

Інструментальний програмний комплекс для імітаційного моделювання процесів мембранного розділення рідких дисперсних систем

Богдан Пащенко¹, Олександр Литвиненко²

Національний університет харчових технологій МОН України
Володимирська вул. 68, Київ, Україна, 01601

¹Hoykke@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9623-9061>
²litvinen_nuft@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8975-2265>

Отримано 22.04.2021, прийнято 19.05.2021
<https://doi.org/10.32347/tit2141.0204>

ВСТУП

Однією з основних проблем соціально-економічного розвитку сучасного суспільства у XXI є вдосконалення структури харчової промисловості, як однієї з провідних ланок світового господарства. Для досягнення цієї мети потрібно забезпечити вирішення цілого спектру наукових, технічних, економічних та екологічних питань, що потребує комплексного поєднання декількох сучасних технологій. Особливе місце серед них посідають мембранні, що використовуються для розділення дисперсних систем на багатьох харчових підприємствах і дозволяють створювати енергетично- та екологічно раціональні варіанти розділення та концентрування розчинів із застосуванням широкого спектру фільтрувальних елементів на основі неорганічних матеріалів. Важливу роль в їх дослідженні відіграє комп'ютерне моделювання. Сучасний технічний рівень програмного забезпечення дозволяє вирішити цю проблему, але тільки при наявності комплексної методики дослідження на базі інформаційних технологій проектування. Це забезпечить найбільш повне врахування усіх аспектів технологічного процесу.

МЕТА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є створення цифрової (імітаційної) моделі процесу мембранного розділення дисперсних систем (ДС) за допомогою розробленого інструментального програмного комплексу PLAST-POR-M+GiD, що складається з двох підсистем:

1) PLAST-POR-M, яка призначена для проведення обчислювальних експериментів по дослідженню процесів мембранного розділення з врахуванням напружено-деформованого стану мембранних елементів;

2) PLAST-POR-M+GiD, призначена для проведення обчислювальних експериментів по визначенню кількісних параметрів незворотного деформування шару осаду та визначення його коефіцієнту проникності.

Цифрова модель PLAST-POR-M, у свою чергу, складається з наступних основних складових:

1) графічного редактора для створення геометричної моделі пористого каркасу;

2) сіткового генератора для автоматизованого генерування скінченно-елементної моделі пористого каркасу;

3) визначення початкових та граничних умов згідно розрахункової схеми технологічного процесу;

4) обчислювального процесора, що реалізує рівноважні та нерівноважні режими деформування ДС з відповідними розрахунками технологічних параметрів;

5) візуалізації результатів розрахунків у вигляді кольорової карти досліджуваних функцій;

6) засобів моніторингу, що здійснюють взаємодію підсистем;

7) бази даних для зберігання результатів обчислювальних експериментів.

PLAST-POR-M це комплекс із програми для створення кінцево-елементних сіток і пре/постпроцесингу (Pascal з використанням векторної графіки), розрахункової програми, що базується на методі кінцевих елементів – МКЕ (fortran) і оптимізатора

сіток на основі обраної моделі пористого середовища [1]. Взаємодія між цими програмами здійснюється за допомогою командного рядка.

Рівняння (1, 2) описують поведінку суміші в динамічній постановці. Розв'язання цих рівнянь пов'язано із значними математичними труднощами. Завдяки комплексу програм PLAST-POR-M задача автоматизованого опису процесу мембранного розділення ДС чисельно розв'язується в квазістатичній постановці на основі розв'язання рівняння (3) із використанням заданого розподілення тиску ΔP в об'ємі ДС та математичної моделі процесу.

$$k = \frac{\Pi(t) V c_1}{\mu \Delta P}; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{\pi r^2 l}{\pi r^4 \Delta P / 8 \mu l} = \frac{8 \mu \cdot l}{\pi r^2 \Delta P}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнту проникності каркасу мембрани, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$; τ – час до критичного зниження питомої продуктивності, с; V – об'єм ДС у порі, (м^3); Π – пористість каркасу мембрани, n – число пор, що припадають на одиницю площі фільтрації; r – радіус часточок осаду, м; S – площа фільтрації, м^2 ; ΔP – рушійна сила процесу, МПа; μ – коефіцієнт в'язкості осаду, l – довжина пори, м, Q – питома продуктивність мембранної комірки, $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; c_1 – об'ємний вміст фази у ДС.

Інтервал тривалості технологічного процесу дискретизується шляхом розподілу на певну кількість інтервалів Δt . Алгоритми PLAST-POR-M розв'язують задачу по визначенню напружено-деформованого стану ДС під дією рушійної сили процесу. В результаті визначається поле градієнту тиску ΔP в об'ємі ДС, а далі визначається поле відносних швидкостей твердої та рідкої фаз.

$$\Delta P = \frac{2k \cdot e}{r} \cdot ik, \quad (3)$$

де e_{ik} – швидкість деформування у точках шару осаду.

Процес створення матричної сітки пористого тіла з використанням лише цифрової моделі PLAST-POR-M не достатньо зруч-

ний та трудомісткий, що ускладнює процес вирішення завдань за допомогою цього програмного комплексу [2]. Разом з тим серед постійно зростаючого різноманіття різних сучасних САЕ систем, комплекс PLAST-POR-M відрізняється якісним оригінальним математичним процесором, хоча і архаїчним у плані ергономіки інтерфейсом. Тому перед авторами постало питання про його модернізацію. Увага була приділена програмному комплексу GiD.

Комплекс GiD є графічним препроцесором з потужним апаратом геометричного моделювання, дискретизації геометричних моделей і широкими можливостями імпорту геометрії та сіток із інших САЕ/CAD програм, гнучким графічним постпроцесором, що дозволяє аналізувати результати виконаних обчислень. Однією з особливостей та основною ідеєю GiD, яка обумовлює можливість використання даного пакету для описаних вище цілей є можливість додаткового використання компонентів сторонніх програм. Таким чином зазначений програмний комплекс є універсальним для вирішення поставленого спектру задач.

Для створення цифрової моделі використано мову програмування TCL, що дозволяє скомпілювати роботу алгоритмів програмного пакету PLAST-POR-M із відповідними алгоритмами графічного препроцесору GiD. Таке поєднання дозволило підвищити точність та зручність розробленого програмного комплексу.

Зважаючи на вище зазначене, було прийняте рішення про взаємодоповнення пре/постпроцесору використаного програмного комплексу, залишивши при цьому власну розрахункову програму деформації фільтрувального елемента на базі MCE – цифрову модель PLAST-POR-M (тут і надалі «вирішувач») [3].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Взаємодія між препроцесором GiD і «вирішувачем» здійснювалась шляхом обміну файлами даних. Тому для передачі інформації, про побудовану (або імпортовану) в препроцесорі модель у вхідний

файл «вирішувача», використовується система шаблонів.

Шаблон являє собою файл з розширенням .bas, написаний, відповідно до встановлених алгоритмів, який вказує препроцесору у якому вигляді потрібно записати дані про сітку у файл. Шаблон складається з набору певних символів, які, окрім ключових слів, сприймаються за символом «*». Такі дані GiD обробляє, як простий текст, і в тому ж вигляді передає у вхідний файл (Рис. 1).

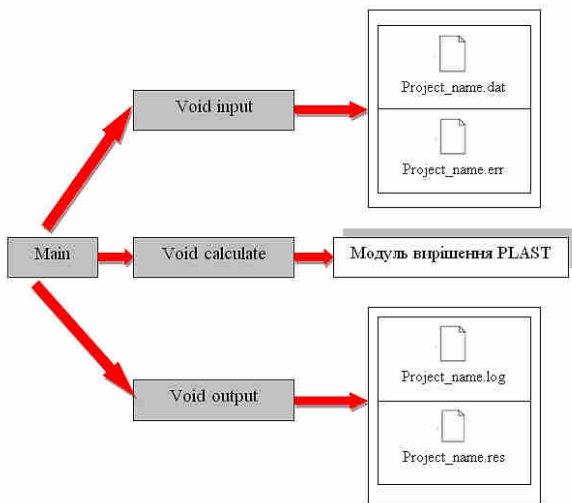


Рис. 1. Схема взаємодії елементів комплексів GiD та PLAST-POR-M

У даному наборі алгоритмів присутні стандартні цикли, умови, елементи та «message-бокси» для повідомлень про помилки, а також програмні процедури, написані мовою TCL.

Для вирішення конкретної задачі ущільнення шару осаду при мембранному розділенні, наявності різних типів (та способів їх опису) матеріалів, граничних умов та врахування структурно-механічних параметрів, були створені текстові файли з відповідними розширеннями для розміщення у відповідному каталозі комп'ютерної системи [4]. Роботу програмної структури комплексу PLAST-POR-M+GiD схематично відображено на Рис. 2.

Поєднання програмних алгоритмів моделі PLAST-POR-M з CAE-комплексом GiD дозволяє вирішити задачу чисельного опису процесу мембранного розділення з ущільненням шару осаду та визначенням

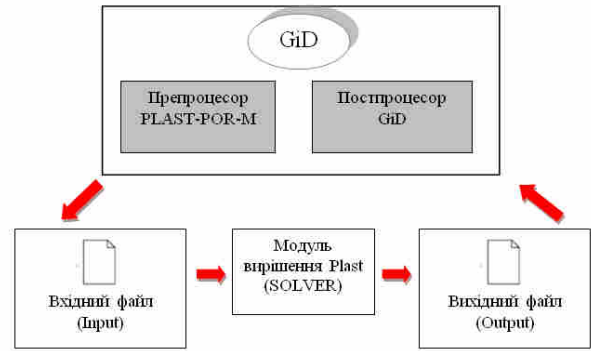


Рис. 2. Структурна схема програмного комплексу PLAST-POR-M+GiD

коефіцієнту проникності. Вона дозволяє, використовувати математичні моделі власної розробки та різного рівня складності реалізовані у вигляді власного «вирішувача». При цьому не потрібно ускладнювати розв'язання поставленої задачі складними та важкими програмними комплексами (наприклад, ANSYS, тощо). Розроблена цифрова модель є зручним засобом для повної візуалізації, прогнозування та отримання чисельних значень параметрів різноманітних технологічних процесів із заданими характеристиками та виконанням потрібних досліднику чи виробництву функцій [5]. Такий механізм дозволяє чисельно описати процес мембранного розділення рідкої ДС в «квазіплоскій» постановці, перетворити отримані дані у вигляд зрозумілий спостерігачеві та готовий до подальшої статистичної обробки.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проведена апробація розробленого програмного комплексу та цифрової моделі процесу мембранного розділення ДС на прикладі розділення модельного розчину за допомогою керамічної трубчастої мембрани «Inopor ultra» показала задовільні результати. Апробація проводилась шляхом порівняння отриманих числових значень питомої продуктивності процесу мембранного розділення, часу до повного блокування проходження рідкої ДС крізь пори мембрани, коефіцієнту проникності фільтрувального елемента та шару осаду, а також за статистичним критерієм Фішера. Він

становив 1,21, що задовольняє умову $F_p < F_{KP}$ ($F_{KP} = 3,79$ при відповідних дисперсіях виборок даних), що свідчить про адекватність розробленого комплексу. При цьому ймовірність розрахованого критерію Фішера становила $\alpha_p = 0,41$, що відповідає наступній умові адекватності: $\alpha_p > \alpha$ ($\alpha = 0,05$). Отримані внаслідок апробації числові співвідношення значень імітаційного та фізичного моделювання мають розбіжність менше 9%, що свідчить про високу точність створеної математичної моделі та програмного комплексу на її основі (Табл. 1).

Таблиця 1

Співставлення результатів моделювання

Показники	Імітаційне моделювання		Фізичний експеримент	
Коефіцієнт проникності, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$	2,39	1,65	1,94	1,32
Продуктивність, $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	31,7	24,5	27,6	20,7

Отримані результати та розробки можуть бути використані у проектувальних розрахунках при вдосконаленні апаратурно-технологічних схем очищення стоків харчових виробництв, у технологіях водопідготовки, тощо. Використання інструментального програмного комплексу PLASTPOR-M+GiD дозволить підвищити ефективність роботи відповідного технологічного обладнання харчових підприємств на 10...15%.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, програмний комплекс, мембранне розділення дисперсних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shtefan E., Pashchenko B., Blagenko S., Yastreba S. (2018). Constitutive Equation for Numerical Simulation of Elastic-Viscous-Plastic Disperse Materials Deformation Process. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing: Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 1, 356-363. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4_37.
2. Пашенко Б.С., Литвиненко О.А., Штефан Є.В. (2019). Інформаційно-аналітична методика для прогнозування і розрахунку конструктивних параметрів мембранних фільтрувальних елементів. *Матеріали ІХ міжнарод. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*. Чернігів: ЧНТУ.
3. Пашенко Б.С., Штефан Є.В. (2018). Моделювання ущільнення шару осаду при мембранному розділенні. *Матеріали міжнарод. наук.-практ. конф. «Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії»*. Київ: НУХТ.
4. Пашенко Б.С., Штефан Є.В. (2016). Визначення концентрацій фаз при мембранному фільтруванні рідких середовищ. *Наукові праці ОНАХТ*, 80 (1), 94-97.
5. Литвиненко О.А., Штефан Е.В. Пашенко Б.С. (2017). Особливості зношування конструкційних матеріалів у харчових середовищах. *Матеріали ІІ міжнарод. наук.-практ. конф. Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях*. Суми: СумДУ.