

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСКОВОГО ПОДРІБНЮВАЧА МАКУХИ НІШЕВИХ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

Е. Б. Алієв, І. М. Білоус

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

У статті представлено результати дослідження процесу подрібнення макухи соняшника, гірчиці та льону олійного із використанням удосконаленого дискового подрібнювача. Основною метою роботи було підвищення ефективності подрібнення шляхом модернізації робочих органів дискової дробарки через впровадження дисків з ударними накладками, що реалізують імпульсно-ударний принцип руйнування частинок. Експериментальні дослідження виконувалися з використанням спеціально розробленого апаратно-програмного комплексу, який забезпечує моніторинг і фіксацію ключових параметрів процесу у реальному часі: крутного моменту, частоти обертання, маси продукту та його фракційного складу. Застосування методів планування багатофакторного експерименту дозволило побудувати регресійні моделі, що описують залежності питомої енергоємності, частки пилоподібної фракції та ступеня подрібнення від основних технологічних факторів – подачі макухи, частоти обертання диска та модульного зазору між дисками. Встановлено, що найбільший вплив на ефективність подрібнення має величина зазору, тоді як подача макухи справляє мінімальний вплив. У результаті чисельної оптимізації визначено раціональні параметри подрібнення для кожної культури: $G = 1089\text{--}1184$ кг/год, $\delta = 1,15\text{--}1,31$ мм, $n = 1625\text{--}1654$ об/хв. Відповідні значення питомої енергоємності становлять $q = 3,96\text{--}4,66$ кВт·год/т, частки пилоподібної фракції – $a = 3,05\text{--}4,69\%$, ступеня подрібнення – $\lambda = 1,83\text{--}1,96$. Отримані результати підтверджують доцільність використання удосконаленого робочого органу для ефективного подрібнення макухи нішевих олійних культур.

Ключові слова: подрібнення макухи, дисковий подрібнювач, енергоємність процесу, ступінь подрібнення, частка пилоподібної фракції, нішеві олійні культури, багатофакторний експеримент, оптимізація

Вступ. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу зростає інтерес до нішевих олійних культур, таких як рицина, гірчиця, льон, амарант, чорнуха та інші, завдяки їх високій біологічній цінності, лікарським властивостям та можливості використання в харчовій, фармацевтичній, косметичній і технічній галузях (Gunstone 2011; Vadke 2024). Технологія переробки насіння цих культур на олію має низку особливостей, що відрізняють її від традиційної обробки соняшнику або сої. Зокрема, важливу роль відіграють етапи підготовки сировини, механічного пресування та обробки залишкової макухи (Aliiev et al. 2017; Aliiev et al. 2022).



*Corresponding author

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Особливої уваги потребує процес подрібнення макухи – твердого залишку після віджимання олії. Ефективне подрібнення дозволяє не лише оптимізувати подальші етапи вилучення залишкової олії (екстракція або повторне пресування), а й забезпечити якість побічних продуктів, які використовуються як кормова добавка або вторинна сировина для біоенергетичних та хімічних потреб. Оскільки макуха з насіння нішевих культур часто має специфічну структуру, вологість, олійність і крихкість, процес її подрібнення потребує спеціалізованого обладнання та оптимізації технологічних режимів (Zhou et al. 2020; Arrutia et al. 2020).

З урахуванням вищезазначених особливостей сировини постає потреба у виборі ефективного типу подрібнювального обладнання, здатного забезпечити необхідні параметри диспергування при мінімальних енерговитратах. За результатами патентно-інформаційного аналізу виявлено, що наявні конструкції молоткових і вальцевих подрібнювачів, хоча й постійно вдосконалювались, наразі практично вичерпали свій інноваційний потенціал. Одним із перспективних напрямів є застосування дискових подрібнювачів, які демонструють потенціал підвищення ефективності процесу переробки. В таблиці 1 приведено порівняльні характеристики різних типів дробарок. Згідно з проведеним аналізом, дискові подрібнювачі демонструють найнижчі мінімальні значення питомої енергоемності серед розглянутих типів – 4,75 кВт·год/т, що вказує на потенційно вищу енергоефективність за умов оптимального режиму роботи (Vaculík et al. 2013; Boas et al. 2010). При цьому їх питома матеріалоемність (91,6–366,7 кг/(т/год)) займає проміжне положення між молотковими та вальцевими подрібнювачами, що свідчить про задовільну конструктивну простоту та технологічну надійність. Важливо також зазначити, що за середнім розміром подрібнених часток (0,4–0,7 мм) дискові подрібнювачі забезпечують високий рівень тонкодисперсного подрібнення, подібний або навіть кращий за молоткові, і суттєво переважають вальцеві подрібнювачі (Vukmirovic et al. 2015; Thomas et al. 2018; Lyu et al. 2019; Dudin et al. 2025).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика дробарок

Марка	Питома енергоемність, кВт·год/т	Питома матеріалоемність, кг/(т/год)	Середній розмір подрібнених часток, мм
Молоткові дробарки	6,4–12,3	63–320	0,4–0,8
Вальцеві подрібнювачі	7,29–12,22	285,7–944,4	0,9–1,2
Дискові подрібнювачі	4,75–18,3	91,6–366,7	0,4–0,7

Метою досліджень є підвищення ефективності технологічного процесу подрібнення макухи шляхом зниження питомих енерговитрат, поліпшення якості подрібненої продукції та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача на основі встановлених емпіричних залежностей.

Матеріали і методи досліджень. Удосконалення подрібнювача було здійснено шляхом заміни базових робочих органів подрібнювача Поток РП-1 на диски з ударними накладками (рис. 1), відповідно до конструктивного рішення

(Dudin et al. 2025). Диски виготовлені зі сталі 40Х, а ударні накладки – зі сталі ВК8. Така модернізація дозволяє реалізувати імпульсно-ударний принцип дії, що забезпечує більш ефективне руйнування макухи за рахунок концентрації навантаження у зонах контакту та покращення умов передачі енергії деформації.

Для реалізації експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення параметрів роботи дискового подрібнювача, було створено спеціалізований апаратно-програмний комплекс. Цей комплекс дозволяє в здійснювати моніторинг, запис та обробку даних, що характеризують процес подрібнення, зокрема таких ключових показників, як крутний момент на робочому валу та маса подрібненого матеріалу. Завдяки цьому з'являється можливість проводити високоточні вимірювання у реальному часі, що є особливо важливим при дослідженні ефективності функціонування технічних засобів та оптимізації їхніх конструктивно-технологічних параметрів.



Загальний вигляд



Верхній нерухомий диск



Нижній рухомий диск

Рис. 1. Удосконалений дисковий подрібнювач і його робочі органи

Основним елементом експериментального стенда (рис. 2) виступає лабораторний дисковий подрібнювач. Його конструкція дозволяє змінювати режими роботи та адаптувати умови дослідження відповідно до заданих параметрів. Для регулювання частоти обертання диска використовується частотний перетворювач Danfoss VLT Micro Drive FC51, який забезпечує плавне керування швидкістю обертання електродвигуна, тим самим дозволяючи дослідити вплив частоти обертання на ефективність подрібнення.

Для вимірювання крутного моменту, який виникає під час роботи подрібнювача, спеціально було розроблено вимірювач крутного моменту. Цей пристрій дозволяє реєструвати механічне навантаження у точці з'єднання валу двигуна та валу робочого диска. Вимірювач крутного моменту підключений до персонального комп'ютера. У складі комплексу також передбачено лабораторний розсіювач РЛУ-ЗК з набором сит, який використовується для аналізу фракційного складу подрібненої макухи. Завдяки йому можна точно оцінити фракційний склад подрібненої макухи. Отримані дані поєднуються з інформацією щодо навантажень та енергоспоживання, що дозволяє комплексно оцінити ефективність роботи дробарки.

© Е. Б. Алієв, І. М. Білоус

Крім того, до складу експериментального стенда входять лабораторні аналітичні ваги JD-2200-2, які забезпечують високу точність зважування фракцій подрібненої макухи, а також спеціально сконструйовані дослідні ваги (система зважування у поточному часі готового продукту) з тензометричним датчиком. Останні дозволяють реєструвати зміну маси макухи в режимі реального часу безпосередньо під час процесу подрібнення, що є особливо важливим для аналізу продуктивності подрібнювача.



1 – дисковий подрібнювач; 2 – стенд для керування електроприводами на основі частотного перетворювача Danfoss; 3 – ПЕОМ; 4 – розсіювач лабораторний РЛУ-3К; 5 – ваги лабораторні JD-2200-2; 6 – система зважування у поточному часі готового продукту; 7 – вимірювач крутного моменту; 8 – отвір для встановлення модульного зазору

Рис. 2. Загальний вигляд дослідної установки на основі експериментального дискового подрібнювача

Контроль значення модульного зазору проводять за допомогою відповідного щупа, використовуючи отвір в корпусі робочої камери.

Розроблений стенд дозволяє проводити не лише якісні вимірювання, а й здійснювати порівняльний аналіз роботи подрібнювача при зміні конструктивних параметрів або умов подачі макухи.

Експериментальні дослідження робочого процесу дискового подрібнювача макухи проводили із застосуванням методології планування багатофакторного експерименту. Такий підхід дав змогу суттєво підвищити ефективність дослідницької роботи, оптимізувати витрати часу й ресурсів, а також забезпечити достатню повноту і точність дослідження процесу подрібнення.

Метою експерименту було визначити вплив основних регульованих параметрів – частоти обертання ротора n (1500 об/хв, 2250 об/хв, 3000 об/хв); зазору між дисками δ (0,6 мм, 1,1 мм, 1,6 мм); та подачі матеріалу G (450 кг/год, 900 кг/год, 1350 кг/год) – на ключові експлуатаційні показники роботи подрібнювача. Серед таких показників продуктивність машини Q (кг/год) та спожита потужність N (кВт), які були перераховані у питому енергоємність q (кВт·год/т); а також якість подрібнення, яка надалі аналізувалася за фракційним складом отриманого матеріалу.

Для проведення досліджень дискового подрібнювача використовували макуху соняшника, гірчиці і льону олійного з вологістю 8,3–10,2%.

На основі отриманих результатів розраховували питому енергоємність процесу подрібнення:

$$q = P/Q, \quad (1)$$

де Q – продуктивність подрібнювача, т/год; P – потужність витрачена на подрібнення, кВт.

Продуктивність визначали за часом витраченим на подрібнення порції макухи:

$$Q = 3,6m_n/t_n, \quad (2)$$

де m_n – маса наважки, г; t_n – час подрібнення, с.

Потужність розраховували на основі отриманих даних моменту з тензOMETричного датчику:

$$P = \pi M_{\max} n / 30, \quad (3)$$

де $M_{\max}$ – максимальний момент, Н·м; n – частота обертів, об/хв.

Для оцінки якості подрібнення макухи було використано метод фракційного аналізу за допомогою лабораторного розсійника моделі РЛУ-3К. Подрібнена макуха після виходу з дробарки пересипали до приймального бункера розсійника, де воно рівномірно розподілялося по сітчастим поверхням набору лабораторних сит. Для дослідження застосовували сита з різними діаметрами отворів: 0,2 мм, 0,5 мм, 1 мм, 1,5 мм та 2 мм.

Ступінь подрібнення визначали за формулою:

$$\lambda = D_e / M, \quad (4)$$

де D_e – еквівалентний розмір частинок вихідного матеріалу, мм; M – модуль подрібнення, мм.

Модуль подрібнення знаходили за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} d_{ci} \cdot m_i / \sum_{i=1}^{i=n} m_{ni}, \quad (5)$$

де M – модуль подрібнення, мм; d_{ci} – середнє значення діаметру частинок i -тої фракції, мм; m_i – маса частинок i -тої фракції, г; n – кількість фракцій.

Для побудови та аналізу цих моделей було використано хмарне обчислювальне середовище Wolfram Cloud, що дозволило реалізувати точний чисельний аналіз складних регресійних рівнянь (Aliiev 2023).

Методика полягала у використанні побудованих рівнянь регресії, які були одержані раніше на основі плану експерименту Бокса-Бенкена (Kyselyov et al 2017, Aliiev 2023).

Для комплексної оцінки було введено інтегральний критерій ефективності подрібнення і умова ступеня подрібнення:

$$K = \frac{q - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \frac{\lambda_{\max} - \lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

де $a_{\max}, a_{\min}, q_{\max}, q_{\min}, \lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ – граничні значення частки пилоподібної фракції, питомої енергоємності та ступеня подрібнення, отримані в межах плану.

Отримані результати дають змогу рекомендувати вказані параметри як раціональні для подрібнення макухи в умовах використання дискового подрібнювача.

Результати досліджень та їхнє обговорення. Експериментальні дані було опрацьовано із застосуванням хмарного сервісу Wolfram Cloud, що забезпечило можливість якісного й оперативного математичного аналізу результатів. У ході обробки побудовано регресійні моделі в закодованому вигляді, які описують залежність питомої енергоємності процесу подрібнення макухи від обраних факторів.

Питома енергоємність при подрібненні:

– макуха соняшника:

$$q^s = -0,5887 - 0,00123129G + 0,00815232n - 1,81163 \cdot 10^{-6}n^2 - 2,08867\delta; \quad (7)$$

– макуха гірчиці:

$$q^m = -0,63111 - 0,000933791G + 0,00853272n - 1,89616 \cdot 10^{-6}n^2 - 2,33485\delta; \quad (8)$$

– макуха льону олійного:

$$q^f = -0,5982 - 0,0010348G + 0,0085049n - 1,86775 \cdot 10^{-6}n^2 - 2,17493\delta; \quad (9)$$

Графічна інтерпретація залежностей (7)–(9) представлена на рис. 3.

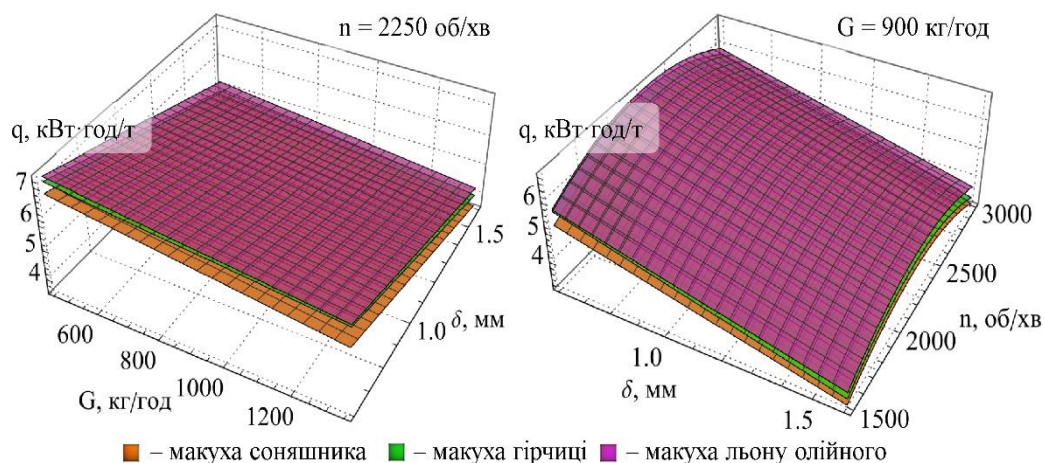


Рис. 3. Залежність питомої енергоємності подрібнення макухи q від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n

Аналіз впливу досліджуваних факторів показав, що найменший вплив на значення питомої енергоємності має подача макухи в камеру подрібнення. Зміна цього параметра в межах експерименту не призводить до суттєвих змін. Це свідчить про те, що при досліджених рівнях подачі не досягається критичне ущільнення макухи, яке могло б суттєво змінити характер навантаження частинок і, відповідно, впливати на механізм руйнування.

Помірний вплив спостерігається від частоти обертання диска. При частоті 2310 ± 16 об/хв фіксується максимальне значення питомої енергоємності для всіх культур, що, ймовірно, пов'язано з резонансними або турбулентними ефектами у міждисковому просторі. За таких умов підвищується інтенсивність зіткнень частинок із робочими органами та між собою, зростає швидкість деформації частинок макухи, а отже – і втрати енергії на створення нових поверхонь розлому і тертя.

Найбільший вплив на питому енергоємність має модульний зазор між дисками. Встановлено чітку закономірність: зі збільшенням зазору питомі енерговитрати зменшуються. Це пояснюється зменшенням ступеня деформації частинок макухи при подрібненні. У вузькому зазорі макуха зазнає інтенсивнішого контактного навантаження, що призводить до більшого обсягу пластичних і крихких деформацій. Оскільки більша частина енергії витрачається на подолання міцності матеріалу та перетворюється в теплоту, питомі витрати енергії зростають. При ширшому зазорі переважає механізм часткового розколювання та розшарування макухи, що вимагає менших енергетичних витрат. Отже, зазор між дисками виступає ключовим регулятором інтенсивності контактної взаємодії, яка визначає ефективність руйнування частинок макухи як пружно-крихкого тіла.

Аналогічний підхід статистичної обробки було застосовано для побудови регресійних моделей, які описують залежність частки пилоподібної фракції (часток діаметром до 0,2 мм), утвореної в результаті подрібнення макухи від варіюваних технологічних факторів. Це дозволило кількісно оцінити вплив кожного з факторів на утворення надмірно дрібних частинок та визначити умови, за яких їх кількість мінімізується.

Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі:

– макуха соняшника:

$$a^s = 8,2526 - 0,008127G + 0,0000062993G^2 + 0,002264n - 8,3135\delta + 2,733\delta^2; \quad (10)$$

– макуха гірчиці:

$$a^m = 10,215 - 0,006603G + 4,7145 \cdot 10^{-6}G^2 + 0,001323n - 10,4899\delta + 3,763\delta^2; \quad (11)$$

– макуха льону олійного:

$$a^f = 7,9796 - 0,004823G + 3,1487 \cdot 10^{-6}G^2 + 0,0009178n - 6,3082\delta + 1,7781\delta^2; \quad (12)$$

Графічна інтерпретація залежностей (10)–(12) представлена на рис. 4.

Найменший вплив на частку пилоподібної фракції має подача макухи в камеру подрібнення. З фізичної точки зору, цей параметр не змінює суттєво кінетичну енергію взаємодії між частинками та робочими органами, особливо при постійній конструкції подаючого механізму, тому і не призводить до істотного зростання ступеня подрібнення.

Зі збільшенням частоти обертання дисків зростає частка пилоподібної фракції. Це пов'язано з тим, що внаслідок збільшення частоти обертання підвищується лінійна швидкість робочих органів, а відповідно – і енергія удару

або зсуву, яку вони передають частинкам макухи. У режимі високих швидкостей збільшується ймовірність багатократного руйнування однієї й тієї ж частинки, тобто зростає повторне подрібнення вже роздроблених фрагментів.

Найбільший вплив на всі три культури мав модульний зазор між дисками. Встановлено чітку закономірність: зі збільшенням зазору частка пилоподібної фракції зменшувалася. Це пояснюється фізикою контакту: вузький зазор створює більшу інтенсивність локального навантаження, що призводить до глибокого руйнування структури частинок макухи, включаючи його внутрішні шари. Навпаки, при ширшому зазорі частинки макухи може проходити з меншою деформацією, що обмежує інтенсивність її руйнування й сприяє зменшенню кількості дрібнодисперсної фракції. Таким чином, зазор між дисками відіграє ключову роль у контролі глибини руйнування і дозволяє регулювати ступінь подрібнення залежно від поставлених технологічних цілей.

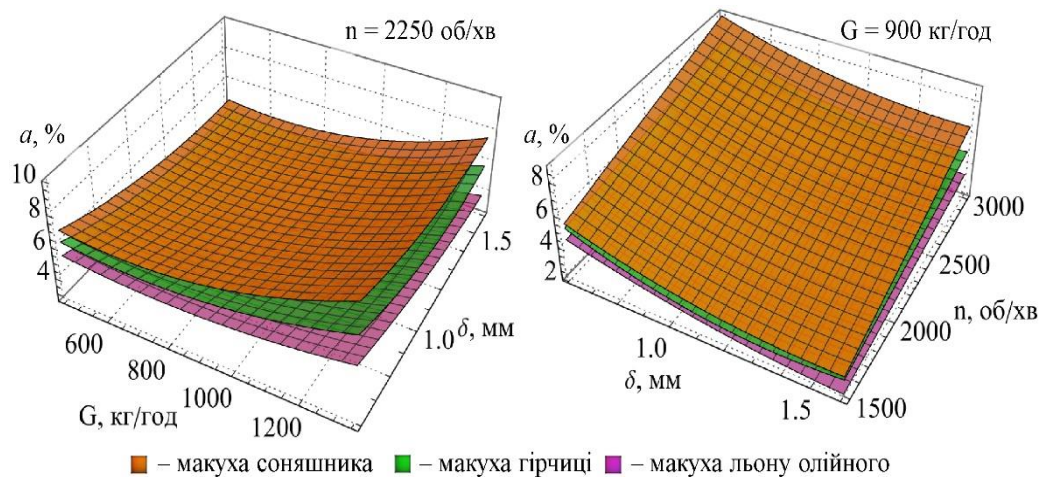


Рис. 4. Залежність частки пилоподібної фракції в подрібненій макусі різних культур a від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n

Ще одним із важливих показників якості процесу подрібнення є ступінь подрібнення, який відображає рівень зменшення розмірів частинок у результаті дії робочих органів дробарки. З метою кількісної оцінки цього параметра було здійснено статистичну обробку експериментальних даних та побудовано відповідні регресійні моделі, що описують залежність ступеня подрібнення від досліджуваних факторів.

Ступінь подрібнення:

– макуха соняшника:

$$\lambda^s = 3,51781 + 0,000357428n - 3,20295\delta + 1,11773\delta^2; \quad (13)$$

– макуха гірчиці:

$$\lambda^m = 3,40702 + 0,0002345n - 2,51973\delta + 0,780097\delta^2; \quad (14)$$

– макуха льону олійного:

$$\lambda^f = 3,1515 + 0,000164312n - 1,89426\delta + 0,547372\delta^2; \quad (15)$$

Графічна інтерпретація залежностей (13)–(15) представлена на рис. 5.

Серед досліджуваних факторів найменший вплив на ступінь подрібнення має подача макухи в камеру подрібнення – її варіювання практично не змінювало характер контакту частинок макухи з робочими органами. З фізичної точки зору, при сталому режимі роботи й неперевищенні граничної щільності завантаження, подача не спричиняє значних змін у траєкторії руху частинок макухи чи його взаємодії з подрібнювальними елементами.

Частота обертання робочого органу проявила помірний вплив. Зі зростанням частоти обертання ступінь подрібнення поступово підвищувалася. Це пов'язано зі збільшенням кінетичної енергії, що передається частинкам макухи при контакті з дисками. Вищі швидкості сприяють інтенсивнішому впливу з боку сил інерції, що підвищує ймовірність виникнення крихких руйнувань та багатократного дроблення частинок. Особливо виражений цей ефект у випадку кукурудзи, структура якої дозволяє реалізувати подібні механізми руйнування навіть при помірних навантаженнях.

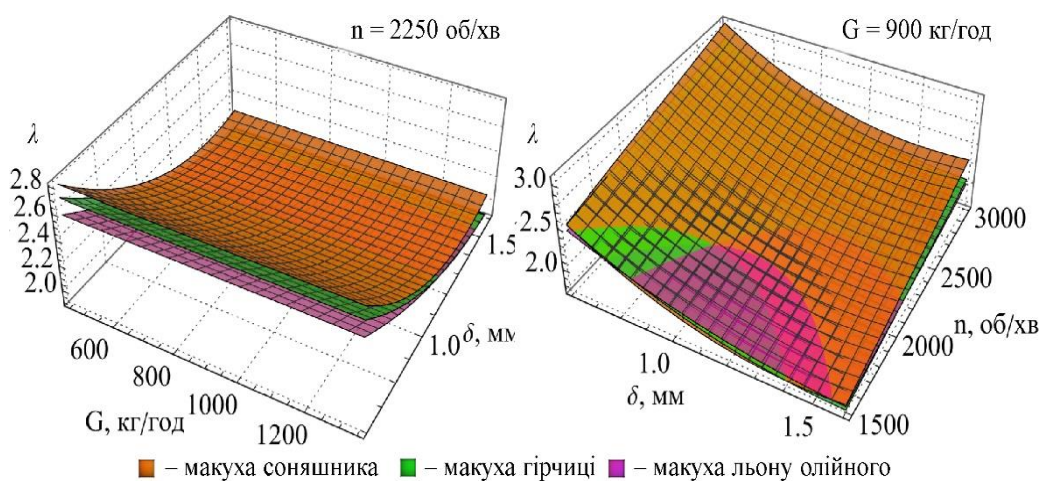


Рис. 5. Залежність ступеня подрібнення макухи різних культур λ від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n

Найбільш суттєвий вплив виявив модульний зазор між дисками. Зі зменшенням зазору між робочими дисками ступінь подрібнення зростала. Це пояснюється тим, що зменшення простору між дисками призводить до зростання локального тиску і концентрації напружень у частинках макухи, що інтенсифікує процеси стиску, зсуву та розриву. У вузькому зазорі частинки макухи зазнає більш потужного контактного впливу з боку обох дисків, що сприяє глибокому руйнуванню, а також підвищує ймовірність повторного дроблення частково подрібнених фрагментів.

Таким чином, з фізичної точки зору, ступінь подрібнення визначається комбінацією кінетичної енергії робочих органів і геометричних обмежень у зоні подрібнення, які спільно формують інтенсивність і характер дії на макуху.

На основі отриманих моделей, що представлені у цьому підрозділі, у середовищі Wolfram Cloud було проведено чисельну оптимізацію (6) з метою знаходження таких поєднань факторів, за яких питома енергоємність та частка

пилоподібної фракції в подрібненій масі є мінімальними, а ступінь подрібнення – максимальний. Результати розрахунку наведені в таблиці 2.

На основі таблиці можна відзначити, що удосконалений робочий орган забезпечує стабільну подачу макухи в діапазоні від 1089 кг/год (льон олійний) до 1184 кг/год (гірчиця). Це свідчить про задовільну пропускну здатність системи при подрібненні макух різного складу й щільності. Найменша подача спостерігається при подрібненні лляної макухи, що, ймовірно, пов'язано з її вищою крихкістю та меншою щільністю порівняно з іншими культурами.

Модульний зазор між дисками варіює в межах 1,15–1,31 мм і встановлюється індивідуально для кожного виду макухи. Найменший зазор (1,15 мм) використовується для льону, що дозволяє досягти найвищого ступеня подрібнення ($\lambda = 1,96$), тоді як найбільший зазор (1,31 мм) застосовано при обробці гірчиці, що зумовлює дещо нижчий ступінь подрібнення ($\lambda = 1,83$).

Таблиця 2

Раціональні параметри процесу подрібнення з використанням удосконаленого робочого органу

Макуха	Соняшник	Гірчиця	Льон олійний
Подача макухи в камеру G , кг/год	1123	1184	1089
Модульний зазор між дисками δ , мм	1,23	1,31	1,15
Частота обертання диска n , об/хв	1642	1654	1625
Енергоємність процесу q , кВт·год/т	3,96	4,13	4,66
Частка пилоподібної фракції a , %	4,69	3,91	3,05
Ступінь подрібнення λ	1,85	1,83	1,96

Частота обертання дисків підтримується в досить вузькому діапазоні (1625–1654 об/хв), що свідчить про оптимальний режим обертання для забезпечення балансу між енергоємністю процесу та якістю подрібнення. Найнижча енергоємність (3,96 кВт·год/т) досягнута при подрібненні соняшникової макухи, тоді як для лляної макухи вона найвища (4,66 кВт·год/т), що може бути наслідком її більшої вологості або специфічної структури.

Частка пилоподібної фракції, яка може вважатися непридатною для подальшого використання, найменша у випадку льону (3,05%) і найбільша у соняшнику (4,69%). Це свідчить про високу якість тонкодисперсного подрібнення без надмірного зменшення часток при обробці лляної макухи.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача встановлені закономірності зміни питомої енергоємності подрібнення макухи соняшника, гірчиці і льону олійного q , частки пилоподібної фракції в подрібненій масі макухи a , ступеня подрібнення λ від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n . Залежно від фізико-механічних властивостей макухи, визначено раціональні параметри обертання ($G = 1089\text{--}1184$ кг/год, $\delta = 1,15\text{--}1,31$ мм, $n = 1625\text{--}1654$ об/хв) і енерговитрати ($q = 3,96\text{--}4,66$ кВт·год/т), що дозволяє знизити частку пилоподібної фракції ($a = 3,05\text{--}4,69\%$), досягти потрібного ступеня подрібнення ($\lambda = 1,83\text{--}1,96$).

References

- Aliiev EB (2023) Numerical modeling of agro-industrial production processes: textbook. Kyiv: Agrarian Science. 340 p. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
- Aliiev EB, Mykolenko SYu, Sova NA (2022) Technical and technological support for waste-free processing of grain raw materials into food products and feed: collective monograph / edited by E. B. Aliiev. Dnipro: LIRA. 192 p.
- Aliiev EB, Patsula OM, Hrytsenko VT (2017) Technology of comprehensive waste-free processing of oilseed cake with obtaining high-quality complete protein supplements in the form of pellets and solid biofuel: Scientific and methodological recommendations. Institute of Oil Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Electronic equivalent of the printed edition (e-book). Zaporizhzhia: STATUS. 96 p.
- Arrutia F, Binner E, Williams P, Waldron KW (2020) Oilseeds beyond oil: Press cakes and meals supplying global protein requirements. *Trends in Food Science & Technology*, 100: 88–102 DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.044
- Boac JM, Casada ME, Maghirang RG, Hamer JP (2010) Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 53(4): 1201–1216 DOI: 10.13031/2013.32577
- Danfoss. (n.d.). VLT® Micro Drive FC 51. Retrieved April 12, 2023, from https://www.danfoss.com/uk-ua/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-micro-drive-fc-51[https://www.danfoss.com/uk-ua/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-micro-drive-fc-51).
- Dudin V, Bilous I (2025) Patent application of Ukraine for utility model u202501193. Concentrated feed crusher. Applicants: Dudin V., Bilous I. Filed on March 20, 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1847229/>
- Dudin VYu, Bilous IM (2025) Investigation of the performance efficiency of a grain disc crusher. *Vibrations in Engineering and Technology*, 1(116): 56–63 DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-7
- Gunstone FD (2011) *Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses*. Blackwell Publishing. 352 p.
- Kyselyov OV, Komarova IB, Milko DO, Bakardzhiev RO (2017) Statistical processing and presentation of experimental research results (based on experience in writing dissertations): Textbook / edited by D. O. Milko; Institute of Mechanization of Animal Husbandry of the NAAS. Electronic equivalent of the printed edition (e-book). Zaporizhzhia: STATUS. 1181 p.
- Lyu F, Thomas M, Hendriks W, Van Der Poel A (2019) Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review. *Animal Feed Science and Technology*. 261. 114347. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2019.114347
- Thomas M, Hendriks W, Van Der Poel A(2018) Size distribution analysis of wheat, maize and soybeans and energy efficiency using different methods for coarse grinding. *Animal Feed Science and Technology*. 240: 11–21 DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2018.03.010
- Vadke VS (2024) *Principles of Vegetable Oil Extraction*. 1st Edition. CRC Press. 424 p.
- Vaculik P, Maloun J, Chládek L, Přikryl M (2013) Disintegration process in disc crushers. *Research in Agricultural Engineering*. 59(3): 98–104 DOI: 10.17221/28/2012-rae
- Vukmirovic D, Levic J, Fistes A, Colovic R, Brlek T, Colovic D, Djuragic O (2015) Influence of grinding method and grinding intensity of corn on mill energy consumption and pellet quality. *Hemijaska Industrija*, 70(1): 67–72 DOI: 10.2298/hemind141114012v
- Zhou Y, Zhao W, Lai Y, Zhang B, Zhang D (2020) Edible Plant Oil: Global Status, Health Issues, and Perspectives. *Front. Plant Sci*. 11: 1315. DOI: 10.3389/fpls.2020.01315

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF A DISC CRUSHER FOR OIL CAKE FROM NICHE OILSEED CROPS

E. B. Aliiev, I. M. Bilous

Dnipro State Agrarian and Economic University

The article presents the results of experimental research on the grinding process of oilseed cakes obtained from niche crops – sunflower, mustard, and linseed – using a modernized disc-type crusher. The study aims to enhance the energy and technological efficiency of the crushing process by replacing the standard working elements of the Potok RP-1 grinder with specially designed steel discs equipped with tungsten carbide (VK8) impact inserts. This modernization introduces an impulse-impact mechanism of action, which significantly improves the disintegration of the oil cake by concentrating energy in the contact zones and enhancing deformation energy transfer. To ensure accurate measurement and analysis, a specialized hardware-software experimental setup was developed. It includes a torque measurement system, high-precision weighing units (including a real-time continuous weighing system), a frequency converter-based drive controller, and a laboratory sieve shaker for granulometric analysis. This setup allowed for real-time data acquisition of torque, energy consumption, material throughput, and particle size distribution during the grinding process. Experimental investigations were carried out following the methodology of a Box–Behnken design of experiments. The influence of key adjustable parameters – rotor speed (1500, 2250, and 3000 rpm), inter-disc gap (0.6, 1.1, and 1.6 mm), and material feed rate (450, 900, and 1350 kg/h) – was studied in terms of specific energy consumption (kWh/t), dust fraction content (particles <0.2 mm), and degree of size reduction. Data were processed using the Wolfram Cloud environment to build regression models and perform numerical optimization. The results revealed that the inter-disc gap had the most significant influence on both energy consumption and grinding quality. A smaller gap intensified the crushing action and increased the dust fraction, while a wider gap reduced energy demand but also led to lower size reduction. Rotor speed had a moderate effect, primarily due to increased collision energy at higher speeds, while the feed rate showed minimal influence within the studied range. Numerical optimization determined rational grinding parameters for each crop: feed rate $G = 1089\text{--}1184$ kg/h, inter-disc gap $\delta = 1.15\text{--}1.31$ mm, and rotor speed $n = 1625\text{--}1654$ rpm. Under these conditions, specific energy consumption ranged from 3.96 to 4.66 kWh/t, dust content was reduced to 3.05–4.69%, and the degree of grinding ranged from 1.83 to 1.96. These findings confirm the viability of the proposed design solution and its suitability for processing oilseed cake from niche crops, ensuring high grinding efficiency while minimizing energy losses and the formation of undesirable fine fractions.

Key words: grinding of oil cake, disc crusher, specific energy consumption, degree of grinding, dust fraction content, niche oilseed crops, multifactor experiment, optimization.