

УДК 517.91:532.2

І.В. ГОЯНЮК, М.Р. ПЕТРИК, І.Я. МУДРИК  
Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

## МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО МАСОПЕРЕНОСУ В СЕРЕДОВИЩІ МІКРОПОРИСТИХ ЧАСТИНОК

*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 полостей, мікропор, через які здійснюється масоперенос. 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 пласту середовища. 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 спричинюють відтоки рідини із пласту і частинок. Ця модель ґрунтується на відповідних рівняннях балансу маси у внутрічастинковому просторі (intraparticle spaces), включаючи міжчастинковий просторі (extraparticle spaces). Згідно такої моделі, потік рідини з мікропор 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 пласту середовища. До того ж, розглядувана модель включає припущення про псевдо статичність потоку між intraparticle spaces і extraparticle spaces. Це означає, що інтенсивність потоку – з середини частинки назовні, є пропорційною різниці тисків всередині і назовні частинки, що є дуже наближено.*

*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, розробленій засобами Microsoft Visual C++ розраховані профілі приведених коефіцієнтів консолідації для частинок та системи макропор і виконана перевірка моделі на адекватність.*

*Ключові слова: інтегральне перетворення Лапласа, скінченне інтегральне перетворення Фур'є, мікропористі частинки, моделювання процесів масоперенесення, коефіцієнти консолідації, мікропори, пласти, адсорбент, дифузія, зв'язки, модельні профілі.*

І.В.ГОЯНЮК, М.Р. ПЕТРЫК, И.Я. МУДРЫК  
Тернопольский национальный технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО МАССОПЕРЕНОСА В СРЕДЕ МИКРОПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ

*Процессы фильтрационного массопереноса являются важными технологическими операциями при разделении смесей, экстрагировании жидкостей из разных биологических материалов в перерабатывающей, химической индустрии, фармакологии и других отраслях. Структура биологических материалов содержит разветвленную систему влажосодержащих клеток, межклеточных полостей, микропор, через которые осуществляется массоперенос. При этом внутренние потоки массы направлены из середины микропор влажосодержащих частиц к их поверхности. Далее формируются промежуточные (транзитные) потоки, направленные от внешних поверхностей частиц в макропоры межчастичного пространства. В макропорах (intraparticle spaces) возникают внешние оттоки жидкости наружу пласта среды. При фильтрационном переносе-оттиске в предварительно сформированном пласте микропористых частиц биологической природы, который подвергается сжатию, возникают внутренние и внешние градиенты давлений соответственно в частицах и межчастичном пространстве, которые вызывают оттоки жидкости из пласта и частиц. Эта модель основывается на соответствующих уравнениях баланса массы во внутривчастичном пространстве (intraparticle spaces), включая межчастичное пространство (extraparticle spaces). Согласно такой модели, поток жидкости из микропор intraparticle spaces рассматривается как незначительный по сравнению с потоком из частиц наружу - в макропоры extraparticle spaces и*

*потоком с extraparticle spaces наружу пласта среды. К тому же, рассматриваемая модель включает предположение о псевдо статичности потока между intraparticle spaces и extraparticle spaces. Это означает, что интенсивность потока - из середины частицы наружу, пропорциональна разности давлений внутри и снаружи частицы, что является очень приближенным.*

*Методами интегральных преобразований Лапласа и Фурье построено высокоскоростное точное аналитическое решение краевой задачи фильтрационного массопереноса, включающее два взаимосвязанных типа переноса: на микроуровне - в микро влагосодержащих частицах, и макроуровне - в системе макропор межчастичного пространства в ограниченной среде микропористых частиц. Путем решения обратной задачи с использованием экспериментальных концентрационных распределений в системе, разработанной средствами Microsoft Visual C ++, рассчитаны профили приведенных коэффициентов консолидации для частиц и системы макропор и выполнена проверка модели на адекватность.*

*Ключевые слова: интегральное преобразование Лапласа, конечное интегральное преобразование Фурье, микропористые частицы, моделирование процессов массопереноса, коэффициенты консолидации, макропоры, пласты, адсорбент, диффузия, связи, модельные профили.*

I.V.GOYANYUK, M.R. PETRYK, I.Y. MUDRYK  
Ternopil National Technical University

## **MODELING OF FILTRATION MASS TRANSFER IN THE MEDIUM OF MICROPOROUS PARTICLES**

*Filtration mass transfer processes are important technological operations in the separation of mixtures, extraction of liquids from various biological materials in the processing, chemical industry, pharmacology and other fields. The structure of biological materials contains an extensive system of moisture-containing cells, intercellular cavities, micropores, through which mass transfer takes place. The internal mass flows are directed from the middle of the micropores of moisture-containing particles to their surfaces. Next, intermediate (transit) flows are formed, directed from the outer surfaces of the particles into the macropores of the interparticle space. In macropores of intraparticle spaces there are external outflows of liquid on the outer layer of the medium. During filtration transfer-impression in the pre-formed layer of microporous particles of biological nature, which is subjected to compression, there are internal and external pressure gradients in the particles and interparticle space, respectively, which cause outflow of liquid from the layer and particles .. This model is based on intraparticle spaces, including extraparticle spaces. According to this model, the fluid flow from the micropores of the intraparticle spaces is considered to be insignificant compared to the flow from the particles to the outside - to the macropores of the extraparticle spaces and the flow from the extraparticle spaces to the outside layer of the medium. In addition, this model includes assumptions about the pseudo-static flow between intraparticle spaces and extraparticle spaces. This means that the intensity of the flow - from the middle of the particle to the outside, is proportional to the pressure difference inside and outside the particle, which is very close.*

*The Laplace and Fourier integral transformation methods are used to construct a high-velocity exact analytical solution of the boundary value problem of filtration mass transfer, which includes two interconnected types of transfer: at the microlevel in micromoisture-containing particles. By solving the inverse problem using experimental concentration distributions in the Microsoft Visual C ++ system, the profiles of the reduced consolidation coefficients for particles and the macropores system were calculated and the model was checked for adequacy.*

*Keywords: Laplace integral transformation, finite Fourier integral transformation, microporous particles, modeling of mass transfer processes, consolidation coefficients, micropores, layers, adsorbent, diffusion, bonds, model profiles.*

### **Постановка проблеми**

Проблеми переносу в пористих середовищах мають велике прикладне значення. В цій праці розглядається математична модель масопереносу в середовищі мікропористих частинок клітинних матеріалів, яка враховує складний механізм взаємовпливів і зворотних зв'язків внутрішніх мікропотоків з частинок та макропотоків міжчастинкового простору.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процеси фільтраційного масопереносу є важливими технологічними операціями при розділенні сумішей, екстрагуванні рідин із різних біологічних матеріалів в переробній, хімічній індустрії, фармакології та інших галузях. Основні проблеми при вивченні процесів масообміну пов'язані з постановкою і розв'язанням задач при високій щільності потоків і великих швидкостях течії, при фазових і хімічних перетвореннях. Перспективним напрямком є використання мікропористих матеріалів для видалення домішок з газових та водних потоків. На сьогодні існує ряд підходів до моделювання процесів масоперенесення в пористих каталітичних (біпористих) середовищах, які дозволяють в достатній мірі враховувати вплив масоперенесення на рівні частинок. Дослідженню процесів дифузійно-адсорбційного масоперенесення в біпористих середовищах присвячено значну кількість праць закордонних авторів – Р. Бартера, Н. Чена, Ж. Каргера, Д. Ритвена ], Ж. Фресарда, Є. Воробйова, С. Леклерка та ін., а також вітчизняних – В.С. Дейнеки, К.В. Сергієнка. В них розглядаються моделі молекулярного транспорту в кристалічних тілах, який спричиняється двома видами дифузії: дифузійною в макропорах, за рахунок порожнин між кристалічними частинками адсорбенту і дифузійною в мікропорах частинок.

### Мета дослідження

З використанням методів скінченного інтегрального перетворення Фур'є та інтегрального перетворення Лапласа, побудувати високошвидкісний аналітичний розв'язок моделі, що дозволяє ефективно розпаралелювання обчислювального процесу для багатоядерних комп'ютерів. Виконати моделювання з використанням спеціально розроблених моделюючих програмних засобів в системі Microsoft Visual C++ .

### Опис основного дослідження

При фільтраційному переносі-відтиску у попередньо сформованому пласті мікропористих частинок біологічного походження, що піддається стискуванню, виникають в частинках і міжчастинковому просторі внутрішні і зовнішні градієнти тисків, які спричиняють відтоки рідини із пласту. При цьому внутрішні потоки маси спрямовані з середини мікропор вологовмістких частинок до їх поверхонь.

У даному дослідженні було розв'язано дві задачі:

1) **перша задача** – на основі розподілів коефіцієнтів консолідації  $\frac{b_2}{b_1}$  Рис.3,

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

2) **друга задача** – знайдено експериментальні розподіли сухості мікропористого середовища на основі аналітичного розв'язку моделі розподілів коефіцієнтів консолідації  $\frac{b_2}{b_1}$ , що дало можливість перевірити моделі на адекватність та, використовуючи сучасні програмні засоби, змоделювати профілі тиску в середовищі, частинках та інші коефіцієнти.

**Перша задача.** На підставі деяких експериментальних даних та отриманих коефіцієнтів консолідації  $\frac{b_2}{b_1}$  та на підставі експериментального розподілу інтегральної сухості для intraparticle spaces, (Рис. 1.), а також розподіл  $S(t)$ , включаючи розподіл тисків  $\bar{P}_2(t, z)$  та застосувавши чисельне розв'язання відповідних нелінійних систем рівнянь (по експериментальних даних, рис. 2) отримали профіль приведених коефіцієнтів консолідації  $\frac{b_2}{b_1}$  (Рис.3) від часу.

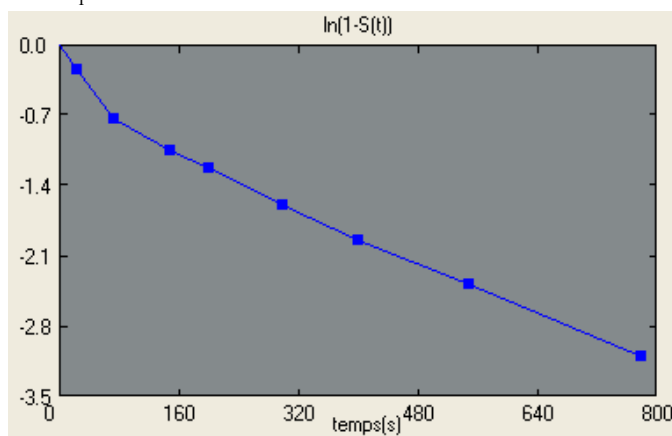


Рис. 1. Екпериментальний розподіл інтегральної сухості

Time	ln(1-S(t))	Time	ln(1-S(t))
25	-0.25	300	-1.6
75	-0.75	400	-1.95
150	-1.05	550	-2.38
200	-1.24	780	-3.1

h: 0.01 m    Beta2: 0.08  
R: 0.004 m    Pe: 1

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

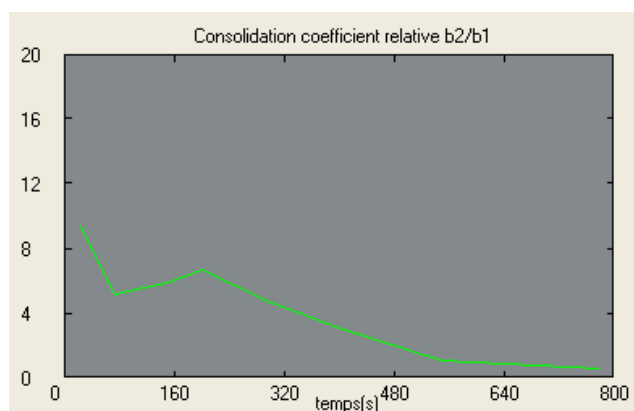


Рис. 3. Профіль ідентикованих приведених коефіцієнтів консолідації  $\frac{b_2}{b_1}$

На рис. 3 наведені початкові дані для моделювання в середовищі Microsoft Visual. Далі  $R$  – половина товщини частинки;  $P_e$  – безрозмірний початковий тиск на просторі *extrae space*;  $h$ , – товщина пласту мікропористого;  $\beta_2$  – фактор еластичності.

**Друга задача.** Беручи до уваги профіль приведених коефіцієнтів консолидації  $\frac{b_2}{b_1}$  (Рис.3), обчислено модельні розподіли тиску в макропорах (*extraparticle spaces*)  $P_1(t, z)$  згідно формули (1) та розподіли тисків в мікропорах (*intraparticle spaces*) (частинках)  $P_2(t, x, z), \bar{P}_2(t, z)$ , інтегральної сухості частинках  $S(t)$  а також швидкості фільтраційного масопереносу  $-\frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial z} P_1(t, z)$ .

Модель розподілів тисків та інтегральної функції сухості представлено в залежності від зміни часу і безрозмірних геометричних координат  $X = x / R$ ;  $Z = z / h$  та згідно даних (Рис. 4).

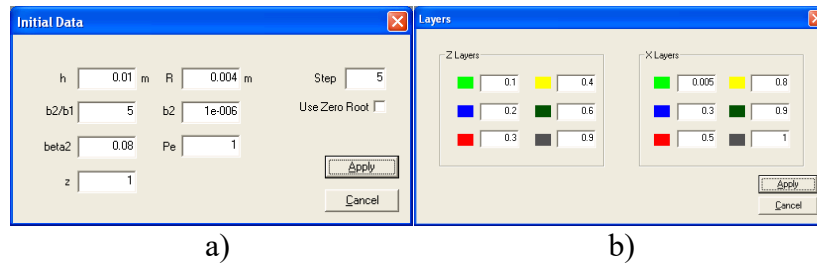


Рис. 4. Microsoft Visual-C++ - вікна даних для моделювання прямої задачі

а) вхідні дані, б) дані ідентифікації кривих розподілів тисків

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

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

або

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

$$\left[ \begin{aligned} & \frac{1}{1 - \frac{\beta_2}{2} \left( \frac{\sqrt{b_2}}{v_{jn} R} \operatorname{tg} \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}} + \frac{1}{\cos^2 \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}}} \right)} \right. \\ & + \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{e^{-v_{jn}^2 t} - e^{-b_2 \eta_m^2 t}}{1 - \frac{v_{jn}^2}{b_2 \eta_m^2}} \right. \\ & \left. \left. \omega_{mk}(t) - \frac{e^{-v_{jn}^2 t} - e^{-b_2 \eta_m^2 t}}{1 - \frac{v_{jn}^2}{b_2 \eta_m^2}} \right] \cdot \frac{\sin \lambda_n z}{\lambda_n} \right] \cdot \frac{(-1)^m \cos \eta_m x}{\eta_m} \\ & - \beta_2 \cdot \frac{2}{R^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1 - \frac{v_{jn}^2}{b_2 \eta_m^2}}{\frac{v_{jn}^2}{b_2} - \eta_k^2}
 \end{aligned} \right]$$

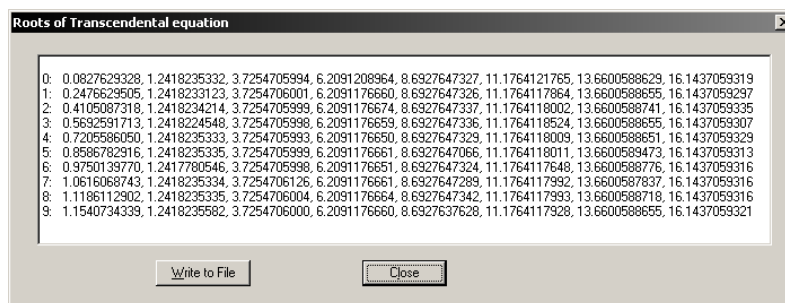


Рис. 5. Visual-C++ - вікно матриці коренів трансцендентного рівняння

На рис. 5. представлена обчислена матриця коренів трансцендентного рівняння в залежності від вхідних даних.

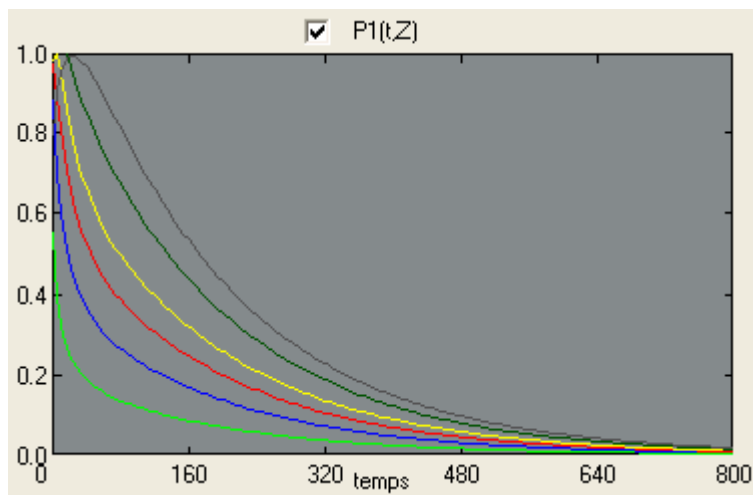
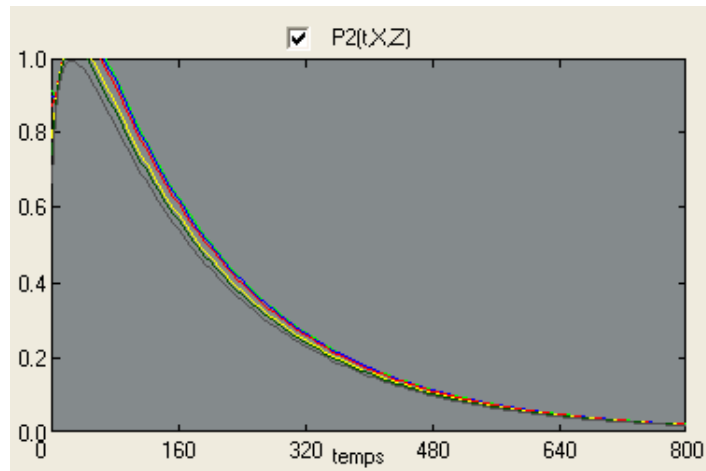


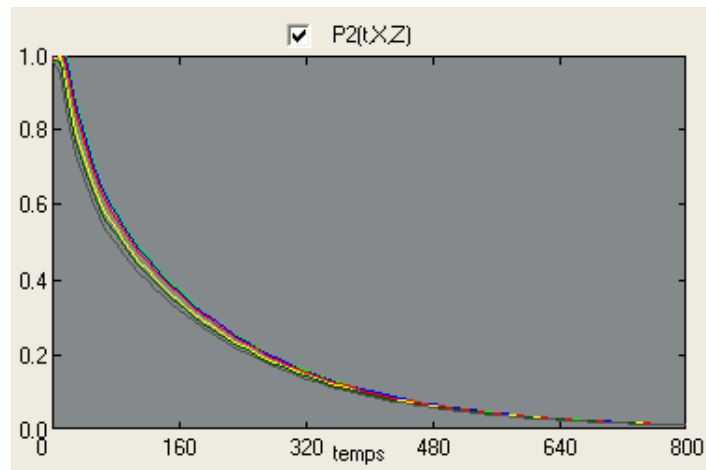
Рис. 6. Модельні профілі тисків в макропорах extraparticle spaces  $P_1(t, Z)$  від часу  $t, [s]$  для різних значень безрозмірної товщини пласту  $Z$

На рис. 6. подані профілі тисків в макропорах (extraparticle spaces) середовища від часу  $t, [s]$  і безрозмірної товщини пласту середовища  $Z$ . Як видно з рис.6, криві розподілів тиску для різних положень безрозмірної товщини пласту середовища  $Z$  експотенціально спадають в часі до нуля. При великих значення часу тиск спадає до

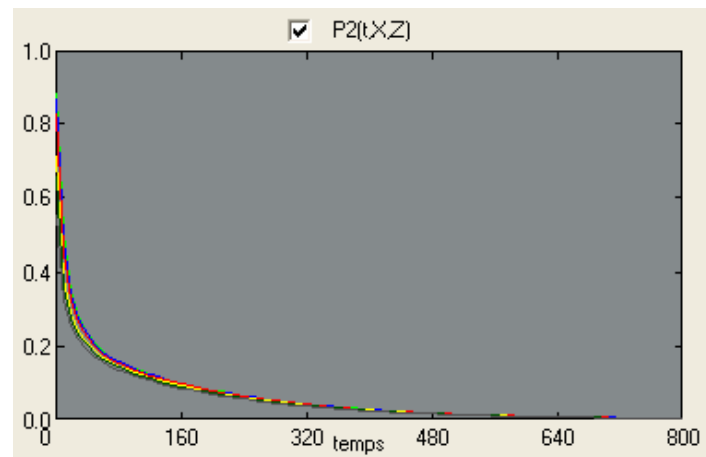
нуля для різних значень безрозмірної координати  $Z$ . По мірі наближення координати  $Z$  до положення фільтрувальної мембрани  $Z=0$ , криві тиску спадають до нуля.



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 пласту: a)  $Z=1$ ; b)  $Z=0.5$ ; c)  $Z=0$**

Рис.7. демонструє модельні профілі 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 пласту  $Z$ -середовища згідно формули (2). Тут  $Z=1$  відповідає положенню частинок на вершині пласту,  $Z=0.5$  – всередині,  $Z=0$  – на фільтрувальній мембрані. Що 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)  $P_1(t, Z)$ .

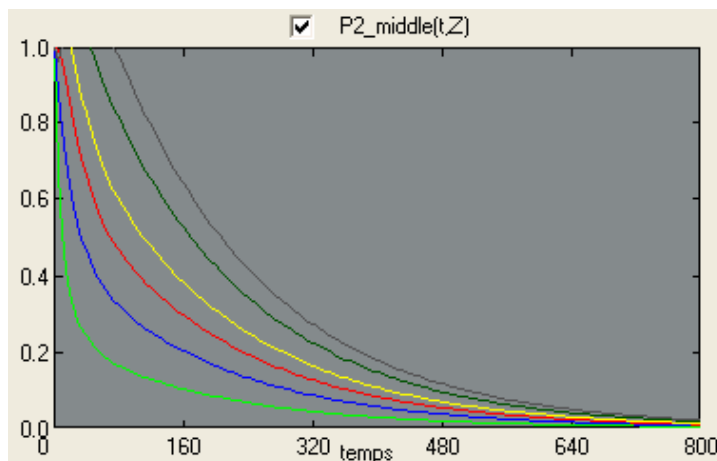


Рис. 8. Модельні профілі усередненого тиску в мікропорах intraparticle spaces  $\bar{P}_2(t, Z)$  від часу  $t$ , [s] для різних значень безрозмірної товщини пласту  $Z$

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

З рис.9 видно, що криві розподілів усередненого тиску в intraparticle spaces  $\bar{P}_2(t, Z)$  для різних положень безрозмірної товщини пласту середовища  $Z$  спадають в часі до нуля. При значенні 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.

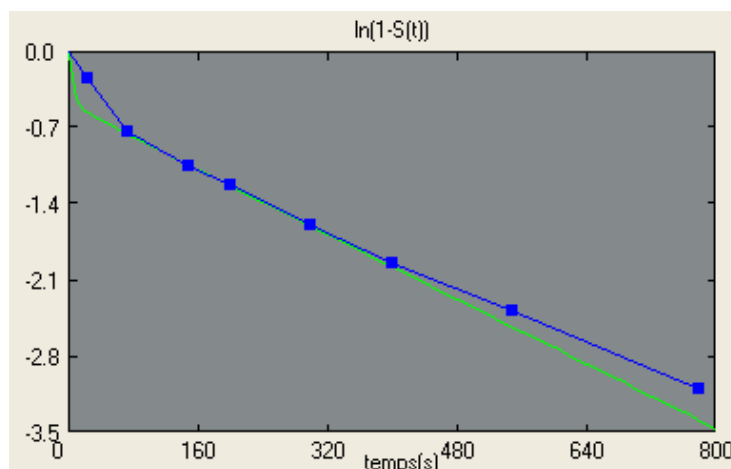


Рис. 9. Модельний і експериментальний профілі інтегральної сухості  $S_2(t)$  для intraparticle spaces від часу  $t$ , [s]



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]. З рис. 10 видно, що величини модельного і експериментального профілів інтегральної сухості для **intraparticle spaces**  $S_2(t)$  добре узгоджуються між собою. Що свідчить про якість зворотної задачі і отриманим профілем безрозмірних коефіцієнтів консолідації  $\frac{b_2}{b_1}$ . Величина відносної похибки для усього розподілу не перевищує 3-5 %.

### Висновки

За допомогою технології математичного моделювання з використанням методів інтегральних перетворень Фур'є і Лапласа було побудовано високошвидкісний точний аналітичний розв'язок задачі фільтраційного масопереносу в загальному вигляді. В процесі моделювання з використанням спеціально розроблених програмних засобів з допомогою середовища **Microsoft Visual C++** та сучасних мов програмування таких як C++ забезпечено виконання ефективних процедур перевірки моделі на адекватність та побудову просторово розподілених та змінних в часі розподілів параметрів досліджуваних процесів (Рис.1 – 9).

### Список використаної літератури

1. Haubenberger D., Kalowitz D., Nahab F. B., Toro C., Ippolito D., Luckenbaugh D. A., Wittevrongel L., Hallett M. Validation of Digital Spiral Analysis as Outcome Parameter for Clinical Trials in Essential Tremor. *Movement Disorders*. 2011. Vol. 26. Issue 11. P. 2073–2080.
2. Wang J.-S., Chuang F.-C. An Accelerometer-Based Digital Pen with a Trajectory Recognition Algorithm for Handwritten Digit and Gesture Recognition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. Issue 7. P. 2998–3007. DOI: 10.1109/TIE.2011.2167895.
3. Ленюк М. П., Петрик М. Р. Методи інтегральних перетворень Фур'є-Бесселя в задачах математичного моделювання масопереносу в неоднорідних середовищах. Київ: Наукова думка, 2000. 372 с.
4. Wang J.-S., Chuang F.-C. An Accelerometer-Based Digital Pen with a Trajectory Recognition Algorithm for Handwritten Digit and Gesture Recognition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. Issue 7. P. 2998–3007. DOI: 10.1109/TIE.2011.2167895.
5. Lanoiselle J.-L., Vorobyov E. (Vorobiev), Bouvier J.-M. Modélisation du Passage à Pression Constant. Cas de Produits à Structure Cellulaire. *Entropie*. 1994.30(186). P. 39–50.
6. Petryk M., Leclerc S., Canet D., Fraissard J. Modeling of gas transport in a microporous solid using a slice selection procedure: Application to the diffusion of benzene in ZSM5. *Catalysis Today*. Elsevier B.V. 2008. Vol. 139. Issue 3. 234–240.
7. Petryk M., Vorobiev E. Liquid Flowing from Porous particles During the Pressing of Biological Materials. *Computer and Chemical Engineering*. 2007. Vol. 31. Issue 10. 1336–1345.
8. Petryk M., Leclerc S., Canet D., Sergienko I., Deineka V., Fraissard J. Competitive Diffusion of Gases in a Zeolite Bed: NMR and Slice Selection Procedure, Modelling and Parameter Identification. *The Journal of Physical Chemistry C. ACS (USA)*. 2015. Vol. 119. Issue 47. P. 26519–26525.

9. Mykhalyk D., Mudryk I., Hoi A., Petryk M. Modern Hardware and Software Solution for Identification of Abnormal Neurological Movements of Patients with Essential Tremor. *Proceeding of the 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies* (Czech Republic, Budejovice, June 5-7, 2019). 2019. P. 183–186

### References

1. Haubenberger, D., Kalowitz, D., Nahab, F. B., Toro, C., Ippolito, D., Luckenbaugh, D. A., Wittevrangel, L., & Hallett, M. (2011). Validation of Digital Spiral Analysis as Outcome Parameter for Clinical Trials in Essential Tremor. *Movement Disorders*. **26**, 11, 2073–2080.
2. Wang, J.-S., & Chuang, F.-C. (2012). An Accelerometer-Based Digital Pen with a Trajectory Recognition Algorithm for Handwritten Digit and Gesture Recognition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. **59**, 7, 2998–3007. DOI: 10.1109/TIE.2011.2167895.
3. Leniuk, M. P., & Petryk, M. R. (2000). Metody intnhralnykh peretvoren Furie-Besseliav zadachakh matematychnoho modeliuвання masoperenosu v neodnorodnykh seredovyshchakh. Kyiv: Naukova dumka.
4. Wang, J.-S., & Chuang, F.-C. (2012). An Accelerometer-Based Digital Pen with a Trajectory Recognition Algorithm for Handwritten Digit and Gesture Recognition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. **59**, 7, 2998–3007. DOI: 10.1109/TIE.2011.2167895.
5. Lanoiselle, J.-L., Vorobyov, E. (Vorobiev), & Bouvier, J.-M. (1994). Modélisation du Pressage à Pression Constant. Cas de Produits à Structure Cellulaire, *Entropie*, **30**(186), 39–50.
6. Petryk, M., Leclerc, S., Canet, D., & Fraissard, J. (2008). Modeling of gas transport in a microporous solid using a slice selection procedure: Application to the diffusion of benzene in ZSM5. *Catalysis Today*. Elsevier B.V. **139**, 3, 234–240.
7. Petryk, M., & Vorobiev, E. (2007). Liquid Flowing from Porous particles During the Pressing of Biological Materials. *Computer and Chemical Engineering*. **31**, 10, 1336–1345.
8. Petryk, M., Leclerc, S., Canet, D., Sergienko, I., Deineka V., & Fraissard, J. (2015). Competitive Diffusion of Gases in a Zeolite Bed: NMR and Slice Selection Procedure, Modelling and Parameter Identification.. *The Journal of Physical Chemistry C. ACS* (USA). **119**, 47, 26519–26525.
9. Mykhalyk, D., Mudryk, I., Hoi, A., & Petryk, M. (2019). Modern Hardware and Software Solution for Identification of Abnormal Neurological Movements of Patients with Essential Tremor. *Proceeding of the 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies* (Czech Republic, Budejovice, June 5-7, 2019), pp. 183–186

Гоянюк Іван Васильович – аспірант кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: ivan.goyanyuk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3760-1929.

Петрик Михайло Романович – д.ф.-м.н., професор кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: Mykhaylo\_petryk@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6612-7213.

Мудрик Іван Ярославович – аспірант кафедри програмної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: i1mudryk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4305-1911.