряма задача. Використовуючи отриманий профіль приведенних коефіцієнтів консолідації $\frac{b_2}{b_1}$ (рис. 3), обчислюємо модельні роз-

поділи тиску в макропорах extraparticle spaces $P_1(t, z)$ згідно формули (7) і розподіли тисків в мікропорах intraparticle spaces (частинках) $P_2(t, x, z)$, $\bar{P}_2(t, z)$, згідно (8)-(9), та інтегральної сухості частинок $S(t)$ і швидкості фільтраційного масопереносу $-\frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial z} P_1(t, z)$.

Числове моделювання розподілів тисків та інтегральної функції сухості подано в залежності від зміни часу і безрозмірних геометричних координат $X = x / R$; $Z = z / h$ та згідно даних рис. 4.

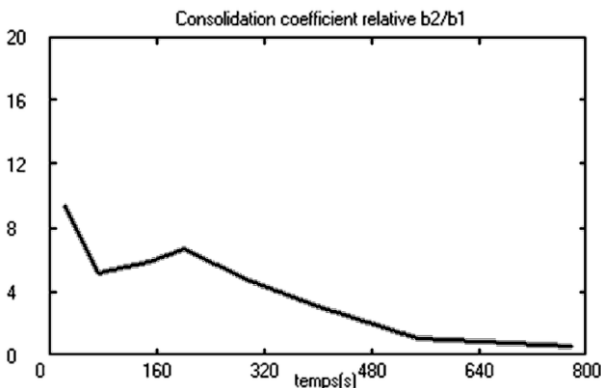
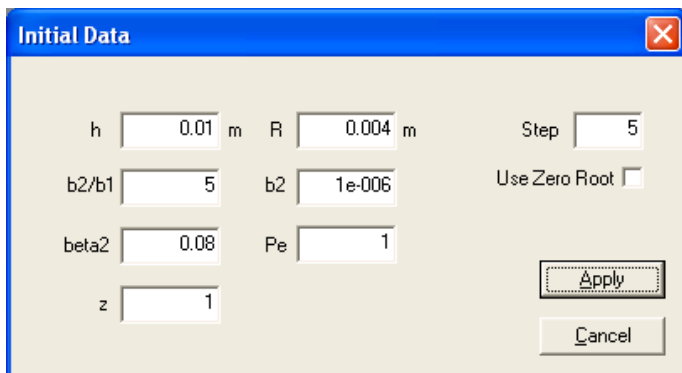


Рис. 3. Профіль ідентикованих приведених коефіцієнтів консолідації $\frac{b_2}{b_1}$



a)



b)

Рис. 4. Microsoft Visual-C++ — вікна даних для моделювання прямої задачі
a) вхідні дані, b) дані ідентифікації кривих розподілів тисків

На рис. 5. подана обчислена матриця коренів трансцендентного рівняння (10) в залежності від вхідних даних (рис. 5), які використовуються для в обчисленнях функціональних рядів розподілів (7)-(9). На рис. 6. подані профілі тисків в макропорах extraparticle spaces середовищі $P_1(t, z)$ від часу t , [s] і безрозмірної товщини пласту середовища Z . Як видно з рис.6, криві розподілів тиску $P_1(t, z)$ для різних положень безрозмірної товщини пласту середовища Z майже експоненціально спадають в часі до нуля. При великих значення часу (більше 800 s) тиск $P_1(t, z)$ для різних значень безрозмірної координати Z спадає до нуля. По мірі наближення координати Z до положення фільтрувальної мембрани $Z = 0$, криві тиску $P_1(t, z)$ спадають до нуля, що визначається крайовою умовою (2)).

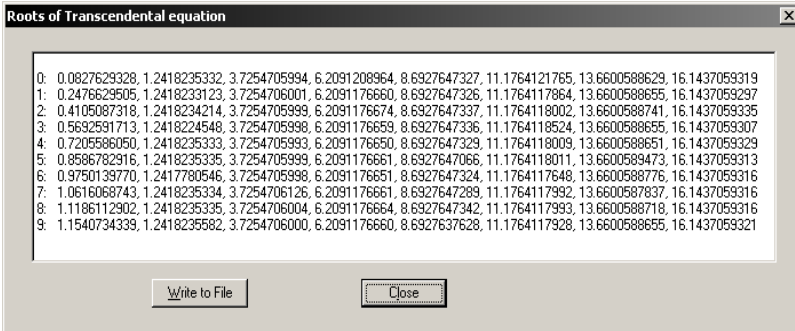


Рис. 5. Visual-C++ — вікно матриці коренів трансцендентного рівняння (10)

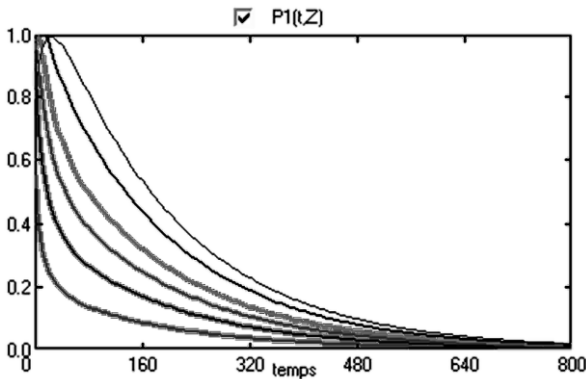
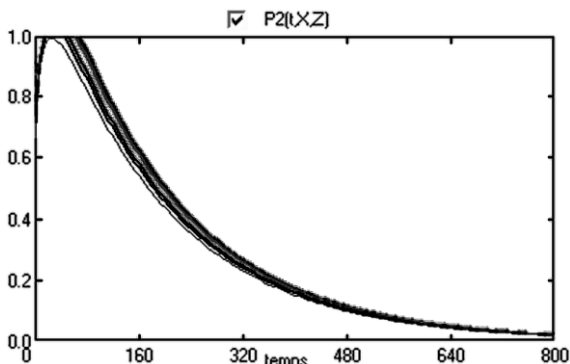
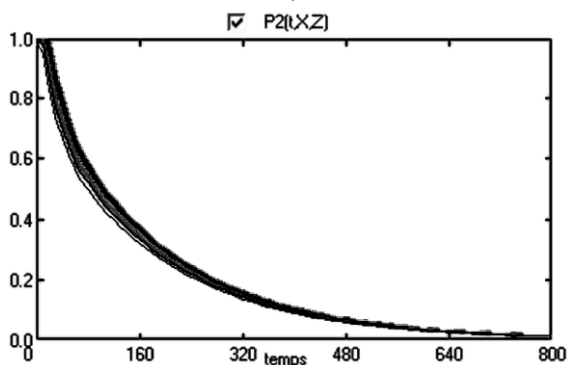


Рис. 6. Модельні профілі тисків в макропорах *extraparticle spaces* $P_1(t, Z)$ від часу $t, [s]$ для різних значень безрозмірної товщини пласти Z

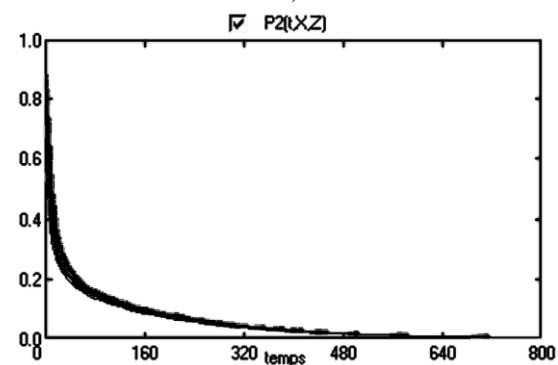
На рис. 7. подані модельні профілі в безрозмірного тиску в мікропорах *intraparticle spaces* (частинці) $P_2(t, X, Z)$ як функції від часу $t, [s]$ і безрозмірної напівтовщини частинки X для різних положень розташування частинки по товщині пласти Z середовища згідно формули (8). Тут $Z = 1$ відповідає положенню частинок на вершині пласти, $Z = 0.5$ — всередині, $Z = 0$ — на фільтрувальній мембрані. Як видно з рис. 8, профілі безрозмірного тиску в мікропорах *intraparticle spaces* $P_2(t, X, Z)$ мають найбільше значення в центрі частинки ($X = 0$) і спадають в напрямі поверхні краю частинки при $X = 1$ ($x = R$), рівний значенню тиску в макропорах *extraparticle spaces* $P_1(t, Z)$ згідно крайової умови (6), що забезпечує збіжність розподілу до крайової умови. Збіжність до крайової умови спостерігається візуально для усіх трьох розглянутих випадків і забезпечується теоретично в силу методики побудови аналітичного розв'язку вихідної моделі (1)-(6) [1].



a)



b)



c)

Рис. 7. Модельні профілі тисків в мікропорах *intraparticle spaces* $P_2(t, X, Z)$ від часу $t, [s]$ для різних положень розташування частинки по товщині пласти: a) $Z = 1$; b) $Z = 0.5$; c) $Z = 0$

На рис. 8 показаний модельний розподіл усередненого тиску в мікропорах *intraparticle spaces* $\bar{P}_2(t, Z)$ згідно (9) від часу t , [s] для різних значень безрозмірної товщини пласту середовища Z . Як видно з рис. 9, криві розподілів усередненого тиску в *intraparticle spaces* $\bar{P}_2(t, Z)$ для різних положень безрозмірної товщини пласту середовища Z псевдо експоненціально спадають в часі до нуля. При великих значеннях часу (більше 800 s) тиск $\bar{P}_2(t, Z)$ як і $P_1(t, z)$ для різних значень безрозмірної координати Z спадає до нуля. По мірі наближення координати Z до положення фільтрувальної мембрани $Z = 0$, криві тиску $\bar{P}_2(t, Z)$ спадають до нуля.

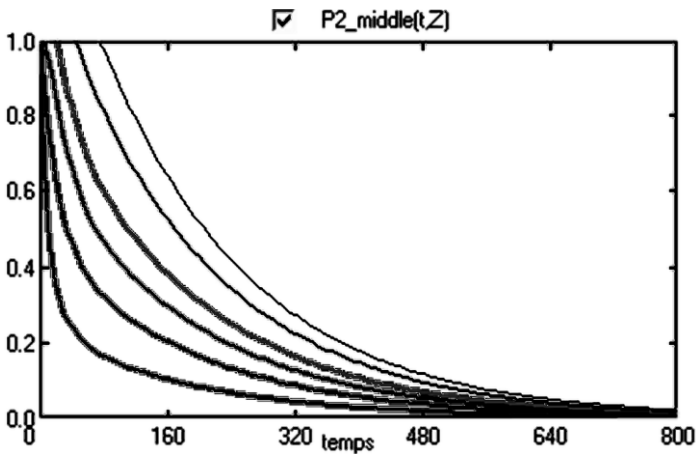


Рис. 8. Модельні профілі усередненого тиску в мікропорах *intraparticle spaces* $\bar{P}_2(t, Z)$ від часу t , [s] для різних значень безрозмірної товщини пласту Z

Рис. 9. ілюструє порівняльну картину кривих модельного (суцільна крива зеленого кольору) і експериментального профілів (синя крива з квадратиками) інтегральної сухості для *intraparticle spaces* $S_2(t)$ від часу t , [s]. Як видно з рис. 10, величини модельного і експериментального профілів інтегральної сухості для *intraparticle spaces* $S_2(t)$ добре узгоджуються між собою. Це забезпечено якісними результатами зворотної задачі, тобто отриманим профілем безрозмірних коефіцієнтів консолідації $\frac{b_2}{b_1}$. Величина відносної похибки для усього розподілу не перевищує 3-5%. Такий підхід забезпечує достатньо високий ступінь адекватності математичної моделі досліджуваного процесу.

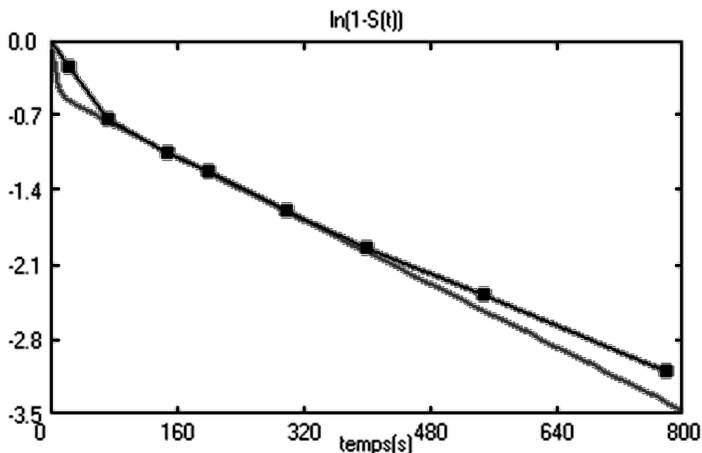


Рис. 9. Модельний і експериментальний профілі інтегральної сухості $S_2(t)$ для *intraparticle spaces* від часу t , [s]

Висновки. Пропонована методологія математичного моделювання з використанням методів інтегральних перетворень Фур'є і Лапласа і побудований високошвидкісний точний аналітичний розв'язок в загальному вигляді дозволяють реалізовувати висопродуктивні обчислення з ефективним розпаралелюванням обчислювального процесу для багатоядерних комп'ютерів, здійснювати інтенсифікацію внутрішньої кінетики з врахуванням зворотніх впливів мікро- і макропотоків між просторами мікропор *intraparticle space* та макропор *extraparticle space* середовища мікропористих частинок. Це забезпечує виконання ефективних процедур перевірки моделі на адекватність та побудову просторово розподілених та змінних в часі розподілів параметрів досліджуваних процесів.

Список використаних джерел:

1. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. Theory of fluid flows through natural rocks. Dordrecht: Kluwer, 1990.
2. Lanoiselle J.-L., Bouvier J.-M. Le Pressage des Oleagineux. Mise au Point. *Rev. Fr. Corps Gras*. 1994. Vol. 41 (3/4). P. 61-72.
3. Schwartzberg H.G.. Expression of fluid from biological solids. *Separation and Purification Methods*. 1997. Vol. 26 (1). P. 1-213.
4. Shirato M., Murase T. Iwata M., Nakatsuka S. The Terzaghi-Voigt combined model for constant pressure consolidation of filter cakes and homogeneous semi-solid materials. *Chemical Engineering Science*. 1986. Vol. 41. P. 3213-3218.
5. Lanoiselle J.-L., Vorobyov (Vorobiev) E., Bouvier J.-M. Modélisation du Pressage à Pression Constant. Cas de Produits à Structure Cellulaire, *Entropie*. 1994. Vol. 30 (186). P. 39-50.

6. Petryk M., Vorobiev E. Liquid Flowing from Porous particles During the Pressing of Biological Materials. *Computer & Chem. Eng.* 2007. Issue 31. P. 1336-1345.
7. Petryk M., Vorobiev E. Numerical and Analytical Modeling of Solid-Liquid Expression from Soft Plant Materials. *AIChE Journal*. Wiley. 2013. Vol. 59. Issue 12. P. 4762-4771.
8. Ленюк М. П., Петрик М. Р. Інтегральні перетворення Фур'є, Бесселя із спектральним параметром в задачах математичного моделювання масо-переносу в неоднорідних середовищах. Київ: Наукова думка, 2000. 372 с.
9. Лавреннтьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функции комплексного переменного. М.: Наука, 1973. 736 с.

HIGH PERFORMANCE CALCULATIONS FOR SIMULATION OF FILTRATION MASS TRANSFER IN MICROPOROUS PARTICLES FEEDBACK CONSIDERED

The problem of mass transfer during the filtration transfert of liquid containing biological particles is presented in one-dimensional formulation. The liquid flowing during pressing is conceptualised as a double-porosity flowing in two volumes: 1) in a porous medium of sliced particles and 2) in the extra particle network. Interporosity flowing occurs between these two porous volumes. The mathematical model consists the system of two differential equations of consolidation with feedback influences ant initial and boundary conditions. The high performance analytical solution of the problem is found by application of integral Laplace and Fourier transformations. The numerical analysis of problem for some values of process parameters is evaluated.

Filtration mass transfer processes are important technological operations in the separation of mixtures, extraction of liquids from various biological materials in many industries. Therefore, the study of the methodology of mathematical modeling using the methods of integral Fourier and Laplace transforms and the construction of high-speed and accurate analytical solution will implement high-performance computations with efficient parallelization of the computational process for multicore computers, which is very necessary in processing and chemistry. other industries. Thus, it is to ensure the implementation of effective procedures for testing the model for adequacy and construction of spatially distributed and time-varying distributions of the parameters of the studied processes.

Key words: *high- high-performance calculations, mathematical model of filtration mass transfer, integral Laplace transformation, finite integral Fourier transform, microporous particles, distribution of integral dryness, degree of adequacy of mathematical model, micropores, macropores, mathematical description of the problem. micropores with a high degree of capacity and low permeability in particles, macropores with a low level of capacity and high permeability.*

Отримано: 12.10.2020