

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-16>

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

Є. А. Петриченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1037-077X

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

e-mail: didur.vv@gmail.com

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНІЧНОЇ ЦЕНТРИФУГИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ

Анотація. У статті розглянуто питання вдосконалення технологічного процесу очищення рослинних олій шляхом використання конічної фільтрувальної центрифуги. Наведено аналіз існуючих методів і засобів механічного очищення олій, виявлено їхні недоліки та обґрунтовано доцільність застосування конічних центрифуг як ефективних апаратів для очищення. Розглянуто основні фізичні та технологічні процеси, що відбуваються під час фільтрації та відцентрового розділення, а також викладено принципи побудови математичних моделей, які описують ці процеси. Показано переваги використання природних фільтрувальних матеріалів, зокрема цеолітів, для підвищення якості очищення.

Ключові слова: рослинна олія, фільтрація, конічна центрифуга, очищення, математична модель, цеоліт.

Постановка проблеми. Очищення рослинних олій є однією з ключових операцій технологічного процесу їх виробництва [1]. Від якості очищення залежать фізико-хімічні властивості продукту, його стабільність під час зберігання та можливість подальшого використання у харчовій промисловості [2]. Сучасні технологічні лінії очищення часто характеризуються складною структурою, великою кількістю обладнання, високою енергоємністю та значними експлуатаційними витратами.

Традиційні фільтрувальні установки мають обмеження щодо продуктивності та не завжди забезпечують необхідний рівень очищення, особливо у випадках, коли в олії містяться дрібнодисперсні частинки. У зв'язку із цим виникає потреба в удосконаленні технологічних засобів очищення, які дають змогу підвищити ефективність процесу та зменшити витрати ресурсів.

Аналіз останніх досліджень. Проблемам очищення рослинних олій присвячено значну кількість досліджень, у яких розглядаються як фізико-хімічні основи процесів фільтрації та відцентрового розділення, так і конструктивні особливості обладнання [1; 3]. Сучасні підходи орієнтовано на створення компактних, енергоефективних та високопродуктивних машин, які здатні забезпечити стабільну якість очищеного продукту.

Одним із перспективних напрямів розвитку є застосування конічних центрифуг, що поєднують процеси осадження та фільтрації в єдиному апараті [3; 6]. Використання таких пристроїв дає змогу істотно підвищити швидкість очищення, зменшити витрати енергії та скоротити кількість допоміжного обладнання [5; 8].

Дослідження показують, що застосування природних пористих матеріалів, таких як цеоліти, у фільтрувальних шарах дає можливість поліпшити якість очищення, збільшити ресурс роботи обладнання та знизити собівартість продукції [4; 7].



Формулювання мети статті (постановка завдання). Аналіз основних механіко-технологічних процесів, що відбуваються під час очищення рослинних олій, та обґрунтування доцільності застосування конічної фільтрувальної центрифуги.

У статті розглянуто принципи побудови математичних моделей процесів фільтрації та відцентрового розділення, наведено методичні підходи до оптимізації конструктивних параметрів апарата, а також оцінено вплив фільтрувальних матеріалів на якість очищення.

Основна частина. Загальні принципи роботи конічної фільтрувальної центрифуги. Конічна фільтрувальна центрифуга є апаратом безперервної дії, призначеним для розділення неоднорідних систем, зокрема рослинних олій, що містять механічні домішки. Її робота ґрунтується на поєднанні процесів фільтрації та відцентрового розділення, що відбуваються під впливом центробіжних сил у полі високих прискорень. Це дає змогу значно скоротити час очищення, зменшити втрати продукту та підвищити якість кінцевої олії [1; 11; 12].

Принцип дії апарата полягає у тому, що під час обертання ротора створюється поле відцентрових сил, яке в десятки та сотні разів перевищує силу тяжіння. Під його дією тверді домішки, що мають більшу густину, переміщуються до периферії барабана, тоді як очищена олія спрямовується до вихідного отвору.

На відміну від традиційних циліндричних центрифуг конічна форма дає змогу створювати плавну зміну гідродинамічних умов уздовж потоку, що зменшує турбулентність і підвищує ефективність фільтрації [2].

Фізичні основи процесу очищення. Осадження домішок у гравітаційному та відцентровому полі. Початкове видалення домішок із рослинної олії може відбуватися за рахунок гравітаційного осадження. Швидкість осідання частинок визначається за формулою Стокса [9]:

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

де v_1 – швидкість осадження частинок, м/с;

B – частка об'єму суспензії, зайнята рідиною;

Δ – різниця густини домішок і рідини, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

f – питома поверхня частинок, м²/кг;

μ – динамічна в'язкість, Па·с.

Однак через низьку швидкість процес гравітаційного осадження малоефективний для дрібнодисперсних частинок. Значного прискорення можна досягти, якщо замінити гравітаційне поле на поле відцентрових сил. У цьому разі швидкість руху частинок визначається:

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

де Fr_{cp} – середній критерій Фруда, що характеризує дію відцентрових сил.

Це дає змогу збільшити швидкість осадження у десятки разів, забезпечуючи ефективне видалення навіть найдрібніших твердих частинок.

Гідродинаміка процесу фільтрації. Закономірності фільтрації у пористому середовищі.

Фільтрація відбувається під час проходження олії через пористий фільтрувальний шар, де тверді частинки затримуються на поверхні або всередині шару. Об'єм рідини, що проходить через фільтр за час τ , описується 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.

Для конічної центрифуги фільтрація здійснюється під дією відцентрових сил. Швидкість фільтрації визначається так:

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

де k_c – коефіцієнт проникності шару, м²;

P – тиск у шарі, Па;

L – товщина шару, м.

Коефіцієнт проникності залежить від пористості шару та розміру частинок фільтрувального матеріалу:

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

де d – середній діаметр частинок фільтруючого матеріалу, м;

ε – пористість шару.

Згідно з формулою (5), збільшення пористості шару підвищує його проникність і покращує фільтрацію, проте надмірна пористість може знизити якість очищення, тому важливим є оптимальний вибір матеріалу фільтрувального шару. Практика показує, що цеоліти мають високу сорбційну здатність, стабільну структуру та не забруднюють продукт, що робить їх одним із найефективніших матеріалів для очищення рослинних олій [4].

Гідродинамічні параметри конічної центрифуги. Середня швидкість руху олії вздовж поверхні конуса визначається рівнянням:

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

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 олії у робочій зоні центрифуги. Вона зростає зі збільшенням продуктивності, пористості шару та кута нахилу поверхні.

Загальна математична модель продуктивності. Узагальнюючи наведені залежності, можна записати рівняння продуктивності конічної фільтрувальної центрифуги у вигляді:

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

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.

Формула (7) показує, що продуктивність центрифуги суттєво залежить від фізичних властивостей олії, параметрів фільтрувального шару, геометричних розмірів апарата та швидкості його обертання. Зокрема, підвищення кутової швидкості ω збільшує продуктивність квадратично, тоді як зростання пористості шару ε покращує проникність, але може впливати на якість очищення.

На рис. 1 показано траєкторію руху олії від моменту подачі у центральну частину ротора до виходу через периферійні канали. Тверді частинки осідають на стінках під дією відцентрової сили, тоді як очищена олія рухається вгору і відводиться через вихідні отвори. Конічна форма барабана забезпечує плавну зміну швидкості потоку та рівномірний розподіл частинок.

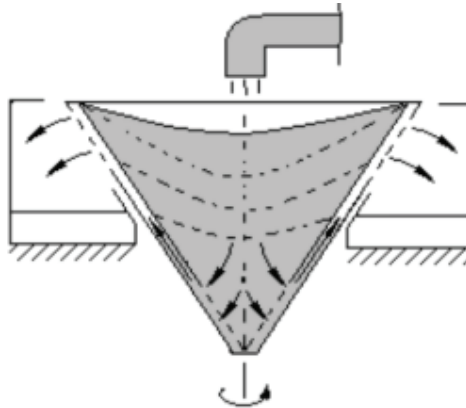


Рис. 1. Схема руху олії у конічній фільтрувальній центрифугі

Конструктивні особливості конічної фільтрувальної центрифуги. Складається з низки основних вузлів, кожен із яких виконує важливу функцію у процесі очищення олії:

- Барабан (ротор) – основний елемент, що обертається з великою швидкістю та створює відцентрове поле. Конічна форма барабана забезпечує рівномірний розподіл навантаження та стабільність потоку рідини.
- Фільтрувальний шар – розміщений на внутрішній поверхні барабана шар пористого матеріалу (цеоліту), який затримує дрібні механічні домішки. Його товщина, гранулометричний склад і пористість суттєво впливають на швидкість та якість очищення.
- Подаючий патрубок – канал, через який забруднена олія надходить у центрифугу. Конструкція патрубку має забезпечувати рівномірний розподіл потоку без турбулентних зон.
- Вихідні канали для очищеної олії – розташовані у верхній частині барабана й забезпечують відведення фільтрованого продукту.
- Механізм видалення осаду – спеціальна система для автоматичного або періодичного видалення накопичених домішок із внутрішньої поверхні барабана.

На рис. 2 показано основні елементи апарата: барабан конічної форми, фільтрувальний шар із цеоліту, подаючий патрубок, канали для очищеної олії та механізм видалення осаду. Стрілками позначено напрямки руху олії та розподіл відцентрових сил.

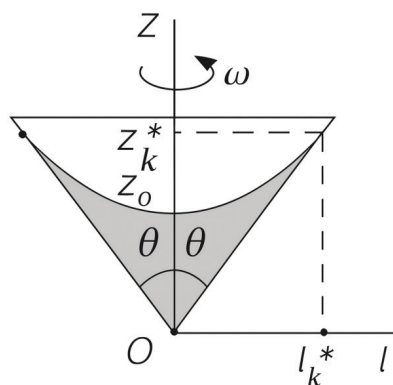


Рис. 2. Схема конструкції конічної фільтрувальної центрифуги

Перевага такої конструкції полягає у поєднанні двох процесів – фільтрації та відцентрового розділення – в одному апараті. Це дає змогу зменшити габарити технологічної лінії, скоротити кількість допоміжного обладнання та підвищити загальну ефективність процесу.

Вплив конструктивних параметрів на ефективність роботи. На ефективність роботи конічної центрифуги впливають такі ключові параметри:

- Кутова швидкість обертання ω – впливає на інтенсивність відцентрового поля. Підвищення ω збільшує швидкість осадження частинок і продуктивність апарата, однак надмірне значення може призвести до перевантаження та зношування механізмів.

- Кут нахилу твірної θ_0 – визначає гідродинаміку потоку. Зі збільшенням кута покращується рух рідини вздовж поверхні конуса, але надто великий кут може призвести до зниження ефективності осадження.

- Пористість шару ε – впливає на проникність фільтруючого шару. Оптимальне значення забезпечує високу швидкість фільтрації без утрати якості очищення [10].

- Діаметр частинок фільтрувального матеріалу d – визначає розмір пор у шарі. Надто великі частинки знижують якість очищення, а занадто дрібні – зменшують швидкість фільтрації.

- Висота конуса H та радіуси r_{max}, r_{min} – впливають на об'єм робочої зони та час перебування рідини в апараті.

На графіку (рис. 3) показано залежності продуктивності апарата від кутової швидкості, пористості шару та діаметра частинок фільтрувального матеріалу. Видно, що за збільшення ω продуктивність зростає квадратично, а надто велика пористість призводить до зниження якості очищення.

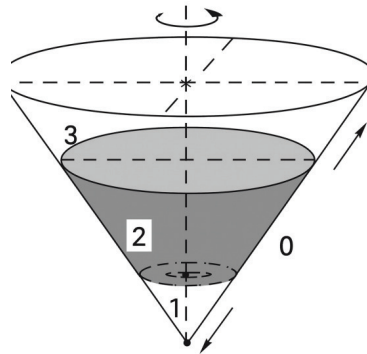


Рис. 3. Вплив конструктивних параметрів на ефективність роботи центрифуги

Приклад розрахунку продуктивності. Для підтвердження адекватності математичної моделі розглянемо приклад розрахунку продуктивності центрифуги за формулою (7).

Прийmemo такі вихідні дані:

- $\rho_s = 910 \text{ кг/м}^3$ – густина олії;
- $\rho_f = 880 \text{ кг/м}^3$ – густина середовища;
- $\mu = 0.08 \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамічна в'язкість;
- $H = 0.5 \text{ м}$ – висота конуса;
- $r_{min} = 0.1 \text{ м}$ – мінімальний радіус ротора;
- $r_{max} = 0.3 \text{ м}$ – максимальний радіус ротора;
- $d = 0.0003 \text{ м}$ – середній діаметр частинок цеоліту;
- $\varepsilon = 0.35$ – пористість шару;
- $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ – кутова швидкість обертання;
- $\theta_0 = 45^\circ$ – кут нахилу твірної.

Підставивши ці значення у (7), отримаємо:

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

Отримана продуктивність відповідає технічним параметрам промислових центрифуг і підтверджує правильність математичної моделі. Це дає змогу використовувати її для проектування нових апаратів і модернізації існуючих систем очищення рослинних олій [2; 3].

Висновки. Проведено аналіз механіко-технологічних засад процесу очищення рослинних олій та встановлено доцільність застосування конічних фільтрувальних центрифуг, які дають змогу об'єднати процеси фільтрації та відцентрового розділення в одному апараті.

Розроблено узагальнену математичну модель продуктивності центрифуги, яка враховує фізичні властивості олії, параметри фільтрувального шару, геометричні характеристики апарата та режим його роботи.

Доведено, що кутова швидкість, пористість шару, кут нахилу конуса та розміри частинок фільтрувального матеріалу є ключовими чинниками, які визначають ефективність процесу очищення.

Використання природних цеолітів як фільтрувального матеріалу дає змогу підвищити якість очищення та стабільність роботи центрифуги без збільшення енерговитрат.

Наведений приклад розрахунку підтверджує працездатність математичної моделі й демонструє можливість її застосування на етапах проектування та модернізації технологічних ліній очищення олій у харчовій промисловості.

Отримані результати можуть бути використані для створення високопродуктивних, енергоефективних та надійних установок, що відповідають сучасним вимогам до якості харчових продуктів.

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), 45–58.
6. Zhao L., Kim S. Design and performance of conical centrifuges in food industry. *Separation Science and Technology*, 2023, 58(7), 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), 456–469.
9. Yamamoto H. Mathematical modeling of centrifugal separation processes. *Chemical Engineering Science*, 2020, 227, 115–128.
10. Ivanov D. Optimization of filter layer porosity in conical centrifuges. *Journal of Industrial Technology*, 2023, 61(3), 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.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 15.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025





V. Didur¹, D. Zhuravel², I. Povar³, I. Petrychenko¹

¹*Uman National University*

²*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

³*Poltava State Agrarian University*

THEORETICAL BASIS OF CALCULATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A CONICAL CENTRIFUGE FOR PURIFICATION OF VEGETABLE OILS

Summary

The article addresses the improvement of the technological process of vegetable oil purification through the use of a conical filtering centrifuge. An analysis of existing methods and means of mechanical oil purification is provided, their drawbacks are identified, and the feasibility of using conical centrifuges as effective purification devices is substantiated. The main physical and technological processes occurring during filtration and centrifugal separation are examined, and the principles of constructing mathematical models describing these processes are outlined. The advantages of using natural filtering materials, particularly zeolites, to improve purification quality are demonstrated. The mechanical and technological principles of the vegetable oil purification process have been analyzed and the feasibility of using conical filter centrifuges, which allow combining the filtration and centrifugal separation processes in one apparatus, has been established. A generalized mathematical model of centrifuge performance has been developed, which takes into account the physical properties of the oil, the parameters of the filter layer, the geometric characteristics of the apparatus and its operating mode. It has been proven that the angular velocity, porosity of the layer, the angle of inclination of the cone and the particle size of the filter material are key factors that determine the efficiency of the purification process. The use of natural zeolites as a filtering material makes it possible to improve the quality of purification and the stability of the centrifuge without increasing energy consumption. The given calculation example confirms the efficiency of the mathematical model and demonstrates the possibility of its application at the stages of design and modernization of technological lines for oil purification in the food industry. The results obtained can be used to create highly productive, energy-efficient and reliable installations that meet modern requirements for the quality of food products.

Keywords: vegetable oil, filtration, conical centrifuge, purification, mathematical model, zeolite.