

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-4>

УДК 665.335.2:519.6

Д. П. Журавель<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6100-895X

В. В. Дідур<sup>2</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-7584-5073

Я. В. Білоконь<sup>3</sup>, аспірант

ORCID: 0009-0003-4510-2780

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Уманський національний університет<sup>3</sup>Полтавський державний аграрний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОГО ВИЛУЧЕННЯ ОЛІЇ З НАСІННЯ РИЦИНИ

*Анотація.* У статті розглянуто питання оцінювання математичної моделі процесу механічного вилучення олії з насіння рицини. Дослідження проводились з використанням теорії консолідації пористих середовищ та закону фільтрації рідин, а визначення можливостей її застосування для пресів безперервної дії. Експериментальні випробування проводилися з використанням переривчастого та безперервного механічних пресів при різних температурних і силових режимів. У ході роботи встановлено, що проникність твердої структури насіння істотно впливає на ефективність екстракції, а підвищення температури сприяє інтенсифікації процесу завдяки зменшенню в'язкості олії.

*Ключові слова:* математична модель, насіння рицини, механічне пресування, екстракція, фільтрації рідин, консолідація пористих середовищ.

*Постановка проблеми.* Механічне пресування залишається одним із найбільш поширених способів отримання рослинної олії, проте його ефективність часто обмежується значними втратами продукту в макусі та недостатньою оптимізацією режимів роботи обладнання. Попри наявність численних досліджень, спрямованих на вдосконалення геометрії пресів, параметрів процесу та попередньої підготовки сировини, значна частина цих підходів базується переважно на емпіричних даних, а не на глибокому теоретичному аналізі фізичних явищ, що супроводжують екстракцію. Сучасні математичні моделі, побудовані із використанням теорії консолідації та законів руху рідин у пористих середовищах, потребують додаткової перевірки щодо їх відповідності реальним умовам роботи пресового обладнання. У зв'язку з цим виникає наукова задача оцінювання адекватності таких моделей і визначення можливості їх застосування для прогнозування продуктивності пресів безперервної дії, що є важливим кроком до підвищення економічної ефективності виробництва рослинної олії.

*Аналіз останніх досліджень.* Процес вилучення олії з насіння рицини може реалізовуватися двома основними способами: механічним пресуванням або хімічною екстракцією із застосуванням розчинників. Механічний метод характеризується відносною простотою технологічної організації порівняно з розчинниковим, однак поступається йому за рівнем вилучення олії через наявність її залишків у твердому шроті [1–5].

З метою підвищення результативності пресування було проведено значну кількість досліджень [6–10]. У більшості випадків увага зосереджувалася на трьох ключових напрямках: удосконаленні технологічних режимів роботи обладнання, оптимізації конструктивних параметрів пресів, а також застосуванні попередньої підготовки насінневої сировини.



Водночас чимало наукових робіт базуються переважно на практичних підходах і емпіричних спостереженнях, що часто спираються на досвід та інтуїтивні рішення, а не на комплексне теоретичне обґрунтування фізичних процесів, які супроводжують екстракцію [11–14].

Протягом останніх п'ятнадцяти років з'явилися дослідження, присвячені створенню імітаційних моделей вилучення олії з різних видів насіння [15–18]. Теоретичною основою частини таких моделей стало поєднання положень теорії консолідації насичених середовищ, запропонованої К. Терцагі у 1943 році, та закону Дарсі, що описує рух рідин крізь пористі структури [19–21].

Разом із тим окремі припущення цих моделей не повністю узгоджуються з реальною поведінкою матеріалу під час пресування. З урахуванням цього Баргале та його колеги розробили математичний опис процесу, спрямований на зменшення розбіжностей між теоретичними розрахунками та фактичними явищами. Запропонована модель містить низку математичних залежностей, що дозволяють точніше відобразити процес механічного вилучення рослинної олії [22, 23].

*Формулювання мети статті.* Метою даного дослідження стало відтворення експерименту Баргале для насіння рицини із застосуванням механічного преса переривчастого типу.

*Основна частина.* Після впровадження математичного апарату результати моделювання було адаптовано до умов роботи преса безперервної дії, конструктивно подібного до промислових установок більшої потужності. Передбачається, що використання такої моделі може сприяти вдосконаленню конструкції обладнання та підвищенню його продуктивності.

Для проведення експериментальних досліджень було обрано високоолійний сорт насіння рицини. Отримані результати є складовою ширших досліджень, спрямованих на оцінювання перспектив формування енергетичного ланцюга виробництва рицинової олії в аграрному секторі. У цьому контексті механічна екстракція розглядається як важливий етап отримання продукту, що може використовуватися як паливо для електрогенераторів або як сировина для виробництва біодизеля.

Варто зазначити, що економічна доцільність усього виробничого циклу значною мірою визначається рівнем продуктивності обладнання та ефективністю процесу вилучення олії.

Основне припущення даного експериментального дослідження полягає в тому, що під час механічного вилучення олії процес ущільнення насіння за своєю природою подібний до консолідації однорідних насичених ґрунтів, які перебувають під дією аналогічного механічного навантаження. У низці експериментальних досліджень [1, 2] Баргейл продемонстрував перспективні результати, використовуючи цей підхід для аналізу періодичного процесу екстракції олійної сировини.

Механізми, що визначають функціонування такої системи, описуються положеннями теорії Терцагі. Відповідно до неї, у разі прикладання стискального зусилля до насиченого середовища з невисокою проникністю спостерігається різке підвищення тиску рідини в поровому просторі. Надалі цей тиск поступово зменшується, що пояснюється витісненням рідини через пористу структуру матеріалу [3].

Крім того, теорія передбачає, що коливання порового тиску прямо пов'язані зі зміною гідравлічного градієнта, тобто є пропорційними до нього [1,2,10]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c \frac{\partial u^2}{\partial z^2}, \quad (1)$$

де  $u$  – тиск рідини в межах ущільненого середовища;

$z$  – координата або глибина розташування шару матеріалу;

$t$  – тривалість дії стискального навантаження;

$c$  – коефіцієнт консолідації ущільненого середовища, який визначається за наступним співвідношенням:



$$c = \frac{k}{m_v \rho_f}, \quad (2)$$

де  $\rho_f$  – питома густина олії;

$m_v$  – коефіцієнт об'ємної деформації матеріалу;

$k$  – коефіцієнт проникності пористого середовища, що визначається за відповідною залежністю:

$$k = \frac{QH}{\Delta h A_d}, \quad (3)$$

де  $Q$  – інтенсивність фільтрації рідини, тобто її витрата крізь пористе середовище;

$H$  – висота шару матеріалу;

$\Delta h$  – перепад тиску під час проходження рідини через середовище;

$A_d$  – ефективна площа дренажування.

Водночас коефіцієнт об'ємної зміни  $m_v$  визначається за такою залежністю:

$$m_v = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dU} = -\frac{1}{H} \frac{dH}{dU} = \frac{d\varepsilon_z}{d\sigma_z}, \quad (4)$$

де  $V$  – об'єм досліджуваного зразка;

$dU$  – приріст прикладеного тиску;

$d\varepsilon_z$  – зміна вертикальної деформації за умов одновісного стискування;

$d\sigma_z$  – приріст вертикального напруження, що виникає під час одновісного навантаження.

Окрім положення теорії Терцагі щодо консолідації ґрунтів можуть бути застосовані до насінневого матеріалу лише з певними обмеженнями. Зокрема, у процесі стискування насіння початкові деформації зумовлені передусім структурною перебудовою твердого каркаса та видаленням повітря з міжзернового простору [1].

Отже, припущення про повністю насичену систему, яка характеризується наявністю лише рідкої фази, стає справедливим лише після початкового етапу ущільнення, коли олія заповнює порожнини, що утворилися внаслідок витіснення повітря.

Рух рідини крізь пористу структуру, а відповідно і процес екстракції олії з насіння, описується законом Дарсі:

$$q = \frac{Q}{A_o} = \frac{k}{\rho_f} \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (5)$$

де  $q$  – інтенсивність потоку рідини;

$\partial u / \partial z$  – гідравлічний градієнт, що характеризує зміну тиску по глибині середовища [2, 9].

У результаті теоретичних узагальнень і послідовних математичних перетворень [2] було отримано залежність, яка дає змогу оцінити об'єм олії ( $Ves$ ), що виділяється під час екстракції в установці з циліндричною камерою. У такій системі стискування насіння здійснюється поршнем, який створює зовнішній тиск  $U$ :

$$Ves(f) = B_0 \left( \int_0^k k(t) e^{-\partial_p f} dt \right), \quad (6)$$

в якому:

$$B_0 = \frac{2A_o U}{\rho_f H}; \quad (7)$$

$$B_1 = \left( \frac{\pi}{2H} \right)^2, \quad (8)$$

де  $B_0$  та  $B_1$  сталі коефіцієнти. Варто підкреслити, що у своїх розрахунках Баргейл застосовує довільно задане та змінне значення нижньої межі інтегрування часу ( $t_{int}$ ).

Визначення об'єму видобутої олії відповідно до рівняння (6) потребує аналізу часової зміни параметрів  $k$  і  $c$ . У процесі екстракції їх варіації зумовлені передусім трансформацією структури твердого каркаса матеріалу, що відбувається під впливом стискального навантаження.

Експериментальні дослідження виконувалися із застосуванням двох типів механічного обладнання для вилучення олії з насіння олійних культур. На першому етапі використовувався прес періодичної дії, за допомогою якого здійснювалися вимірювання з метою визначення основних фізичних параметрів сировини –  $k$ ,  $c$ ,  $m_v$  та  $\rho_f$ , що надалі були використані під час побудови математичної моделі.

На наступному етапі розроблену модель апробували на пресі безперервного типу, який також був залучений до експериментальної програми. Для всіх випробувань застосовували насіння ріцини високооїйного сорту з масовою часткою олії 41,3 %. Вологість дослідного матеріалу підтримувалася в межах 5–6 %, що забезпечувало стабільність умов проведення експерименту.

*Переривчастий механічний прес.* Установка періодичної екстракції представлена механічним пресом, обладнаним горизонтально розташованою циліндричною камерою, в межах якої переміщуються два поршні, встановлені назустріч один одному (рис. 1). Їх робота забезпечувалась подачею робочої рідини під тиском у гідравлічній системі. Керування процесом здійснювалось через панель управління, яка контролює функціонування поршневого насоса, який приводився в рух електродвигуном потужністю 3 кВт.



Рис. 1. Поздовжній переріз механічного преса періодичної дії

Камера пресування, з якої відводилась отримана олія, відповідав діаметру 120 мм та довжині 60 мм. На її зовнішній поверхні передбачено систему отворів для дренажування, розміщених лінійно, при цьому сумарна площа відведення рідини ( $A_d$ ) становила 22 608 мм<sup>2</sup>. У процесі стискання ефективна площа зливу змінювалась, оскільки вона залежить від відстані між поршнями. Тому під час моделювання використовувались усереднені значення площі, визначені між початковим положенням поршнів із максимальною дистанцією та кінцевим станом, коли вона є мінімальною. Граничний тиск, що передається на насіння в межах камери пресування, може досягати 45 МПа.

Контроль тиску здійснювався за допомогою високоточного манометра, інтегрованого в гідравлічну систему преса. Для реєстрації переміщення поршнів використовувався ноніус із точністю вимірювання 0,1 мм, встановлений на бічній частині обладнання паралельно їхнім штокам.

Завантаження насіння до зони пресування відбувалось через приймальну лійку, після чого матеріал розміщувався у просторі між двома поршнями. Кожен із них приводився в дію автономно через систему керування, розташовану на приладовій панелі.

Під камерою стискання передбачено похилу площину для відведення отриманої олії, яка спрямовується до спеціальної ємності, де здійснюється її подальше зважування.

*Механічний прес безперервної дії.* Прес безперервної дії, що застосовувався під час дослідження, є зменшеною моделлю промислових установок і відтворює їх конструктивні особливості та принцип функціонування. В склад агрегату входять електродвигун потужністю 4 кВт, ремінна передача зі шківками, корпус із вбудованою камерою пресування, а також вузли для відведення твердого залишку та збирання отриманої олії.

Середня продуктивність обладнання при переробці насіння ріцини становить приблизно 46,2 кг/год. Сировина подавалась до невеликого завантажувального бункера, під яким розміщено шнековий транспортер із кроком ( $f$ ) 30 мм, що забезпечує її поступове переміщення в зону стискання.

Паралельно до шнека встановлено вісім сталевих напрямних довжиною по 200 мм, розташованих циліндрично та вмонтованих у чавунний корпус. На одному кінці шнека передбачено кривошипний механізм, тоді як на протилежному закріплена сталева пресувальна головка обтічної форми, яка обертається всередині циліндричної камери.

Проміжок між пресувальною головкою та внутрішньою поверхнею камери формує зону стискання діаметром 70 мм і довжиною 120 мм. Обертання кривошипа спричиняє осьове переміщення шнека, що, своєю чергою, змінює положення пресувальної головки в камері. Завдяки наявності нерухомого кільцевого упора в кінцевій частині камери відбувається поступове зменшення її робочого об'єму, що супроводжується зростанням тиску на насіння (рис. 2).

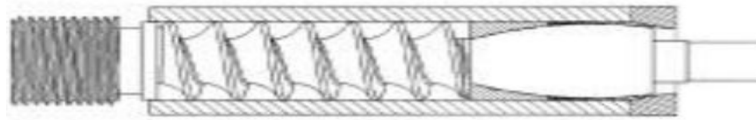


Рис. 2. Поздовжній переріз механічного преса безперервного типу

Процес ущільнення розпочинається тоді, коли зазор між головкою та стінкою камери стає меншим за середню товщину насінин ріцини. У міру переміщення матеріалу вздовж пресувальної головки тверда структура додатково ущільнюється, досягаючи кінцевої товщини близько 1,5 мм.

З урахуванням того, що довжина ділянки камери, де безпосередньо відбувається стискання ( $l_c$ ), дорівнює 28,2 мм, а частота обертання шнека ( $v_{rc}$ ) становить 2 об/хв, можна визначити середню тривалість стиснення насіння ( $t_{cp}$ ):

$$t_{cp} = \frac{l_c}{v_{rc}} = \frac{l_c}{v_{rc} \cdot f}, \quad (9)$$

де  $v_{lc}$  – лінійна швидкість переміщення шнека, що фактично відповідає швидкості транспортування насіння через пресову установку. Використовуючи значення зазначених параметрів, середній час перебування матеріалу в зоні стискання ( $t_{cp}$ ) можна оцінити приблизно у 0,47 с.

Виділена олія відводиться через торцеві дренажні канали камери пресування, після чого проходить очищення крізь систему послідовно розташованих металевих сіток. Далі продукт надходить до приймальної ємності, де здійснюється його зважування. Твердий залишок виводиться з протилежної частини агрегату, переміщується похилою металевою поверхнею та накопичується у спеціальному контейнері.

Конструкція преса передбачає наявність підігрівальної системи на основі електричних нагрівальних елементів, робота яких контролюється термостатом. Нагрівальний контур охоплює шнек і камеру стискання, забезпечуючи необхідний температурний режим процесу.



У міру переміщення пресувальної головки вздовж внутрішньої поверхні камери відбувається поступове підвищення тиску на насінневий матеріал. Така особливість конструкції ускладнює безпосереднє вимірювання цього параметра під час роботи обладнання. У зв'язку з цим величину тиску екстракції визначали опосередковано – шляхом порівняльного аналізу ефективності роботи преса періодичної дії, де тиск фіксується високоточним манометром, та преса безперервного типу.

Отже, було прийнято припущення, що за однакових значень ефективності екстракції ( $\eta_e$ ), яка визначається відношенням маси отриманої олії до маси завантаженої сировини, середній тиск, створюваний обома установками, можна вважати еквівалентним. Такий параметр отримав назву еквівалентного тиску екстракції ( $U_{eq}$ ).

*Випробування екстракції на переривчастому механічному пресі.* Фізичні характеристики матеріалу, що враховувались під час математичного моделювання процесу вилучення олії ( $k$ ,  $c$ ,  $m_v$ ,  $\rho_f$ ), були визначені на основі спеціалізованих вимірювань, виконаних у ході експериментів із використанням преса періодичної дії.

Експериментальна програма передбачала поєднання двох температурних режимів екстракції ( $T_1 = 30^\circ\text{C}$  та  $T_2 = 60^\circ\text{C}$ ) із трьома рівнями прикладеного тиску ( $U_1 = 250$  бар,  $U_2 = 350$  бар,  $U_3 = 450$  бар). У результаті було сформовано шість варіантів умов проведення досліджень.

У кожному експерименті застосовували зразок насіння масою ( $S_m$ ) 300 г, що відповідало робочому об'єму камери пресування. Після завантаження матеріалу за допомогою ноніуса визначали початкову висоту шару ( $H_i$ ). Процес екстракції здійснювали за трьох значень тривалості стискання ( $t_{cp}$ ) – 5, 10 і 20 секунд – із п'ятиразовим повторенням для кожного режиму. Після завершення заданого інтервалу поршень розвантажували, і виділена олія протягом кількох хвилин відводилася через дренажну систему в розташовану нижче приймальну ємність.

Перед початком кожної серії дослідів прес виводили на номінальний робочий режим шляхом виконання кількох попередніх циклів екстракції. Додаткові випробування дали змогу встановити оптимальну швидкість відведення олії, перевищення якої не призводило до помітного збільшення об'єму зібраного продукту. Саме цей часовий інтервал було прийнято, як стандартний для всіх експериментів.

Зміна коефіцієнта проникності  $k$  часі, відповідно до даних Баргейла [1], визначалася для кожного повторення з використанням співвідношення (10), отриманого на основі залежності (3):

$$k(t) = \frac{V_0}{t_{cp}} \frac{H_t}{\Delta h A_{cf}}, \quad (10)$$

де  $\Delta h$  відповідає тиску екстракції ( $U_e$ ), який визначався з урахуванням густини олії, а  $V_0$  – об'єм олії, отриманої з преса періодичної дії протягом інтервалу стискання  $t_{cp}$ .

Після цього для кожного режиму експерименту обчислювали усереднені значення коефіцієнта проникності  $k$ , використовуючи результати окремих повторень. Подібним чином в межах тих самих досліджень визначали параметри, необхідні для розрахунку середнього коефіцієнта об'ємної деформації  $m_v$ . Його значення встановлювали відповідно до залежності (11), отриманої на основі співвідношення (4):

$$m_v = \frac{H_i - H_f}{H_i \cdot U_e}, \quad (11)$$

де  $H_f$  – кінцева товщина шару залишкового шроту насіння рицини після завершення процесу стискання.

Густину олії ( $\rho_f$ ) визначали експериментально із застосуванням пікнометра. Параметр, необхідний для подальших розрахунків у математичній моделі, встановлювали як середні арифме-



тичні значення  $\rho_f$ , які отримали під час вимірювань зразків, відібраних у кожному повторенні експерименту.

*Випробування екстракції на безперервному механічному пресі.* Ключовим показником ефективності роботи преса безперервної дії є вихід екстракції ( $\eta_e$ ), що визначається як відношення маси отриманої олії ( $O_e$ ) до маси насінневої сировини ( $S_m$ ), поданої на переробку:

$$\eta_e = \frac{O_e}{S_m}. \quad (12)$$

Для встановлення значення виходу екстракції ( $\eta_e$ ) було виконано п'ять експериментальних досліджень, у кожному з яких використовували по 100 кг насіння соняшнику з масовою часткою олії 41,3 %. У процесі випробувань масу переробленої сировини, отриманої олії та залишкової макухи визначали за допомогою високоточних ваг із похибкою вимірювання 0,5 г.

Додатково фіксували тривалість екстракційного процесу, а температуру олії на виході з камери пресування безперервно контролювали за допомогою термopари. На основі співвідношення між масою отриманої олії ( $O_e$ ) та відповідним часом екстракції ( $t_e$ ) обчислювали продуктивність преса за олією ( $p_{ro}$ ) упродовж кожного експерименту:

$$p_{ro} = \frac{O_e}{t_e}. \quad (13)$$

*Застосування моделі.* Математичний розв'язок рівняння (6), що дозволяє оцінити об'єм олії ( $V_{es}$ ), отриманої в процесі стискання, базується на встановленні функціональних залежностей, які описують часову зміну фізичних характеристик матеріалу –  $k(t)$  та  $c(t)$ .

Функцію  $k(t)$  для різних поєднань температурних і силових режимів визначали методом нелінійного регресійного аналізу середніх значень коефіцієнта проникності  $k$ , отриманих під час експериментів із використанням преса періодичної дії за різних значень  $t_{cp}$ .

Обробку експериментальних даних виконували із застосуванням програмного пакета Tablecurve® 2D for Windows, при цьому враховували математичні моделі, запропоновані у попередніх дослідженнях [1,2]. У результаті залежність  $k(t)$  було подано у вигляді такої функції:

$$\left(\frac{1}{k}\right) = k_0 + k_1 t^2. \quad (14)$$

Для обчислення функції  $c(t)$  застосовували залежність (2), використовуючи відомі значення густини олії  $\rho_f$  та коефіцієнта об'ємної деформації  $m_v$ , який в межах даного дослідження приймався сталим параметром [1]. Таким чином, функціональну залежність  $c(t)$  можна подати у вигляді:

$$\frac{1}{c} = c_0 + c_1 t^2,$$

в якому

$$c_0 = k_0 \rho_f m_v;$$

$$c_1 = k_1 \rho_f m_v.$$

На завершальному етапі коефіцієнти  $B_0$  та  $B_1$  визначали на основі співвідношень (7) і (8), після чого отримані значення підставляли у рівняння (6). Чисельне розв'язання цього рівняння здійснювали методом Рунге–Кутти четвертого порядку, реалізованим у програмному середовищі MATLAB.

Використання розробленої моделі дає змогу прогнозувати об'єм олії ( $V_{es}$ ), що може бути отриманий із заданої маси насіння ріцини під час екстракції в камері стискання.

Ефективність екстракції, визначену за результатами моделювання ( $\eta_{es}$ ), обчислювали відповідно до формули (15), де  $g$  – прискорення вільного падіння.

$$\eta_{es} = \frac{V_{cs} \cdot \rho_f}{g \cdot S_{es}} = \frac{O_{es}}{S_{es}}. \quad (15)$$

З метою визначення розбіжностей між експериментальними даними та результатами моделювання виконували порівняльний аналіз середнього значення  $O_e$  із величиною  $O_{es}$ , що відображає об'єм олії, розрахований теоретично з урахуванням часу стискання  $t_{cp}$ .

Для кількісної оцінки точності прогнозу використовували показник відносної похибки ( $E_p$ ), який обчислювали відповідно до залежності (16):

$$E_p = \frac{(O_{es} - O_e)}{O_{es}} \cdot 100. \quad (16)$$

Аналіз значень  $E_p$  дає можливість оцінити адекватність математичної моделі щодо відтворення показників продуктивності преса періодичної дії та визначити ступінь узгодженості розрахункових результатів із фактичними експлуатаційними даними.

*Прогнозування продуктивності преса безперервної дії.* Використання рівняння (9) в межах математичної моделі (6) дає змогу прогнозувати інтенсивність екстракції та продуктивність безперервного преса за олією залежно від частоти обертання шнека та робочих характеристик обладнання. Під час адаптації моделі до умов роботи преса безперервного типу було прийнято значення  $Ad = 6200 \text{ м}^2$ , що відповідає ділянці внутрішньої поверхні камери стискання, де зазор між стінкою та пресувальною голівкою змінюється від 3,2 мм до 1,5 мм, тобто між  $H_i$  та  $H_f$  відповідно.

Для визначення еквівалентного тиску екстракції ( $U_{eq}$ ) встановлювали функціональний зв'язок між тиском пресування ( $U_e$ ), тривалістю стискання ( $t_{cp}$ ) та ефективністю екстракції ( $\eta_e$ ), отриманими під час експериментів на пресі безперервної дії. У розрахунках використовували дані, що відповідають температурному режиму  $T_2$ , який характеризує типовий робочий стан обладнання.

Математичну обробку результатів виконували методом регресійного аналізу із застосуванням програмного пакета Tablecurve3D. Із набору можливих аналітичних залежностей обирали ту, що забезпечувала найбільше значення коефіцієнта детермінації.

Після встановлення математичної залежності між зазначеними параметрами та підстановки значень  $t_{cp}$  і  $\eta_e$ , характерних для преса безперервної дії, було визначено величину еквівалентного тиску  $U_{eq}$ .

Для побудови функції  $k(t)$  у рівнянні тиску застосовували раніше описаний підхід, заснований на нелінійній регресії середніх значень коефіцієнта проникності  $k$  для різних значень  $t_{cp}$ . Оскільки пряме вимірювання тиску на пресі безперервного типу для значень, що дорівнюють  $U_{eq}$ , було неможливим, параметр  $k$  означали опосередковано, використовуючи залежності виду  $k(U_e)$ . Такі функції формували окремо для кожного значення  $t_{cp}$  за допомогою програмного забезпечення Tablecurve 2D, спираючись на дані, отримані при тисках  $U_1$ ,  $U_2$  та  $U_3$ . Для подальшого аналізу обирали криву з максимальним коефіцієнтом детермінації  $R^2$  серед рівнянь простого типу.

Отримані функції  $k(U_e)$  дали змогу визначити значення  $k$  при еквівалентному тиску, після чого було сформовано залежність  $k(t)$  для  $U_{eq}$ , використовуючи ті самі критерії оцінювання.

Підставивши  $U_{eq}$  у модель (6), застосувавши функції  $k(t)$  та  $c(t)$  і врахувавши інші необхідні параметри, стало можливим розрахувати об'єм олії ( $O_{es}$ ), отриманої на безперервному пресі протягом часу стискання  $t_{cp}$ .

Визначення  $O_{es}$  виконували для двох різних значень початкового часу інтегрування ( $t_{int}$ ). Аналогічно до досліджень із використанням преса періодичної дії, надійність моделі оціню-



вали за показником похибки прогнозування ( $E_p$ ), який обчислювали відповідно до залежності (16) для заданих значень  $t_{cp}$ .

Час стискання  $t_{cp}$  безпосередньо залежить від швидкості обертання шнекового транспортера (9), що, своєю чергою, визначає рівень продуктивності преса.

$$p_{ro} = v_{rc} \cdot f \cdot m_s \cdot \eta_e, \quad (17)$$

де  $m_s$  – маса насіння рицини, що припадає на одиницю довжини шнекового транспортера та піддається переробці. Значення цього показника визначали на основі співвідношення продуктивності преса ( $p_{rs}$ ) до лінійної швидкості переміщення шнека ( $v_{lc}$ ); при цьому параметр  $m_s$  розглядається як одна з конструктивно-експлуатаційних характеристик обладнання.

Зокрема:

$$m_s = \frac{p_{ex}}{v_{ls}} = \frac{46\,200}{3600 \cdot 60} = 0,21 \text{ г} \cdot \text{мм}^{-1}. \quad (18)$$

Інтегрування співвідношень (17) і (18) дає змогу визначити залежність продуктивності преса від швидкості обертання шнека. На основі отриманих аналітичних залежностей було сформовано прогнозу модель продуктивності обладнання з урахуванням початкового часу інтегрування ( $t_{int}$ ), значення якого забезпечує мінімізацію похибки прогнозування ( $E_p$ ) і тому приймається як оптимальний параметр у межах математичної моделі.

*Визначення фізичних параметрів матеріалу.* Експериментальні дані, отримані під час роботи безперервного преса, становлять основу для застосування прогностичної моделі вилучення олії з насіння. Показники, встановлені на початковому етапі дослідження, відображають характерні фізичні властивості матеріалу в заданих умовах стискання під час екстракційного процесу.

Відповідно до методики, у таблиці 1 подано усереднені значення коефіцієнта проникності  $k$ , визначені для різних режимів проведення екстракції.

Таблиця 1

Усереднені значення коефіцієнта проникності  $k$  залежно від тривалості стискання, тиску та температури

Час стискання $t_{cp}$ , с	Температура, $T_2$ , °C			Температура, $T_2$ , °C		
	Тиск, $U_1$ , бар	Тиск, $U_2$ , бар	Тиск, $U_3$ , бар	Тиск, $U_1$ , бар	Тиск, $U_2$ , бар	Тиск, $U_3$ , бар
	Коефіцієнт проникності $\text{км/с}$			Коефіцієнт проникності $\text{км/с}$		
5	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$
10	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$9,6 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$
20	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$9,2 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$

Отримані результати свідчать про зменшення коефіцієнта проникності  $k$  зі збільшенням часу стискання ( $t_{cp}$ ). Зокрема, підвищення  $t_{cp}$  з 5 до 10 с супроводжується зниженням цього показника приблизно на 40–45 %, тоді як при  $t_{cp} = 20$  с спад може перевищувати 60 %. Зменшення проникності зі збільшенням тривалості навантаження проявляється у поступовому зниженні інтенсивності вилучення олії під час механічного пресування.

Експериментальні дані також демонструють, що основна частина олії виділяється на початковій стадії процесу. Так, за загального часу стискання 20 с близько 60–70 % від сумарного об'єму отриманої олії екстрагується протягом перших п'яти секунд.

Дослідження зміни коефіцієнта  $k$  підтверджує значний вплив температурного режиму на перебіг екстракції. Проведення процесу за підвищених температур характеризується більшими значеннями проникності, причому цей ефект найбільш виражений при невеликих зна-

ченнях  $t_{cp}$ . За таких умов коефіцієнт  $k$ , визначений при температурі  $T_2$ , може у декілька разів перевищувати відповідні показники, отримані при  $T_1$ .

Щодо впливу тиску спостерігається протилежна закономірність: зі збільшенням тиску екстракції середні значення  $k$  мають тенденцію до зменшення. Цей ефект більш помітний у поєднанні з підвищеною температурою, однак проявляється переважно в межах певних діапазонів тиску, за якими подальші зміни стають незначними або важко ідентифікуються.

Результати вимірювань, виконаних під час досліджень на безперервному пресі, дали змогу також визначити коефіцієнт об'ємної деформації  $mv$  із використанням залежності (11). У таблиці 2 наведено усереднені значення цього параметра для кожного з досліджуваних режимів екстракції.

Таблиця 2

Усереднені значення коефіцієнта об'ємної деформації  $mv$  залежно від тривалості стискання, рівня тиску та температурного режиму

Час стискання $t_{cp}$ , с	Температура, $T_1$ , °C			Температура, $T_2$ , °C		
	Тиск, $U_1$ , бар	Тиск, $U_2$ , бар	Тиск, $U_3$ , бар	Тиск, $U_1$ , бар	Тиск, $U_2$ , бар	Тиск, $U_3$ , бар
	Коефіцієнт об'ємної деформації, $mv$ , м <sup>2</sup> /кН			Коефіцієнт об'ємної деформації, $mv$ , м <sup>2</sup> /кН		
5	$1,23 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$
10	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$
20	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$

Загалом встановлено, що значення  $mv$  дещо вищі при температурному режимі  $T_2$  порівняно з  $T_1$  та мають тенденцію до зменшення зі зростанням прикладеного тиску. Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними Баргейла, отриманими під час досліджень насіння сої та рицини, і частково підтверджують виявлені ним закономірності.

*Випробування екстракції на пресі безперервної дії.* У таблиці 3 подано результати експериментальних досліджень, виконаних із використанням преса безперервного типу. Зокрема, наведено значення маси отриманої олії ( $O_e$ ), ефективності екстракції ( $\eta_e$ ), середньої температури продукту на виході з преса, тривалості процесу та продуктивності обладнання ( $p_{ro}$ ), визначені під час кожного експериментального випробування.

Таблиця 3

Результати експериментальних випробувань преса безперервної дії

Номер досліджу	Маса отриманої олії ( $O_e$ ), кг	Ефективність екстракції ( $\eta_e$ ), %	Середня температура продукту на виході з преса, °C	Тривалість процесу та продуктивність обладнання ( $p_{ro}$ ), кг/год
1	32,5	32,5	61,2	14,7
2	33,8	33,8	63,5	14,2
3	31,9	31,9	60,8	14,5
4	34,3	34,3	60,9	14,8
5	33,5	33,5	64,1	14,3

Узагальнення результатів експериментальних досліджень свідчить, що середній вихід екстракції ( $\eta_e$ ) становить приблизно 33,2 %.

Температурний режим упродовж усіх випробувань залишався відносно стабільним – середнє значення температури олії на виході становило близько 62,1 °C при стандартному відхиленні 1,6 °C. За таких умов роботи прес забезпечував середню продуктивність на рівні 14,5 кг/год видобутої олії, причому варіація показника була незначною (стандартне відхилення – 0,2 кг/год).



Порівняння реальних значень та значень, отриманих за допомогою моделювання. Відповідно до підходу, та з урахуванням експериментальних результатів, отриманих під час досліджень на пресі періодичної дії, для кожного режиму екстракції було визначено коефіцієнти  $k_0$  та  $k_1$  рівняння (14), яке описує функціональну залежність  $k(t)$  (табл. 4).

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів  $k_0$  та  $k_1$  для різних режимів екстракції

Тиск, $U$	Температура, $T$ , °C	Коефіцієнт, $k_0$	Коефіцієнт, $k_1$	Коефіцієнт детермінації, $R^2$	Рівень значущості, $p$
$U_1$	$T_1$	$2,9 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^6$	0,60	0,22
$U_2$		$8,2 \cdot 10^8$	$8,7 \cdot 10^5$	0,78	0,11
$U_3$		$4,8 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^6$	0,84	0,08
$U_1$	$T_2$	$1,6 \cdot 10^8$	$8,7 \cdot 10^5$	0,98	0,01
$U_2$		$2,6 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^6$	0,97	0,02
$U_3$		$2,4 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^6$	0,96	0,02

Загалом отримані значення коефіцієнта детермінації  $R^2$  для всіх досліджуваних режимів можна оцінити як прийнятні, оскільки вони перевищують рівень 0,6, а в окремих випадках є суттєво вищими. Водночас статистично значущі результати ( $p < 0,05$ ) зафіксовано лише для процесів екстракції, проведених за температурного режиму  $T_2$ .

Як свідчать отримані дані, на початковому етапі екстракції проникність має максимальні значення, однак із подовженням часу стискання ( $t_{cp}$ ) вона швидко зменшується.

Виявлена динаміка відповідає структурним змінам, що відбуваються у твердій матриці насіння під час стискання. На початковій стадії процесу матеріал характеризується значною пористістю, завдяки чому олія легко проходить через наявні порожнини тканини.

Із подальшим підвищенням ступеня ущільнення пористість поступово зменшується, а міжклітинні та внутрішньоклітинні канали перекриваються, що ускладнює виділення олії з твердого залишку [1].

Порівняльний аналіз фактичних об'ємів екстрагованої олії та результатів, отриманих за допомогою прогнозувальної моделі, наведено в таблицях 5 і 6 для температурних режимів  $T_1$  та  $T_2$  відповідно. Розбіжності між експериментальними та розрахунковими даними є помітними.

Загалом показник похибки прогнозування ( $E_p$ ) змінюється в межах від 8,9 % до 63,9 % і демонструє тенденцію до зростання зі збільшенням тривалості стискання ( $t_{cp}$ ).

Таблиця 5

Порівняльний аналіз експериментальних  $O_e$  розрахункових значень  $O_{es}$  маси отриманої олії для різних режимів екстракції при температурі 30 °C

Час стискання $t_{cp}$ , с	Температура, $T_1$ , °C								
	Тиск, $U_1$ , бар			Тиск, $U_2$ , бар			Тиск, $U_3$ , бар		
	Маса отриманої олії ( $O_e$ ), кг	Маса отриманої олії ( $O_{es}$ ), кг	Похибка прогнозування ( $E_p$ )	Маса отриманої олії ( $O_e$ ), кг	Маса отриманої олії ( $O_{es}$ ), кг	Похибка прогнозування ( $E_p$ )	Маса отриманої олії ( $O_e$ ), кг	Маса отриманої олії ( $O_{es}$ ), кг	Похибка прогнозування ( $E_p$ )
5	7,2	7,9	8,9	11,7	15,5	24,5	12,3	17,1	28,1
10	10,6	15,4	31,2	10,7	28,2	62,1	14,7	31,6	53,5
20	17,4	28,2	38,3	18,4	44,2	58,4	18,4	51,1	63,9

Таблиця 6

Порівняльний аналіз експериментальних  $O_e$  розрахункових значень  $O_{es}$  маси отриманої олії для різних режимів екстракції при температурі 60 °С

Час стискування $t_{cp}$ , с	Температура, $T_2$ , °С								
	Тиск, $U_1$ , бар			Тиск, $U_2$ , бар			Тиск, $U_3$ , бар		
	Маса (екс.) отриманої олії ( $O_e$ ), кг	Маса (роз.) отриманої олії ( $O_{es}$ ), кг	Похибка прогнозування ( $E_p$ )	Маса отриманої олії ( $O_e$ ), кг	Маса отриманої олії ( $O_{es}$ ), кг	Похибка прогнозування ( $E_p$ )	Маса отриманої олії ( $O_e$ ), кг	Маса отриманої олії ( $O_{es}$ ), кг	Похибка прогнозування ( $E_p$ )
5	21,2	28,1	24,6	21,5	24,9	13,7	24,4	34,3	28,9
10	28,1	51,6	45,5	26,9	45,0	40,2	30,5	61,2	50,1
20	29,7	78,8	62,3	31,8	73,2	56,6	35,3	92,8	62,0

Упродовж перших п'яти секунд значення похибки прогнозування ( $E_p$ ) досягає приблизно 29 % і демонструє тенденцію до збільшення зі зростанням прикладеного тиску.

Для адаптації математичної моделі до умов роботи преса безперервного типу виникла необхідність визначення функціональної залежності тиску  $U$ . З огляду на результати, було отримано наступне рівняння:

$$\ln \eta_e = a + h \cdot U_e^2 + c \cdot t_{cp}^{1,5}, \quad (19)$$

де  $a = 2,12$ ,  $b = 3,56 \cdot 10^{-9}$ ,  $c = 7,55 \cdot 10^{-3}$ , а коефіцієнт кореляції  $R^2$  становить 0,87, що свідчить про достатній рівень узгодженості моделі з експериментальними даними.

Після розв'язання рівняння для  $t_{cp} = 0,47$  с та  $\eta_e = 33,2$  % які відповідають середньому часу стискування та типовій інтенсивності екстракції при безперервному пресуванні, було отримано значення еквівалентного тиску  $U_{eq} = 880$  бар.

У таблиці 7 подано коефіцієнти функцій  $k(U_e)$  для різних значень  $t_{cp}$ . Найточніший опис взаємозв'язку між досліджуваними параметрами забезпечує залежність виду  $k = d + e \cdot U_e^{-2}$ .

Крім того, у таблиці наведено розраховані значення  $k$  при тиску 880 бар, на основі яких було побудовано функцію  $k(t)$  для зазначеного режиму. Отримана залежність, представлена рівняннями того ж типу, що й у (14), характеризується коефіцієнтами  $k_0 = 4,34 \cdot 10^8$  та  $k_1 = 1,35 \cdot 10^7$ , при цьому значення  $R^2 = 0,99$  підтверджує високу точність апроксимації.

Результати моделювання, виконаного з урахуванням функції  $k(t)$  для  $U_e = 880$  бар і  $m_v = 6,04 \cdot 10^{-9}$ , що відображає зміну об'єму видобутої олії залежно від тривалості стискування  $t_{cp}$ .

За умови продуктивності преса за олією ( $p_{ro}$ ) на рівні 1,89 г/с розраховані значення похибки прогнозування ( $E_p$ ) змінюються в межах від 30,3 % до 72,6 % залежно від початкового часу інтегрування ( $t_{int}$ ) (табл. 8).

Подальший аналіз залежності  $E_p$  від параметра  $t_{int}$  показав, що при значенні 0,125 с похибка прогнозу зменшується до нульового рівня, що свідчить про оптимальність цього інтервалу для використання в розрахунках математичної моделі.

*Прогнозування продуктивності безперервного пресування.* Застосування методичного підходу, дало змогу сформулювати прогностичну модель, що встановлює залежність продуктивності преса від ефективності екстракції з урахуванням швидкості обертання шнека ( $v_{rc}$ ).

Отримані результати свідчать, що зі зміною ( $v_{rc}$ ) показники продуктивності за олією ( $p_{ro}$ ) та розрахункової ефективності екстракції ( $\eta_{es}$ ) демонструють протилежні тенденції.

Зокрема, підвищення швидкості обертання шнека супроводжується зменшенням ефективності екстракції, тоді як продуктивність обладнання має тенденцію до зростання. При

Таблиця 7

Коефіцієнти функцій  $k(U_e)$  та відповідні значення  $k$  при тиску 880 бар за різних температурних режимів

Час стискання $t_{cp}$ , с	Постійний адитивний коефіцієнт моделі, $d$	Коефіцієнт пропорційності, $e$	Коефіцієнт детермінації, $R^2$	Розрахунковий коефіцієнт, $k_{(880\text{-бар})}$ , М/с
5	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,84	$2,7 \cdot 10^{-9}$
10	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,93	$1,7 \cdot 10^{-9}$
20	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	0,93	$1,1 \cdot 10^{-9}$

Таблиця 8

Значення похибки прогнозування  $E_p$  залежно від початкового часу інтегрування  $t_{int}$

Початковий час інтегрування $t_{int}$ , с	Маса (екс.) отриманої олії ( $O_e$ ), г	Маса (роз.) отриманої олії ( $O_{es}$ ), г	Похибка прогнозування ( $E_p$ )
0,01	1,89	6,89	72,6
0,05	1,89	4,56	58,6
0,08	1,89	3,34	43,4
0,1	1,89	2,71	30,3

$v_{rc} = 2$  б/с – швидкості, що підтримувалася під час експериментальних досліджень безперервного пресування – об'єм видобутої олії становив близько 4 г/с (приблизно 14,4 кг/год).

Практично повний збіг із експериментальними даними пояснюється використанням у моделі початкового часу інтегрування  $t_{int} = 0,125$ , що було прийнято як оптимальне значення для прогнозних розрахунків.

Загальна динаміка, відображена моделлю, підтверджує, що зі зростанням  $v_{rc}$  ефективність вилучення олії поступово знижується, тоді як її виробнича продуктивність збільшується. Водночас підвищення продуктивності спостерігається лише в певному інтервалі швидкостей. Після досягнення приблизно 4 об/с фіксується протилежна тенденція, що проявляється у зменшенні виходу олії.

**Висновки.** 1. Трансформація фізичних властивостей матеріалу під час механічного стискання олійного насіння відіграє визначальну роль у поясненні механізмів, що лежать в основі процесу вилучення олії. Одним із ключових параметрів вважається проникність твердої структури насіння, оскільки саме вона значною мірою визначає ефективність відокремлення олії в умовах компресійного навантаження. Основними технологічними чинниками, які впливають на цей показник, є тиск, температура та тривалість стискання ( $t_{cp}$ ).

2. Результати експериментів засвідчили, що коефіцієнт проникності  $k$  зростає за підвищення температури. Практичний досвід показує, що нагрівання сировини під час екстракції сприяє інтенсифікації відведення олії, внаслідок чого за однакового часу стискання забезпечується більший вихід продукту. Імовірно, така залежність пов'язана зі зменшенням в'язкості олії при вищих температурах. Найбільш виразно цей ефект проявляється на початковій стадії стискання, тобто в діапазоні  $t_{cp}$ , характерному для стандартних безперервних пресів. Зокрема, приблизно за 5 секунд може бути вилучено понад 60 % загальної маси олії, тоді як при  $t_{cp} = 20$  с її об'єм за підвищеної температури інколи перевищує показники низькотемпературного режиму у 2–3 рази. Варіативність цієї закономірності частково пояснюється впливом тиску екстракції, який за сталого  $t_{cp}$  зазвичай спричиняє зниження проникності  $k$ . Водночас в межах дослідженого інтервалу часу стискання цей фактор не демонструє істотного впливу на загальний об'єм отриманої олії, хоча його значення може посилюватися при коротших циклах навантаження.

4. Отримані результати математичної моделі, запропонованої Баргейлом, дають підстави вважати, що нижня межа  $t_{cp}$ , розглянута в експериментах, може позначатися на чутливості та достовірності моделювання для процесів із більшою тривалістю стискання. Водночас встанов-



лено, що для  $t_{cp} = 5$  с розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними є відносно невеликою і не перевищує 30 %.

5. Покращення відповідності моделі реальній роботі досліджуваного преса можливе шляхом коригування початкового часу інтегрування ( $t_{ini}$ ). Фактично, підбір такого значення цього параметра, за якого різниця між прогнозними та експериментальними результатами є мінімальною, можна розглядати як ефективний спосіб адаптації математичного опису процесу.

6. Удосконалений алгоритм розрахунку відкриває можливості для детального аналізу змін ефективності та продуктивності пресового обладнання за різних режимів роботи. Завдяки цьому модель може використовуватися як практичний інструмент для оптимізації параметрів машини та досягнення заданих виробничих показників.

#### Список використаних джерел

1. Чумак О. П. Процеси та апарати харчових виробництв. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 476 с.
2. Технологічне обладнання олійно-жирових виробництв: НУХТ, навч. посіб. Київ: НУХТ, 2019. 420 с.
3. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. New York: Wiley, 1943. 510 p.
4. Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856. 647 p.
5. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. 2nd ed. Wiley, 2002. 895 p.
6. Geankoplis C. J. Transport Processes and Separation Process Principles. 4th ed. Prentice Hall, 2003. 1026 p.
7. Singh R. P., Heldman D. R. Introduction to Food Engineering. 5th ed. Academic Press, 2014. 864 p.
8. Fellows P. Food Processing Technology: Principles and Practice. 4th ed. Woodhead Publishing, 2017. 1152 p.
9. Savoie R., Lanoisellé J. L., Vorobiev E. Mechanical oil expression from oilseeds: A review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013. Vol. 6. P. 1–16.
10. Adeeko K. A., Ajibola O. O. Processing factors affecting yield and quality of mechanically expressed groundnut oil. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1990. Vol. 45. P. 31–43.
11. Бондар А. М. Обґрунтування технологій отримання рицинової олії. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі». ТДАТУ, м. Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р. С. 77–79.
12. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 10 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18.
13. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину: монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с., іл.
14. Бондар А. М. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ»*. Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 125–131.
15. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічного процесу збирання рицини. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. 717 с. С. 147–150.
16. 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*: наукове фахове видання. ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 118–124. DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-16>. <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/issue/view/65/164>
17. 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: наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 125–130. DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-17>
18. 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*: наукове фахове видання. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 2. С. 37–44. DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-5>



19. Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання тепломасоперенесення в поверхневих капілярно-пористих середовищах. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2025 року). Запоріжжя, 2025. С. 46–49.

20. Бондар А. М. Прогнозування ресурсу трибосистем при використанні сумішевих олів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання. ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 19 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-10

21. Kuznetsov M., Lysenko O., Chebanov A. Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (114)), 2021. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>

22. Samoichuk K.; Petrychenko S.; Bondar A.; Hutsol T.; Kubo' n, M.; Niemiec M.; Mykhailova L.; Gródek-Szostak Z.; Sorokin D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*, 2022, 15, 1795. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051795>

23. Каплан М.; Клімек К.; Май, Г.; Бондар А.; Лемешченко-Лагода, В.; Болтіанський, В.; Болтіанська, Л.; Сиротюк, Н.; Сиротюк, С.; et al. Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*, 2022, 15, 3416. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093416>

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

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



**D. Zhuravel<sup>1</sup>, V. Didur<sup>2</sup>, Ya. Bilokin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> **Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University**

<sup>2</sup> **Uman National University**

<sup>3</sup> **Poltava State Agrarian University**

## MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MECHANICAL EXTRACTION OF OIL FROM CASTOR SEEDS

### Summary

The article considers the issue of evaluating the mathematical model of the process of mechanical extraction of oil from castor seeds. The research was conducted using the theory of consolidation of porous media and the law of liquid filtration, and the determination of the possibilities of its application for continuous presses. Experimental tests were conducted using intermittent and continuous mechanical presses under different temperature and force regimes. In the course of the work, it was established that the permeability of the solid structure of the seeds significantly affects the extraction efficiency, and an increase in temperature contributes to the intensification of the process due to a decrease in the viscosity of the oil. The transformation of the physical properties of the material during mechanical compression of oilseeds plays a decisive role in explaining the mechanisms underlying the oil extraction process. One of the key parameters is the permeability of the solid structure of the seed, since it largely determines the efficiency of oil separation under compressive loading. The main technological factors that affect this indicator are pressure, temperature and compression duration  $t_{cp}$ . The results of the experiments showed that the permeability coefficient  $k$  increases with increasing temperature. Practical experience shows that heating the raw material during extraction contributes to the intensification of oil removal, as a result of which a higher product yield is ensured for the same compression time. Presumably, this dependence is associated with a decrease in oil viscosity at higher temperatures. This effect is most pronounced at the initial stage of compression, in the range  $t_{cp}$ , typical for standard continuous presses. In particular, in approximately 5 seconds, more than 60 % of the total mass of oil can be removed, while at  $t_{cp} = 20$  s, its volume at elevated temperature sometimes exceeds the indicators of the low-temperature regime by 2–3 times. The variability of this pattern is partly explained by the influence of the extraction pressure, which at a constant  $t_{cp}$  usually causes a decrease in the permeability  $k$ . At the same time, within the studied



compression time interval, this factor does not demonstrate a significant effect on the total volume of oil obtained, although its value may increase with shorter load cycles. Regarding the use of the mathematical model proposed by Bargail, the results obtained give reason to believe that the lower limit of  $t_{cp}$ , considered in the experiments, may affect the sensitivity and reliability of the modeling for processes with a longer compression duration. At the same time, it was found that for  $t_{cp} = 5$  s the discrepancy between the experimental and calculated data is relatively small and does not exceed 30 %. Improving the compliance of the model with the real operation of the studied press is possible by adjusting the initial integration time ( $t_{int}$ ). In fact, the selection of such a value of this parameter, at which the difference between the predicted and experimental results is minimal, can be considered as an effective way to adapt the mathematical description of the process. The improved calculation algorithm opens up opportunities for detailed analysis of changes in the efficiency and productivity of press equipment under different operating modes. Thanks to this, the model can be used as a practical tool for optimizing machine parameters and achieving specified production indicators.

**Keywords:** mathematical model, castor seeds, mechanical pressing, extraction, liquid filtration, consolidation of porous media.