

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-24>

УДК 664.7.047:621.929.7:519.87

М. В. Шевчук¹, PhD, доц.

ORCID: 0000-0002-0123-0348

Г. І. Дашивець², канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-2612-6077

¹Уманський національний університет садівництва²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: shevchuk_m2011@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЕКСТРУЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Анотація. У статті розглянуто особливості моделювання процесів, що відбуваються під час екструзійної обробки рослинної сировини. Встановлено, що ефективність екструзійного процесу значною мірою залежить від фізико-механічних, теплофізичних і технологічних характеристик матеріалу, зокрема вологості, олійності, вмісту оболонки та структурної неоднорідності сировини. Узагальнено підходи до математичного опису фазових і тепломасообмінних перетворень у матеріалі під дією тиску, температури та механічного зсуву. Наведено аналітичні залежності, що дають змогу враховувати вплив технологічних характеристик сировини на перебіг процесу.

Ключові слова: екструзійна обробка, математичне моделювання, рослинна сировина, вологість, олійність, лушпинність, тепло- і масообмін, технологічні характеристики, екструдер.

Постановка проблеми. Сучасні технології переробки рослинної сировини активно розвиваються у напрямі енергоощадних та інтенсивних процесів, серед яких особливе місце займає екструзійна обробка. Вона дозволяє одночасно здійснювати термомеханічну модифікацію сировини, підвищувати її засвоюваність, змінювати структурно-механічні властивості та формувати кінцевий продукт із заданими характеристиками. Однак складність фізико-хімічних перетворень, що відбуваються під час екструзії (зміна вологості, температури, тиску, в'язкопластичної поведінки матеріалу), ускладнює аналітичний опис і керування процесом. Наявні підходи до опису екструзійних процесів часто базуються на емпіричних залежностях або спрощених моделях, які не враховують повною мірою багатофакторний характер впливів. Це призводить до обмеженої точності прогнозування параметрів процесу та складності оптимізації режимів роботи екструдерів при переробці різних видів рослинної сировини. У зв'язку з цим виникає науково-прикладна задача розроблення та вдосконалення математичних моделей, які дозволяють адекватно описувати процеси екструзійної обробки з урахуванням реологічних властивостей сировини, тепломасообміну та енергетичних витрат. Особливо актуальним є створення універсальних підходів до моделювання, які забезпечують підвищення ефективності технологічного процесу, стабільність якості кінцевого продукту та зниження енергоспоживання.

Таким чином, проблема полягає у недостатній точності існуючих моделей екструзійної обробки рослинної сировини та необхідності розробки більш адекватних математичних описів для оптимізації та керування цим складним технологічним процесом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екструзійна обробка є одним із найбільш ефективних способів інтенсифікації технологічних процесів у харчовій, кормовій і переробній промисловості [1–3]. Вона поєднує механічний, тепловий і баричний вплив на матеріал, унаслідок чого змінюються його фізичні, структурні та технологічні властивості [4–6]. Якість кінцевого продукту, стабільність роботи обладнання та енергоефективність процесу значною мірою визначаються властивостями вихідної сировини та умовами її обробки [7–9]. Однією



з важливих проблем є складність прогнозування поведінки сировини в робочій камері екструдера. Під час руху матеріалу уздовж шнека одночасно відбуваються його ущільнення, нагрівання, зневоднення, пластична деформація та структурні перетворення [10–14]. Через це процес екструзії є багатофакторним, а його аналітичний опис потребує врахування великої кількості взаємопов'язаних параметрів. Саме тому математичне моделювання процесів при екструзійній обробці є важливим інструментом для розроблення раціональних режимів роботи обладнання.

У сучасних дослідженнях екструзійні процеси розглядаються як складні багатофакторні системи, в яких одночасно відбуваються термомеханічні, гідродинамічні та структурні перетворення сировини. Зокрема, встановлено, що під час екструзії змінюються реологічні властивості рослинної маси, тиск у матриці та ступінь деструкції біополімерів, що суттєво впливає на якість кінцевого продукту [15–18].

Велика кількість робіт присвячена використанню нетрадиційної рослинної сировини (буряковий жом, виноградні вичавки, овочеві добавки) у поєднанні з зерновими компонентами, що дозволяє не лише розширити сировинну базу, а й покращити функціонально-технологічні властивості екструдатів. При цьому показано, що режимні параметри процесу (вологість, температура, швидкість обертання шнека) є визначальними для стабільності структури продукту.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із математичним моделюванням екструзійних процесів. Сучасні підходи базуються на використанні регресійних моделей, методів планування експерименту та комп'ютерного моделювання для опису залежності між параметрами процесу та якістю продукту. Зокрема, отримано моделі оптимізації процесу екструдуювання рослинних сумішей, які дозволяють прогнозувати показники якості та енергетичні витрати [19].

Важливим напрямом є також дослідження, спрямовані на вивчення гідродинаміки та тепломасообміну в робочих зонах екструдера. Використання чисельного моделювання дозволяє описати складні потоки матеріалу в шнекових системах та матриці, що відкриває можливості для оптимізації конструктивних параметрів обладнання [20].

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що, незважаючи на значний прогрес у вивченні екструзійних процесів, залишаються недостатньо розвиненими універсальні математичні моделі, які б комплексно враховували реологічні властивості рослинної сировини, тепломеханічні процеси та енергетичні характеристики [21, 22]. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі створення більш точних і адаптивних моделей екструзійної обробки.

Формулювання мети статті. Метою роботи є узагальнення теоретичних підходів до моделювання процесів при екструзійній обробці рослинної сировини та визначення ролі її технологічних характеристик у формуванні тепломасообмінних і структурних перетворень.

Для досягнення поставленої мети необхідно: розглянути основні технологічні характеристики сировини, що впливають на процес екструзії; проаналізувати їхній вплив на перебіг тепломасообмінних процесів; подати узагальнені аналітичні залежності для опису фазових перетворень; обґрунтувати необхідність врахування морфологічних і фізико-хімічних властивостей сировини при математичному моделюванні екструзійної обробки.

Основна частина. Під час екструзійної обробки рослинна сировина піддається комплексному впливу температури, тиску, механічного стискання та зсувних деформацій. Унаслідок цього в матеріалі одночасно відбуваються нагрівання, перерозподіл вологи, часткове руйнування клітинної структури, ущільнення та пластичне формування продукту. Інтенсивність цих змін залежить від технологічних характеристик сировини, серед яких особливе значення мають олійність, вологість і вміст оболонки.



Для багатокомпонентної рослинної сировини важливим є співвідношення між окремими структурними частинами. Це може бути подано через залежність:

$$\frac{M_{\text{я}}}{M_{\text{с}}} = \frac{1}{1 - 0,9\text{Л}} \quad (1)$$

де $M_{\text{я}}$ – олійність ядра;

$M_{\text{с}}$ – загальна олійність сировини;

Л – лущинність або частка оболонки.

Це співвідношення показує, що зі зміною частки оболонки змінюється співвідношення між внутрішньою поживною частиною й зовнішнім захисним шаром, а отже – і загальні технологічні властивості матеріалу під час екструзії.

Для оцінювання фазових перетворень у процесі екструзійної обробки може бути використаний критерій, який пов'язує зміну стану окремих морфологічних частин матеріалу із загальною зміною його параметрів:

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta G_{\text{я}}}}{\overline{\Delta G}} \quad (2)$$

де $\overline{\Delta G_{\text{я}}}$ – зміна маси або стану внутрішньої частини матеріалу;

$\overline{\Delta G}$ – загальна зміна параметрів сировини в процесі обробки.

Після перетворення цей критерій можна подати як:

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta G_{\text{я}}}}{\overline{\Delta G}} \cdot \frac{\overline{\Delta W_{\text{я}}}}{\overline{\Delta W}} \quad (3)$$

де $\overline{\Delta W_{\text{я}}}$ і $\overline{\Delta W}$ характеризують зміну вологості окремих частин матеріалу та сировини в цілому.

З урахуванням морфологічних характеристик матеріалу критерій набуває вигляду:

$$\varepsilon = (0,95 - 0,86\text{Л}) \cdot \varepsilon_{\text{к}} \quad (4)$$

де $\varepsilon_{\text{к}}$ – кінетична складова, що відображає інтенсивність перетворення матеріалу в процесі екструзії.

Наведене співвідношення свідчить, що кінетика процесів при екструзійній обробці визначається не тільки режимними параметрами, а й структурно-технологічними особливостями сировини. Саме тому для адекватного моделювання потрібно враховувати сортові, морфологічні та фізико-хімічні властивості матеріалу.

Узагальнений критеріальний опис процесу може бути поданий у вигляді:

$$Fo \cdot \Theta \cdot Re^{1,4} \cdot Gu^{0,9} = 4,1 \cdot 10^3 (0,95 - 0,86\text{Л}) \left(\frac{W_1}{H_0} \right)^{-2,8} \cdot K_o^{0,9} \quad (5)$$

де Fo , Θ , Re , Gu , K_o – критерії та симплекси, що характеризують теплові, гідродинамічні й кінетичні умови процесу;

W_1 , H_0 – параметри вологості й теплового стану матеріалу.

Практичне значення такої моделі полягає в тому, що вона дозволяє враховувати вплив властивостей сировини на інтенсивність перебігу процесів у робочій камері екструдера. Це дає змогу прогнозувати тривалість обробки, рівень нагрівання, зміну вологості та формування структури продукту.

Аналіз показує, що зі збільшенням олійності та частки оболонки змінюється характер проходження процесу: може зростати тривалість термомеханічної обробки, змінюватися ступінь прогрівання та умови пластичного деформування. Водночас глибина структурних перетворень



залежить не лише від початкового складу матеріалу, а й від узгодженості режимів екструзії з властивостями конкретної сировини.

Отже, математичне моделювання процесів при екструзійній обробці має базуватися на комплексному врахуванні фізичних, технологічних і морфологічних характеристик матеріалу. Лише за такої умови можна отримати достатньо точний опис поведінки сировини в екструдері та обґрунтувати раціональні параметри роботи обладнання.

Висновки. У статті узагальнено теоретичні підходи до моделювання процесів при екструзійній обробці рослинної сировини. Встановлено, що технологічні характеристики матеріалу, зокрема вологість, олійність і частка оболонки, істотно впливають на перебіг тепломасообмінних, фазових і структурних перетворень у робочій зоні екструдера.

Показано, що для математичного опису процесу доцільно використовувати критеріальні залежності, які враховують морфологічні особливості сировини та її реакцію на термомеханічний вплив. Це дозволяє більш точно оцінювати умови протікання процесу та прогнозувати якість кінцевого продукту.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості використання математичних моделей для оптимізації режимів екструзійної обробки, підвищення стабільності роботи обладнання та вдосконалення технологій переробки рослинної сировини.

Список використаних джерел

1. Smith J. Centrifugal separation technologies in vegetable oil refining. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 285. Art. 110107.
2. Petrova N. Energy efficiency of centrifugal filtration systems. *Food Engineering Reviews*. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 456–469.
3. Yamamoto H. Mathematical modeling of centrifugal separation processes. *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 227. P. 115–128.
4. Ivanov D. Optimization of filter layer porosity in conical centrifuges. *Journal of Industrial Technology*. 2023. Vol. 61, No. 3. P. 78–91.
5. Janson H. *Castor oil production and processing*. New York : United Nations, 1974. 23 p.
6. Patel V. R., Dumancas G. G., Kasi Viswanath L. C., Maples R., Subong B. J. J. Castor oil: Properties, uses, and optimization of processing parameters in commercial production. *Lipid Insights*. 2016. Vol. 9. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.4137/LPI.S40233>.
7. Yeboah A. et al. Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the chemical composition and physicochemical properties. *Food Science and Technology*. 2021. Vol. 41, suppl. 2. P. 399–413. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.19620>.
8. Ogunniyi D. S. Castor oil: a vital industrial raw material. *Bioresource Technology*. 2006. Vol. 97, No. 9. P. 1086–1091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028>.
9. Gupta M. *Practical guide to vegetable oil processing*. 2nd ed. Urbana, IL: AOCS Press; London : Academic Press, 2017. 508 p.
10. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічної схеми детоксикації рицинової макухи для потреб кормовиробництва. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві* : матеріали XIII науково-технічної конференції (Україна, Київ, 01–17 жовтня 2025 р.). Київ, 2025. С. 76–80.
11. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічного процесу збирання рицини. *Сучасні проблеми землеробської механіки* : матеріали XXVI міжнародної наукової конференції (Київ, 17–18 жовтня 2025 р.). Київ: НУБіП України, 2025. С. 147–150.
12. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І. Ю., Петриченко Є. А. Теоретичні основи розрахунку конструкційно-технологічних параметрів конічної центрифуги для очищення рослинних олій. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 25, № 3. С. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-16>.
13. Журавель Д. П. Технології переробки насіння рицини дворазовим пресуванням. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 2022. С. 32–34.



14. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І. Ю., Петриченко Є. А. Наукові основи очищення рослинних олій у конічних центрифугах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 25, № 3. С. 125–130. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-17>.

15. Журавель Д. П., Дідур В. В., Шевчук М. В. Обґрунтування триботехнічних властивостей біологічних олив для гідросистем сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 15, № 2. С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-6>.

16. Дідур В. В., Журавель Д. П., Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання теплової обробки насіння олійних культур високотемпературним теплоносієм. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 15, № 2. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-5>.

17. Дідур В. В. та ін. Моделювання тепломасоперенесення в поверхневих капілярно-пористих середовищах. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 2025). С. 46–49.

18. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологічного процесу механізованого збирання рицини. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 2025). С. 56–61.

19. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину : монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с.

20. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Т. 12, № 3. Ст. 18. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-3-18>.

21. Журавель Д. П. Обґрунтування методу очищення біологічних олій в електричному полі. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві* : матеріали XIII науково-технічної конференції (Київ, 2024). С. 68–72.

22. Журавель Д. П., Дідур В. В. Моделювання процесу очищення рицинової олії в електричному полі. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 2024). С. 98–104.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



M. Shevchuk¹, H. Dashyvets²

¹Uman National University of Horticulture

²Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

MODELING OF PROCESSES IN EXTRUSION PROCESSING OF VEGETABLE RAW MATERIALS

Summary

The article considers the theoretical foundations of process modeling during extrusion treatment of plant raw materials. It is shown that the efficiency of extrusion depends on the physical, mechanical, thermophysical, and technological characteristics of the material, in particular moisture content, oil content, husk content, and structural heterogeneity. Generalized analytical relationships are presented to describe phase transformations and heat-and-mass transfer processes occurring under the influence of pressure, temperature, and mechanical shear. It is substantiated that mathematical modeling makes it possible to predict processing duration, heating intensity, moisture change, and other parameters determining the quality of the final product. The study confirms that taking into account the structural features of raw materials is necessary for improving the accuracy of calculations and optimizing extrusion treatment modes. Modern technologies for processing plant raw materials are actively developing in the direction of energy-saving and intensive processes, among which extrusion processing occupies a special place. It allows simultaneously to carry out thermomechanical modification of raw materials, increase its digestibility, change



structural and mechanical properties and form a final product with specified characteristics. However, the complexity of physicochemical transformations occurring during extrusion (changes in moisture, temperature, pressure, viscoplastic behavior of the material) complicates the analytical description and control of the process. Existing approaches to describing extrusion processes are often based on empirical dependencies or simplified models that do not fully take into account the multifactorial nature of the influences. This leads to limited accuracy in predicting process parameters and the complexity of optimizing extruder operating modes when processing different types of plant raw materials. In this regard, the scientific and applied task of developing and improving mathematical models that allow adequately describing extrusion processing processes taking into account the rheological properties of raw materials, heat and mass transfer and energy costs arises. The creation of universal approaches to modeling that ensure increased efficiency of the technological process, stable quality of the final product and reduced energy consumption is especially relevant. Thus, the problem lies in the insufficient accuracy of existing models of extrusion processing of plant raw materials and the need to develop more adequate mathematical descriptions for optimizing and controlling this complex technological process.

Keywords: extrusion treatment, mathematical modeling, plant raw materials, moisture content, oil content, husk content, heat and mass transfer, technological characteristics, extruder.