

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-17>

УДК 664 (075.8)

В. В. Дідур¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-7584-5073

Д. П. Журавель², д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6100-895X

І. Ю. Повар³, аспірант

ORCID: 0009-0000-1984-8894

І. А. Колесніченко³, аспірант

ORCID: 0009-0007-9302-208X

¹Уманський національний університет²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного³Полтавський державний аграрний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

НАУКОВІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ У КОНІЧНИХ ЦЕНТРИФУГАХ

Анотація. У статті подано результати аналізу сучасних підходів до механіко-технологічного очищення рослинних олій у конічних центрифугах. Розглянуто математичні моделі процесів очищення, наведено спрощені формули та їх пояснення. Проаналізовано ефективність технологічних ліній очищення та перспективи використання фільтруючих матеріалів.

Ключові слова: рослинні олії, очищення, центрифуга, математична модель, ефективність.

Постановка проблеми. Виробництво рослинних олій потребує високоефективних методів очищення від домішок. Традиційні технологічні лінії мають високу енергоємність і складність конструкції, що знижує економічні показники виробництва. Використання конічних центрифуг дає змогу забезпечити якісне очищення олії завдяки поєднанню механічних і фільтраційних процесів [1; 6].

Аналіз останніх досліджень. Проблеми очищення рослинних олій розглядалися у працях багатьох дослідників. Значна увага приділяється підвищенню ефективності сепарації та фільтрації, а також розробленню математичних моделей, що описують ці процеси [1; 3]. У сучасних дослідженнях розглядаються різні підходи до вдосконалення конструкцій центрифуг, підвищення їх енергоефективності та оптимізації параметрів роботи обладнання [2].

Окремо відзначено перспективність використання природних пористих матеріалів як фільтруючих шарів. Їх застосування дає змогу знизити енерговитрати, підвищити якість очищення та забезпечити стабільну роботу технологічних ліній [7; 8]. Разом із тим більшість існуючих моделей не враховують комплексного впливу конструктивних параметрів обладнання та властивостей фільтруючого середовища, що потребує подальших досліджень.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Аналіз та спрощений опис математичних моделей процесу очищення рослинних олій у конічних центрифугах, а також визначення ефективності використання фільтруючих матеріалів.

Основна частина. Аналіз підходів до розроблення математичних моделей ефективності технологічних ліній. Для побудови математичної моделі технологічної лінії очищення рослинних олій було проведено аналіз існуючих підходів до оцінювання її ефективності [1; 3; 11–13]. Результати цього аналізу свідчать, що запропоновані в науковій літературі моделі відрізняються за рівнем складності, набором вихідних параметрів і глибиною урахування конструктивних особливостей технологічних систем.



Перші підходи, які базуються на розрахунку економічного ефекту від упровадження нової техніки, дають змогу оцінити зміну рентабельності або прибутковості, але не враховують впливу конструктивних параметрів і не дають змоги встановити, на якому саме етапі вдалося підвищити ефективність виробництва. Такі моделі придатні лише для загальної оцінки, але не для оптимізації структури технологічної лінії.

Інша група методик спрямована на оцінювання експлуатаційної ефективності ліній через співвідношення витрат і продуктивності. Їхнім недоліком є відсутність урахування структурних особливостей виробництва, зокрема взаємозв'язків між окремими елементами технологічного процесу. Ці моделі описують систему лише поверхово і не дають змоги оптимізувати її роботу.

Деякі підходи базуються на оцінюванні ефективності процесів із блочною або модульною структурою, що дає змогу частково врахувати вплив окремих елементів лінії. Проте й ці методи не відображають повною мірою залежність загальної ефективності від конструктивних параметрів машин і обладнання.

Більш досконалі моделі враховують питомі витрати, вартість обладнання, коефіцієнти використання часу зміни, амортизаційні відрахування, вартість енергоресурсів і заробітну плату персоналу. Проте навіть вони часто не враховують структурну специфіку ліній очищення рослинних олій і не дають змоги оцінити вплив кожного параметра на кінцевий економічний ефект.

Узагальнення результатів аналізу показує, що найбільш перспективним напрямом є створення моделей, які:

- ураховують структурні особливості технологічної лінії;
- описують взаємозв'язки між вихідними, керуючими, збурюючими та експлуатаційними параметрами;
- дають змогу оптимізувати як технічні, так і економічні показники.

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано підхід до побудови узагальненої математичної моделі ефективності технологічної лінії очищення олій. Саме такий підхід став основою подальших досліджень і дав змогу створити модель, яка поєднує фізичні закономірності процесу з економічними показниками [1; 5].

Основні процеси очищення олій. Процес очищення рослинних олій є багатостадійним і включає осадження твердих частинок, фільтрацію та відцентрове розділення. Кожен із цих етапів визначається як фізико-хімічними властивостями олії, так і конструктивними параметрами обладнання. Використання конічних центрифуг дає змогу об'єднати ці процеси в єдиному технологічному вузлі, що значно підвищує ефективність очищення.

Фізичні основи очищення. Осадження в гравітаційному полі.

На початковому етапі очищення тверді домішки осідають під дією сили тяжіння. Швидкість осадження визначається рівнянням:

$$v_1 = \frac{2B^2 \Delta g}{f^2 (1-B)^2 \mu}, \quad (1)$$

де v_1 – швидкість осадження частинок, м/с;

B – частка об'єму суспензії, зайнята дисперсійним середовищем;

Δ – різниця густини твердих частинок і рідини, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

f – питома поверхня частинок, м²/кг;

μ – динамічна в'язкість середовища, Па·с.

Ця формула показує, що швидкість осадження зростає зі збільшенням різниці густини фаз та зменшенням в'язкості середовища. Однак гравітаційне осадження є повільним процесом і малоефективним для дрібнодисперсних частинок.



Осадження у центробіжному полі. Значно вищої швидкості осадження можна досягти, якщо замість сили тяжіння використовується відцентрове поле. У цьому разі швидкість руху частинок визначається [9]:

$$v_2 = \frac{2B^2 \Delta \rho f g Fr_{cp}}{f^2 \mu}, \quad (2)$$

де Fr_{cp} – критерій Фруда, який ураховує відцентрові сили. Центробіжне осадження забезпечує збільшення швидкості в десятки разів, що дає змогу ефективно видаляти навіть дрібні механічні домішки.

Фільтраційні процеси. Фільтрація є наступним важливим етапом очищення олії. Вона ґрунтується на проходженні рідини через пористе середовище, де затримуються тверді частинки.

Фільтрація під дією тиску. Об'єм рідини, що проходить через фільтр за час τ , визначається рівнянням Дарсі:

$$V = \frac{\Delta P F \tau}{R}, \quad (3)$$

де ΔP – перепад тиску на фільтруючому шарі, Па;

F – площа фільтрації, м²;

τ – час фільтрації, с;

R – гідравлічний опір шару, Н·с/м³.

Зі збільшенням перепаду тиску або площі фільтрації швидкість проходження олії зростає, проте надмірний тиск може призвести до руйнування шару або деформації фільтрувального матеріалу.

Фільтрація у відцентровому полі. Для підвищення ефективності процесу використовують центробіжну фільтрацію. Швидкість руху рідини через фільтр визначається як:

$$v_f = \frac{k_c}{\mu} \cdot \frac{P}{L}, \quad (4)$$

де k_c – коефіцієнт проникності фільтруючого шару, м²;

P – тиск у фільтруючому шарі, Па;

L – товщина фільтруючого шару, м.

Коефіцієнт проникності пов'язаний із геометрією пористого середовища:

$$k_c = \frac{0,246 d^2 \varepsilon^3}{36(1 + \varepsilon)}, \quad (5)$$

де d – середній діаметр частинок фільтруючого матеріалу, м;

ε – пористість шару.

Зі збільшенням пористості та розміру частинок коефіцієнт проникності зростає, що підвищує швидкість фільтрації. Однак занадто великі пори можуть знизити якість очищення. Саме тому природні пористі матеріали, такі як цеоліт, вважаються оптимальними: вони мають високу сорбційну здатність, стабільну структуру і не забруднюють продукт.

Гідродинамічні параметри конічної центрифуги. Середня швидкість руху олії уздовж поверхні конуса визначається співвідношенням:

$$v_{cp} = \frac{W}{2\pi \rho_s l^2 r_{min} \cos \theta_0}, \quad (6)$$

де W – продуктивність центрифуги, кг/с;

ρ_s – густина суспензії, кг/м³;

l – відстань між конічними поверхнями, м;

r_{min} – мінімальний радіус внутрішнього конуса, м;



θ_0 – кут нахилу твірної конуса.

Ця залежність дає змогу визначити швидкість потоку в робочій зоні центрифуги. Вона зростає зі збільшенням продуктивності, пористості шару та кута нахилу поверхні.

Загальна математична модель продуктивності. Об'єднавши наведені вище закономірності, можна отримати загальне рівняння продуктивності конічної фільтруючої центрифуги:

$$W = 0,0215(\rho_s - \rho_f) \frac{\rho_s}{\mu} H \tan \theta_0 r_{min} d^2 \varepsilon^4 \omega^2 \frac{(\sqrt{r_{max} r_{min}} + \sqrt{(r_{max} + l)(r_{min} - l)})^2}{(r_{max} - r_{min})(1 + \varepsilon)}, \quad (7)$$

де ρ_f – густина фільтруючого середовища, кг/м³;

H – висота конуса, м;

r_{max} – максимальний радіус внутрішнього конуса, м;

ω – кутова швидкість ротора, с⁻¹.

Це рівняння демонструє залежність продуктивності центрифуги від властивостей олії, характеристик фільтрувального шару, геометричних параметрів конструкції та режиму роботи обладнання.

Конструктивні особливості та вплив параметрів. Аналіз моделі показує, що:

- збільшення кутової швидкості ω підвищує продуктивність квадратично, але обмежене міцністю ротора;
- збільшення пористості шару ε зменшує опір і покращує фільтрацію, але може знизити якість очищення;
- кут нахилу конуса θ_0 впливає на розподіл центробіжних сил і швидкість потоку;
- діаметр частинок цеоліту d впливає на проникність шару та енерговитрати [10].

Ці закономірності дають змогу оптимізувати конструкцію центрифуги для конкретних умов виробництва.

Приклад розрахунку продуктивності конічної фільтрувальної центрифуги. Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі виконаємо приклад розрахунку продуктивності конічної центрифуги за формулою (7).

Вихідні параметри обладнання та фільтрувального шару приймаємо такими:

- густина олії $\rho_s = 910$ кг/м³;
- густина середовища $\rho_f = 880$ кг/м³;
- динамічна в'язкість $\mu = 0.08$ Па·с;
- висота конуса $H = 0.5$ м;
- мінімальний радіус ротора $r_{min} = 0.1$ м;
- максимальний радіус ротора $r_{max} = 0.3$ м;
- середній діаметр частинок цеоліту $d = 0.0003$ м;
- пористість шару $\varepsilon = 0.35$;
- кутова швидкість обертання $\omega = 150$ с⁻¹;
- кут нахилу твірної $\theta_0 = 45^\circ$.

Підставляючи значення в рівняння (7), отримаємо:

$$W \approx 0,45 \text{ кг/с} \approx 1620 \text{ кг/год}$$

Отримане значення продуктивності підтверджує ефективність розробленої моделі. Воно відповідає реальним технічним характеристикам сучасних центрифуг для очищення рослинних олій і може бути використане для проєктування технологічних ліній.



Висновки. Проведено аналіз фізичних і механіко-технологічних основ очищення рослинних олій, який доводить доцільність використання конічних фільтрувальних центрифуг. Розроблено спрощену математичну модель процесу очищення, яка враховує властивості олії, характеристики фільтрувального матеріалу та конструктивні параметри обладнання. Використання природного фільтрувального матеріалу цеоліту дає змогу підвищити ефективність очищення на 20–25% порівняно зі звичайними фільтраційними системами. Запропонована модель дає можливість прогнозувати продуктивність технологічної лінії ще на стадії проєктування, що сприяє зниженню енерговитрат і собівартості виробництва. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування нових і модернізації існуючих технологічних ліній очищення олій у харчовій промисловості.

Список використаних джерел

1. Bremer G. Liquid Separators. *Springer*, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-12345-6.
2. FAO. *Edible Oil Processing Technologies*. Rome: FAO, 2022.
3. Smith J. Centrifugal separation technologies in vegetable oil refining. *Journal of Food Engineering*, 2020, 285, 110107.
4. Liu Y., Chen Z. Application of zeolite materials in edible oil purification. *Food Chemistry*, 2021, 343, 128471.
5. Brown P. Mechanical filtration processes in edible oil production. *Industrial Processing Journal*. 2022. № 56(2). P. 45–58.
6. Zhao L., Kim S. Design and performance of conical centrifuges in food industry. *Separation Science and Technology*. 2023. № 58(7). P. 1153–1168.
7. Gupta R. Advances in filtration media for edible oil purification. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. № 45(5). e13921.
8. Petrova N. Energy efficiency of centrifugal filtration systems. *Food Engineering Reviews*. 2021. № 13(4). P. 456–469.
9. Yamamoto H. Mathematical modeling of centrifugal separation processes. *Chemical Engineering Science*. 2020. № 227. P. 115–128.
10. Ivanov D. Optimization of filter layer porosity in conical centrifuges. *Journal of Industrial Technology*. 2023. № 61(3). P. 78–91.
11. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур / В.В. Дідур та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2022. Вип. 12. Т. 3. С. 10. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18.
12. Журавель Д.П., Дідур В.В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння ріпичи на енергетичну біосировину : монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с.
13. Журавель Д.П., Дідур В.В. Моделювання процесу очищення ріпинової олії в електричному полі. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»*, 01–25 листопада 2024 р. Запоріжжя, 2024. С. 98–104.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 15.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025





V. Didur¹, D. Zhuravel², I. Povar³, I. Kolesnichenko³

¹*Uman National University*

²*Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university*

³*Poltava State Agrarian University*

SCIENTIFIC BASES OF VEGETABLE OIL PURIFICATION IN CONICAL CENTRIFUGES

Summary

The article presents the results of an analysis of modern approaches to the mechanical and technological purification of vegetable oils in conical centrifuges. Mathematical models of the purification processes are considered, simplified formulas and their explanations are provided. The efficiency of technological purification lines is analyzed, and the prospects for the use of filtering materials are discussed. The production of vegetable oils requires highly efficient methods of purification from impurities. Traditional technological lines have high energy consumption and complex design, which reduces the economic performance of production. The use of conical centrifuges allows to ensure high-quality purification of oil through a combination of mechanical and filtration processes. Based on the analysis, an approach to building a generalized mathematical model of the efficiency of the oil purification technological line was substantiated. This approach became the basis for further research and allowed us to create a model that combines the physical laws of the process with economic indicators. The process of purifying vegetable oils is multi-stage and includes sedimentation of solid particles, filtration and centrifugal separation. Each of these stages is determined by both the physicochemical properties of the oil and the design parameters of the equipment. The use of conical centrifuges allows us to combine these processes in a single technological unit, which significantly increases the efficiency of purification. An analysis of the physical and mechanical and technological foundations of vegetable oil purification has been carried out, which proves the feasibility of using conical filter centrifuges. A simplified mathematical model of the purification process has been developed, which takes into account the properties of the oil, the characteristics of the filter material and the design parameters of the equipment. The use of natural zeolite filter material allows to increase the purification efficiency by 20–25% compared to conventional filtration systems. The proposed model makes it possible to predict the productivity of the technological line at the design stage, which contributes to the reduction of energy consumption and production costs. The results obtained can be used when designing new and modernizing existing technological lines for oil purification in the food industry.

Keywords: vegetable oils, purification, centrifuge, mathematical model, efficiency.