

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-22>

УДК 664(075.8)

В. М. Зубко¹, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-4783-2608

Є. А. Петриченко², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1037-077X

¹Полтавський державний аграрний університет²Уманський національний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ РОСЛИННОЇ ОЛІЇ В ЗЕЄРНІЙ ЗОНІ ШНЕКОВОГО ПРЕСУ

Анотація. У статті розглянуто процес механічного вилучення рослинної олії у шнековому пресі та запропоновано математичний опис фільтраційного відокремлення олії в зеєрній зоні. Вихідною передумовою дослідження є подання олійної сировини як двокомпонентної системи, що складається з твердого пористого каркаса та рідкої фази, яка заповнює його вільний об'єм. Для опису руху рідкої фази застосовано закон Дарсі, а зміна тиску вздовж робочої ділянки преса подана у вигляді експоненціальної залежності. На основі рівняння балансу потоків отримано аналітичні співвідношення, що дають змогу визначити зміну концентрації вільної олії в м'ятці вздовж зеєрної камери, середню концентрацію відфільтрованої фази та продуктивність преса за олією. Встановлено, що зі зростанням тиску у напрямку до виходу з робочої зони інтенсивність фільтрування підвищується, а залишковий вміст олії в макусі зменшується. Запропонована модель може бути використана як для аналізу роботи діючих шнекових пресів, так і на етапі їх проектування та оптимізації параметрів процесу віджимання.

Ключові слова: шнековий прес, рослинна олія, зеєрна камера, фільтрація, математична модель, продуктивність преса, віджимання олії, пористе середовище.

Постановка проблеми. Механічне пресування олійної сировини залишається одним із найбільш поширених способів одержання рослинної олії, особливо у випадках, коли важливими є відносна простота технологічної схеми, енергоощадність та збереження цінних компонентів продукту. У шнекових пресах основні технологічні процеси відбуваються в умовах поступового ущільнення матеріалу, зростання тиску та фільтраційного виділення рідкої фази через зеєрну решітку. Саме тому ефективність роботи такого обладнання значною мірою визначається закономірностями руху олії в ущільненому пористому середовищі.

Попри наявність численних досліджень, питання аналітичного опису процесу віджимання залишаються актуальними, оскільки реальні фізико-механічні явища в робочій камері преса є складними та багатофакторними. Сучасні праці підтверджують, що продуктивність шнекових пресів, вихід олії та якість кінцевого продукту істотно залежать від тиску, геометричних параметрів шнека, температури, конструкції зеєрної камери та умов керування процесом.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні наукові дослідження у сфері механічного вилучення рослинних олій зосереджені переважно на трьох основних напрямках: удосконалення конструкції шнекових пресів, оптимізація геометрії зеєрної камери та автоматизація технологічного процесу [1–3]. У роботі В. М. Корендія та В. Б. Гаврана досліджено вплив конструктивних і технологічних параметрів на кількісні та силові характеристики процесу витискання олії, а також обґрунтовано перспективність автоматизованого контролю температури, тиску й подачі сировини для підвищення стабільності роботи преса [4].

У праці М. Hudzenko, V. Vasylyv, M. Zheplinska, V. Sarana, D. Gorenkov вивчено ефективність конструкції олієвідвідних каналів шнекових пресів. Автори показали, що геометрія каналів зеєрної зони безпосередньо впливає на інтенсивність відведення рідкої фази, вихід олії та фор-

мування макухи, що підтверджує важливість математичного моделювання процесів фільтрації при розробленні нових конструкцій обладнання [5].

Окрему увагу в сучасних роботах приділено автоматизації процесу віджимання. У дослідженні М. Lobur та співавторів запропоновано систему керування процесом вилучення олії у шнековому пресі з урахуванням температурних параметрів камери пресування, стану електродвигуна та режиму подачі сировини. Це свідчить про перехід від суто емпіричного налаштування пресів до інтелектуального керування на основі вимірюваних параметрів процесу [6]. Отже, аналіз сучасних досліджень підтверджує, що ефективність шнекового віджимання олії визначається не лише механічними параметрами машини, а й закономірностями руху рідкої фази в ущільненому шарі м'ятки. Саме тому побудова адекватної математичної моделі фільтраційного процесу є важливою умовою подальшого вдосконалення як конструкції пресів, так і систем їх автоматизованого керування [6–10].

Формулювання мети статті. Метою дослідження є побудова математичної моделі процесу фільтраційного відокремлення олії в зерній зоні шнекового преса, яка дає змогу встановити закономірності зміни концентрації вільної олії у м'ятці вздовж каналу шнека, визначити середню швидкість фільтрації та оцінити продуктивність преса за цільовим продуктом.

Для досягнення поставленої мети передбачалося:

- проаналізувати особливості процесу механічного віджимання олії у шнекових пресах;
- розглянути сучасні дослідження у сфері вдосконалення конструкцій та режимів роботи пресового обладнання;
- сформулювати фізично обґрунтовані припущення щодо руху рідкої фази в пористому середовищі;
- отримати аналітичні залежності для розрахунку концентрації вільної олії та продуктивності преса;
- оцінити можливість використання моделі для проектування і вдосконалення шнекових пресів.

Основна частина. Теоретичні передумови моделювання процесу. Одним із найпоширеніших способів одержання рослинної олії є механічне пресування олійної сировини у шнекових пресах. У напірній зоні преса здійснюється переміщення та ущільнення матеріалу, унаслідок чого формується необхідний тиск. У другій зоні, тобто в зерній камері, під дією цього тиску відбувається фільтраційне відокремлення олії через зерну решітку. Схему роботи шнекового преса доцільно подати на рисунку 1.

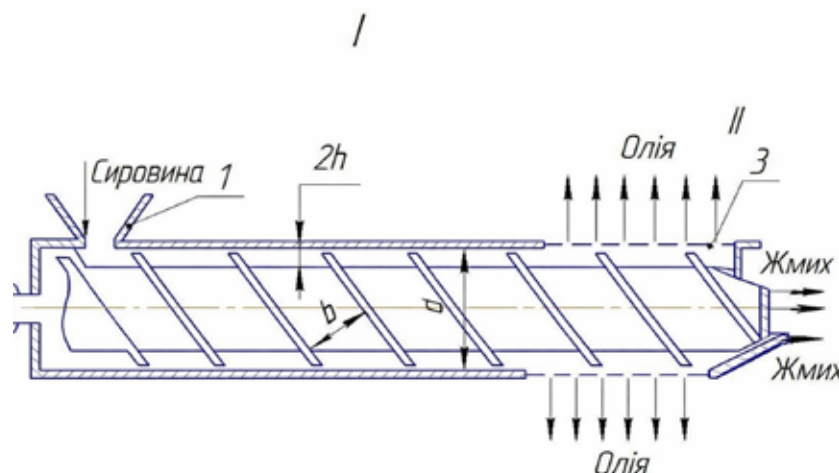


Рис. 1. Принципова схема шнекового преса:

1 – приймач сировини; 2 – шнековий вал; 3 – зерна решітка; 4 – вихідний отвір



Оброблювану сировину можна розглядати як двокомпонентну систему, що складається з твердого пористого каркаса та олії, яка заповнює його вільний простір. Якщо вважати, що у зоні фільтрування робочий об'єм повністю заповнений сировиною, то за зростання тиску об'єм каркаса зменшується, а об'єм вільної олії збільшується на відповідну величину. Тому таку систему можна прийняти як квазінезстисливу. Вплив тиску на коефіцієнт відтоку олії доцільно відобразити графічно на рисунку 2.

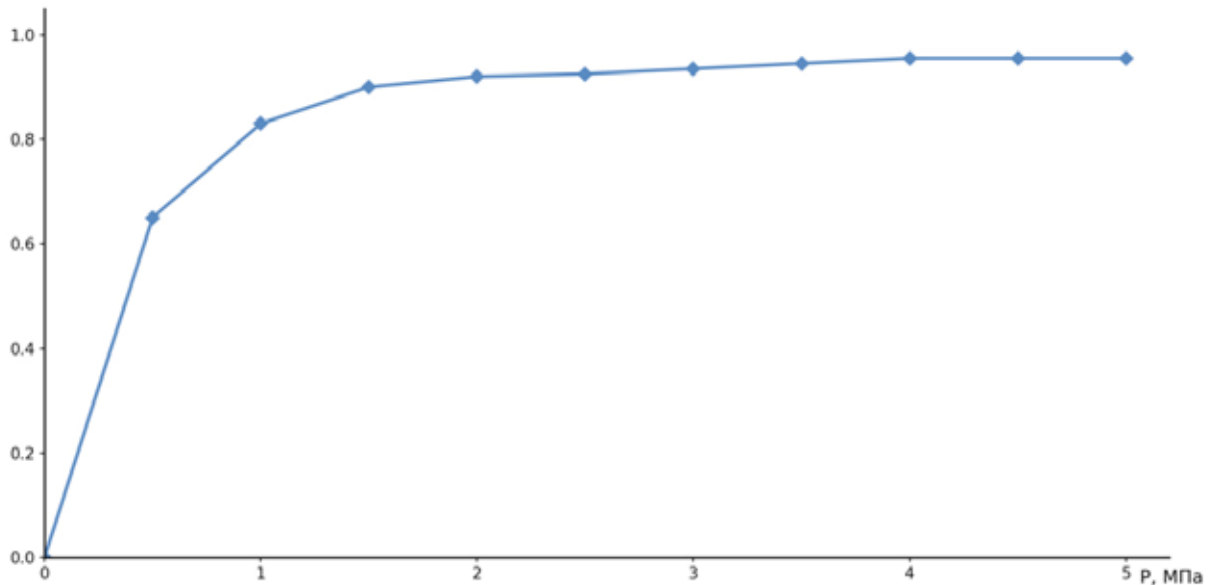


Рис. 2. Вплив тиску на коефіцієнт відтоку олії

Рівняння руху рідкої фази. Для опису процесу використовується закон Дарсі [7]:

$$V_F(z) = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP_{(z)}}{dy} \quad (1)$$

де $V_F(z)$ – швидкість руху рідини у пористому середовищі;
 μ – динамічна в'язкість олії;
 $dP_{(z)}$ – градієнт тиску в радіальному напрямку;
 k – проникність шару м'ятки.

Розгорнувши канал шнека на площину та розглянувши елементарний паралелепіпед товщиною dz , отримуємо розрахункову схему зони віджимання, яку слід подати на рисунку 3.

Оскільки витікання олії крізь зеєрну решітку відбувається в атмосферу, радіальний градієнт тиску можна записати у вигляді:

$$-\frac{dp_{(z)}}{dy} = P(z) / h \quad (2)$$

де h – висота каналу шнека.

Тиск уздовж зеєрної камери приймається експоненціально змінним:

$$P(z) = P_f \cdot e^{az} \quad (3)$$

де P_f – тиск на вході у зону фільтрування;
 a – коефіцієнт зміни тиску.

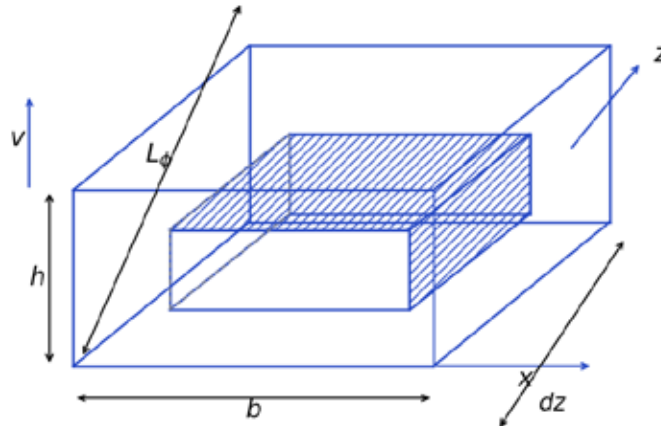


Рис. 3. Розрахункова схема зони віджимання

Коефіцієнт a визначається за формулою:

$$a = \frac{\ln\left(\frac{P_k}{P_f}\right)}{L_f} \quad (4)$$

де P_k – тиск у кінці зерної камери;

L_f – довжина зони фільтрування.

Баланс потоків олії в зерній зоні. Потік олії, що надходить в елементарний об’єм разом із матеріалом, можна записати як:

$$m(z) = V_{zcp} \cdot hb \cdot c(z) \quad (5)$$

де V_{zcp} – середня швидкість руху сировини вздовж каналу;

b – ширина каналу;

$c(z)$ – локальна об’ємна концентрація вільної олії.

Потік олії, що виходить з фільтратом, становить:

$$m_\phi(z) = V_F(z) \cdot c(z) \cdot b \cdot dz \quad (6)$$

Потік олії, що залишається у м’ятці на виході з елементарної ділянки:

$$m(z + dz) = V_{zcp} \cdot hb \cdot c(z + dz) \quad (7)$$

Рівняння балансу потоків матиме вигляд:

$$m(z) = m_\phi(z) + m(z + dz) \quad (8)$$

За умови неперервності функції концентрації:

$$c(z + dz) = c(z) + \frac{dc(z)}{dz} dz \quad (9)$$

Після підстановки співвідношень і перетворення отримаємо диференціальне рівняння процесу фільтрації:

$$\frac{dc(z)}{dz} = -\frac{kP_f}{\mu h^2 V_{zcp}} e^{az} dz \quad (10)$$

за початкової умови: $c(0) = c_0$.



Інтегрування дає залежність для зміни концентрації вільної олії вздовж зерної камери:

$$c(z) = c_0 \cdot e^{-\frac{kP_f}{\mu h^2 V_{zcp}} \cdot a} \cdot (1 - e^{az}) \quad (11)$$

Цей вираз дозволяє визначати вміст вільної олії у будь-якій точці робочої зони. Зміна вмісту олії в м'ятці вздовж каналу шнека ілюструється на рисунку 4.

Кінцева концентрація олії на виході із зони фільтрування визначається при $z = L_f$.

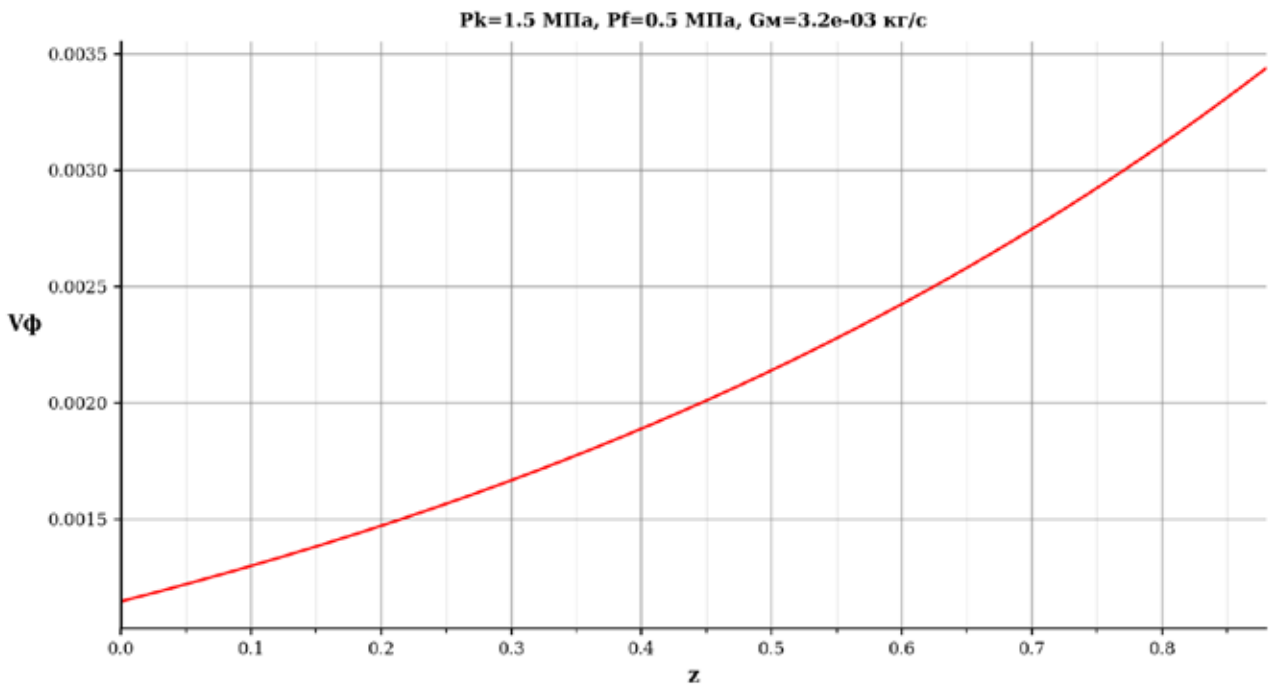


Рис. 4. Зміна вмісту олії в м'ятці по довжині каналу шнека

Це значення є одним із ключових показників ефективності роботи преса, оскільки характеризує залишковий вміст олії у макусі.

Визначення середньої концентрації та продуктивності преса. Концентрацію відфільтрованої олії у будь-якій точці зерної камери можна знаходити як різницю між початковою і поточною концентраціями вільної олії в м'ятці. Середньоінтегральне значення концентрації відфільтрованої фази по довжині робочої зони є необхідним для подальшого визначення продуктивності преса. Середня швидкість фільтрації по довжині зони віджимання:

$$\bar{V}_\phi = \frac{1}{L_f} \int_0^{L_f} V_\phi(z) dz \quad (12)$$

Після інтегрування одержуємо:

$$\bar{V}_\phi = \frac{k(P_k - P_f)}{L_f \mu h a} \quad (13)$$

Тоді продуктивність шнекового преса за олією визначається:

$$Q_m = \bar{V}_\phi \cdot S_\phi \cdot \bar{c}_\phi \quad (14)$$

де $S_\phi = b \cdot L_f$ – площа поверхні фільтрації;

\bar{c}_ϕ – середня концентрація відфільтрованої олії.

Зміна швидкості фільтрації по довжині каналу шнека наведена на рисунку 5, а швидкість зміни безрозмірної концентрації олії в м'ятці – на рисунку 6.

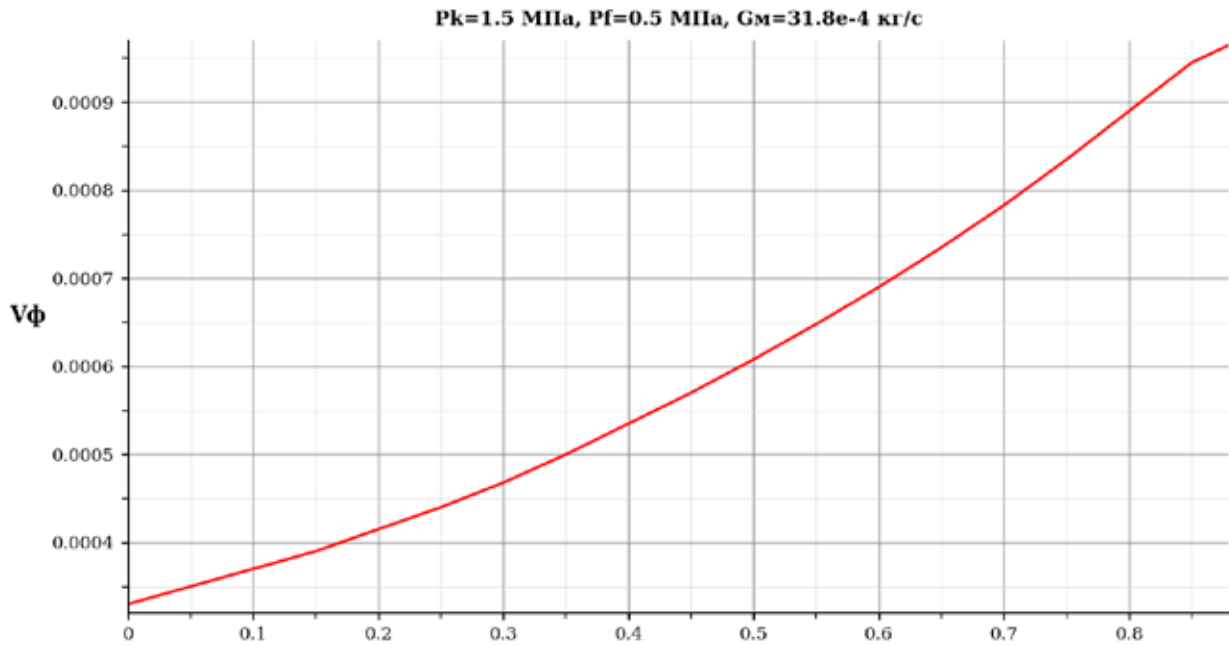


Рис. 5. Зміна швидкості фільтрації по довжині каналу шнека

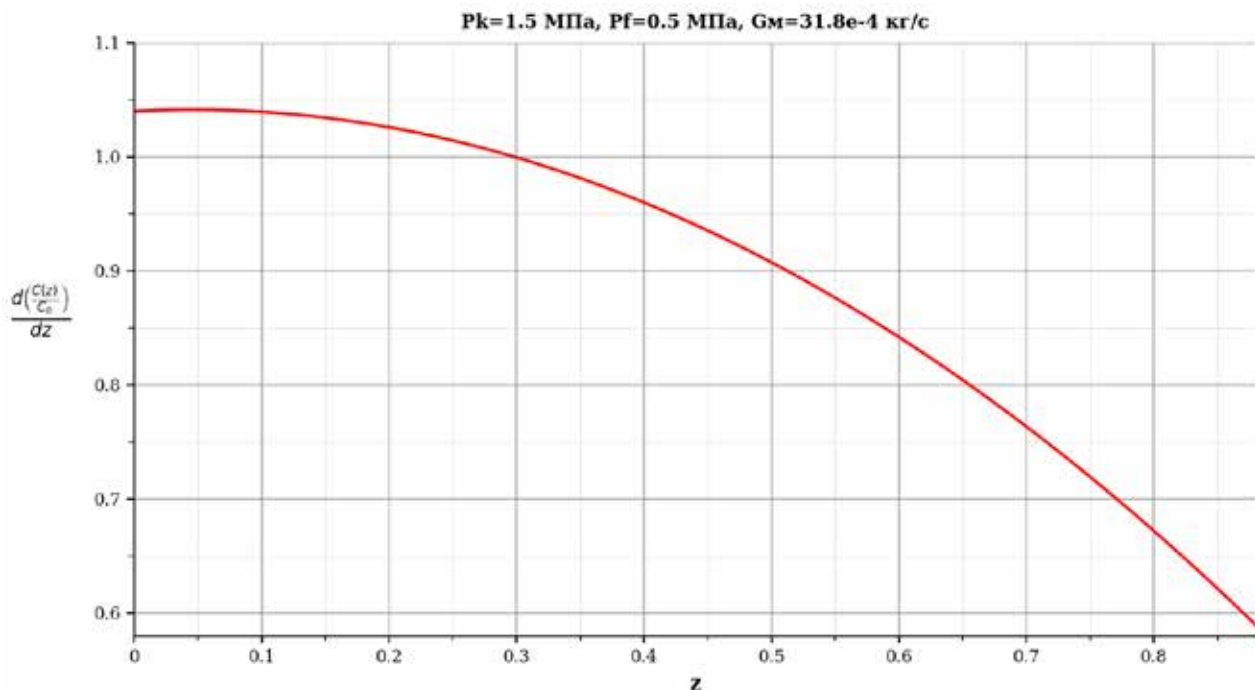


Рис. 6. Швидкість зміни безрозмірної концентрації олії в м'ятці по довжині каналу шнека

Крім того, для повнішої характеристики процесу слід навести графік зміни безрозмірної середньої концентрації відфільтрованої олії по довжині каналу шнека. Це дозволяє виявити

ділянки найбільш інтенсивного відокремлення рідкої фази. Відповідну залежність доцільно оформити у вигляді рисунку 7.

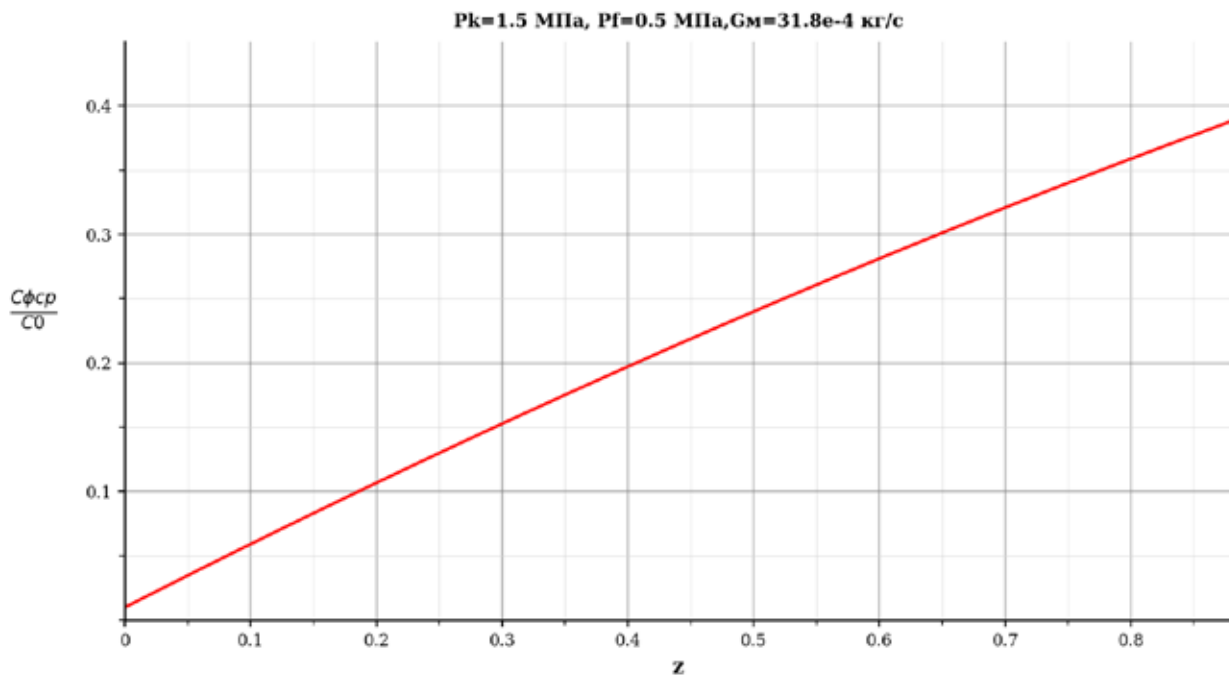


Рис. 7. Зміна середньої концентрації відфільтрованої олії по довжині каналу шнека

Практичне значення моделі. Запропонована математична модель має прикладне значення для інженерних розрахунків, оскільки дозволяє не лише оцінити продуктивність шнекового преса за олією, а й ідентифікувати проникність шару м'ятки за відомих експериментальних показників роботи. Це, своєю чергою, відкриває можливість оптимізувати геометричні параметри зерної камери, робочий тиск, швидкість подачі сировини та інші параметри технологічного процесу. Актуальність такого підходу підтверджується сучасними дослідженнями, у яких розглядаються не лише конструктивні зміни пресів, а й системи автоматизованого контролю і керування процесом віджимання.

Висновки. У результаті опрацювання процесу механічного віджимання олії в шнековому пресі сформовано математичну модель фільтраційного відокремлення рідкої фази в зерній зоні. Показано, що для опису руху олії в ущільненій м'ятці доцільно використовувати закон Дарсі, а зміну тиску вздовж робочої зони можна задати експоненціальною функцією. На основі рівняння матеріального балансу отримано залежності, які дозволяють визначати локальний та кінцевий вміст вільної олії в м'ятці, середню концентрацію відфільтрованої фази і продуктивність шнекового преса за олією. Це створює основу для інженерного аналізу роботи обладнання та вибору раціональних параметрів процесу. Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості застосування моделі під час проектування нових шнекових пресів, удосконалення існуючих конструкцій та подальшого розвитку систем автоматизованого керування процесом віджимання рослинної олії.

Список використаних джерел

1. Дідур В. В., Журавель Д. П., Шокарев О. М., Вюник О. В., Комар А. С. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. С. 180–189. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-17.



2. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко [та ін.]. Мелітополь, 2021. 445 с.
3. Дідур В. А., Ткаченко А. В. Термодинамічні характеристики елементів насіння соняшника. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. К., 2016. Вип. 251. С. 19–30.
4. Корендій В. М., Гавран В. Б. Аналіз процесу витискання олії та визначення перспектив автоматизації роботи шнекового преса. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2024. Т. 34, № 1. С. 85–90. DOI: 10.36930/4034011286.
5. Hudzenko M., Vasylyv V., Zheplinska M., Sarana V., Gorenkov D. Study of the effectiveness of the design of the oil removal channels of screw presses for squeezing out oil. *Animal Science and Food Technology*. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 58–73. DOI: 10.31548/animal.4.2023.58.
6. Lobur M., Korendiy V., Kachur O., Havran V. Automation of the Oil Extraction Process Performed by Means of a Screw Press. *Acta Mechanica et Automatica*. 2024. Vol. 18, No. 4. P. 166–176. DOI: 10.2478/ama-2024-0070.
7. Дарсі А. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris : Victor Dalmont, 1856. 647 p.
8. Bear J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York : American Elsevier Publishing Company, 1972.
9. Gupta M. K. *Principles of Vegetable Oil Extraction*. Boca Raton : CRC Press, 2022.
10. Didur V., Tkachenko V., Tkachenko A., Didur V., Vereshchaga A. Rheology of the pulp of castor-oil seeds and its effect on the process of pressing. *ADVANCES OF SCIENCE: Proceedings of articles the international scientific conference*. Karlovy Vary, Kyiv : MCNIP, 2018. P. 609–618.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Zubko¹, I. Petrychenko²

¹*Poltava State Agrarian University*

²*Uman National University*

MATHEMATICAL MODELING OF THE VEGETABLE OIL FILTRATION PROCESS IN THE GRAIN ZONE OF A SCREW PRESS

Summary

Mechanical pressing of oilseeds remains one of the most common methods of obtaining vegetable oil, especially in cases where the relative simplicity of the technological scheme, energy saving and preservation of valuable product components are important. In screw presses, the main technological processes occur under conditions of gradual compaction of the material, pressure increase and filtration separation of the liquid phase through a sieve grid. That is why the efficiency of such equipment is largely determined by the laws of oil movement in a compacted porous medium. The article considers the process of mechanical extraction of vegetable oil in a screw press and proposes a mathematical model of oil filtration in the seer zone. The oil-bearing raw material is represented as a two-component system consisting of a porous solid framework and a liquid phase filling its free volume. Darcy's law is used to describe the movement of the liquid phase, while the pressure distribution along the working section of the press is assumed to follow an exponential dependence. On the basis of the flow balance equation, analytical relationships were obtained that make it possible to determine the change in the concentration of free oil in the pressed material along the seer chamber, the average concentration of the filtered phase, and the oil productivity of the press. It was established that an increase in pressure toward the outlet of the working zone intensifies the filtration process and reduces the residual oil content in the cake. The proposed mathematical model adequately reflects the physical nature of the processes occurring during oil extraction and can be used both for analyzing the operation of existing screw presses and for designing and optimizing their technological parameters.

Keywords: screw press, vegetable oil, sieve chamber, filtration, mathematical model, press performance, oil extraction, porous medium.