

В.О. Шейченко¹, Д.О. Петраченко², Д.В. Шейченко¹¹Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна.²Відокремлений структурний підрозділ Глухівський агротехнічний фаховий коледж Сумського національного аграрного університету, м. Глухів, Україна.**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ЗАКРИТОГО РОБОЧОГО КОЛЕСА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРУШУВАННЯ НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ**

У статті досліджено ефективність циклічного обрушування насіння промислових конопель без попереднього калібрування у відцентровому обрушувачі із закритим робочим колесом. За частоти обертання 6000 ± 200 хв⁻¹ оцінено динаміку недорушу та вихід обрушеного ядра. Встановлено, що для повного обрушування партій насіння необхідно провести п'ять циклів. Для зниження витрат без втрати виходу обґрунтовано доцільність обмеження процесу трьома циклами, що сумарно забезпечує вихід ядра на рівні 29,88%.

Ключові слова: насіння конопель, ядро, відцентровий обрушувач, робоче колесо, ефективність обробки

V. Sheichenko, D. Petrachenko, D. Sheichenko

DETERMINATION OF THE IMPACT OF CLOSED-TYPE IMPELLER DESIGN ON THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL HEMP SEED SHELLING

The article presents the results of a study on the efficiency of the centrifugal dehulling method for industrial hemp seeds using a device equipped with a closed-sector impeller with four profiled radial channels.

At an impeller rotational speed of 6000 ± 200 rpm, the kernel yield in the first three cycles was 9.27%, 12.75%, and 7.86%, respectively, whereas the fourth and fifth cycles produced only 3.54% and 1.39%. The decrease in yield at later stages is explained by the increased strength of the seed hulls remaining after the previous cycles. The share of unhulled seeds gradually decreased from 71.24% after the first cycle to 1.90% after the fifth.

The results indicate that limiting the number of dehulling cycles to three is advisable, as it significantly reduces operating costs without reducing kernel yield. The geometry of the radial channels (20×20 mm, 44 mm long), combined with a rotational speed of 6000 rpm, provided sufficient centrifugal acceleration for effective dehulling. Within the tested design, the configuration with four channels was recognized as a technically justified solution for the basic setup.

Keywords: hemp seeds, kernel, centrifugal dehuller, impeller, processing efficiency

Постановка проблеми. У сучасних умовах аграрного виробництва спостерігається зростаючий попит до технологій перероблення насіння промислових конопель як джерела високоякісних харчових та технічних продуктів. Завдяки багатому хімічному складу це насіння знаходить активне застосування у харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості. Водночас центральним етапом технологічного процесу залишається ефективне обрушування насіння, що забезпечує одержання якісних ядер із мінімальними втратами.

Якісне обрушування ускладнюється високою варіативністю фізико-механічних властивостей насіння промислових конопель, що залежать від сорту, вологості, ступеня зрілості та морфологічної неоднорідності. Зазначене ускладнює розроблення універсальних технічних рішень. У зв'язку з цим актуальними є конструкції обрушувачів, що здатні ефективно працювати без попереднього калібрування сировини та в умовах змінної вологості.

Відцентровий метод визнано одним із найбільш перспективним технічним рішенням обрушування насіння. У зазначеному методі трансформують кінетичну енергію обертального руху робочого органу в ударне навантаження насіння, яке взаємодіє з відбивною поверхнею. Проте ефективність методу значною мірою залежить від конструкційних параметрів робочого органу (форми, кількості та профілю каналів колеса).

Незважаючи на поширення відцентрових пристроїв, у науковій літературі недостатньо досліджень щодо системного аналізу впливу конструкційних параметрів закритого робочого колеса на ефективність обрушування насіння промислових конопель. Ця обставина стримує створення адаптивних технічних рішень, які могли б ефективно використовуватися на підприємствах малого та середнього бізнесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Промислове вирощування та переробка насіння конопель стають дедалі актуальнішими, що зумовлено його цінним біохімічним складом [1], який забезпечує високу харчову й функціональну цінність кінцевих продуктів [2]. У сучасній практиці насіння конопель використовують як у натуральному вигляді, так і в перероблених формах: очищених ядрах, олії, білкових та клітковинних концентратах, а також борошні [3]. Серед цих продуктів особливо популярними є очищені від оболонки ядра, що мають підвищену концентрацію поживних речовин та добру біологічну доступність [4].

Якість і вихід ядер значною мірою залежить від типу обладнання, що використовують для обробування насіння. За принципом дії робочих органів виділяють кілька типів лушильних машин з [5]: вальцові, дискові, молоткові, відцентрові та комбіновані. Кожен тип обладнання має специфічні технічні характеристики та по різному взаємодіє з оболонкою насіння. Успішність застосування обладнання залежить від фізико-механічних властивостей насіння, таких як міцність, розмір, вологість та товщина оболонки. Невідповідність параметрів машини властивостям насіння призводить до пошкодження ядер, зменшує вихід продукції та ефективність очищення.

У дослідженні [6] проаналізовано ефективність роторного ударного обробування насіння вівса різних генотипів за варіативних агроекологічних умов. Автори вказують на суттєвий вплив швидкості обертання ротора на вихід цільного ядра та ступінь лушення. Відзначено оптимальний діапазон швидкостей, за якого досягають балансу між продуктивністю та мінімізацією втрат. Зазначені результати стосуються лише насіння вівса, яке суттєво відрізняється геометричними і механічними властивості від насіння конопель. Крім того, у роботі відсутній аналіз конструкції ударного елемента, що обмежує можливості узагальнення висновків для інших культур.

У роботі [7] досліджено особливості процесу ударного лушення насіння вівса за умов, наближених до виробничих. Автори детально описують залежність між швидкістю обертання ротора й показниками якості лушення: виходом цільних ядер, рівнем руйнування та кількістю недолушених зерен. Відзначено, що внаслідок специфічних фізико-механічних особливостей насіння вівса отримані результати важко безпосередньо застосовувати до обробування насіння промислових конопель.

У роботі [8] досліджено ефективність застосування різних типів лушильних машин для обробки рису та їх вплив на якість кінцевого продукту. Проаналізовано конструкційні параметри обладнання та режимні фактори, які визначають ступінь лушення, кількість битого зерна й фракційний склад готової продукції. У дослідженні розглянуто вальцові, дискові та ударні лушильники, що дозволило порівняти їхню ефективність залежно від конкретних технологічних умов. Результати дають змогу обґрунтувати вибір обладнання для рису, проте безпосередньо перенести ці рекомендації на насіння конопель неможливо внаслідок значних відмінностей в морфологічній структурі та фізико-механічних властивостях.

У роботі [9] наведено результати моделювання та експериментальних досліджень впливу схеми розміщення лопатей робочого колеса машини для лушення фісташок на ефективність процесу. Автори проаналізували вплив кута нахилу та кількості лопатей, а також розмірів горіхів на ступінь лушення та пошкодження ядер. Попри технічну інформативність, отримані висновки мають обмежене застосування до лушення дрібного насіння, зокрема конопель, через суттєві відмінності у формі, масі, щільності та міцності оболонки.

У роботі [10] наведено результати дослідження ефективності лушильної машини зі змінною декою, розробленої для лушення гречки. Конструкція пристрою включає робоче колесо з лопатями та обертову деку конічної форми, що уможливило варіювати параметри впливу на зерно. У процесі експериментів автори встановили залежність між швидкістю обертання ротора, деки та вологості зерна з одного боку, та коефіцієнтами лушення й цілісності ядер – з іншого. Дослідження має значення для вдосконалення лушення гречки, проте результати не можуть бути безпосередньо екстрапольовано на насіння промислових конопель внаслідок відмінностей в морфологічній будові та механічних характеристиках.

У роботі [11] оцінено продуктивність лушильної машини для рису, досліджено вплив сорту, вологості та попередньої підготовки сировини на показники лушення. Автори не навели чітких конструкційних характеристик машини, що обмежує можливість оцінки її адаптивності до насіння інших культур, зокрема конопель.

У роботі [12] досліджено вплив абразивного лушення на насіння зернобобових культур, зокрема сочевиці, нуту, квасолі та гороху. Наведено ефективність процесу залежно від попереднього кондиціонування, типу абразивної поверхні, тривалості обробки та вологості сировини. Представлено як вихід ядер, так і ступінь пошкодження. Відзначено, що за недостатньої вологості або тривалості лушення підвищується частка пошкодженого зерна. Результати дослідження фокусуються виключно на абразивному типі лушення, що передбачає механізм стирання оболонки, який є малоефективним або непридатним для насіння з високою олійністю, як у випадку з коноплями.

У роботі [13] наведено результати розроблення та експериментальних досліджень машини для лушення насіння моринги. Визначено вплив конструкційних та режимних чинників, таких як розмір отвору для подачі насіння, проміжок між ротором і стінкою корпусу, а також частота обертання

ротора, на продуктивність та ступінь лушення. Побудовано регресійні моделі, які дозволяють прогнозувати продуктивність машини. Специфічність культури з досить великим насінням унеможливує застосовувати зазначені результати для обрушування насіння промислових конопель.

У роботі [14] проаналізовано ефективність різних типів лущильного обладнання для насіння соняшнику, зокрема молоткового, ударного та дискового. Наведено кількісні показники виходу ядер, ступень обрушування та втрати. Акцентовано увагу на важливості підтримання оптимальної швидкості обертання ротора з метою мінімізації втрат.

У роботі [15] наведено спроби створення універсального механізму для обрушування різних зернових культур, таких як спельта, еммер та інші. Проте запропоновані рішення не забезпечили стабільної якості, мали низьку продуктивність і вимагали частого ручного налаштування для кожного нового виду зерна. Такі установки не дозволяли досягти прийнятного ступеня очищення, що обмежувало їхнє застосування у промислових умовах. Відсутність адаптації до фізико-механічних властивостей конкретного насіння призводила до надмірного пошкодження зерна або неповного видалення оболонки.

Відзначено, що універсальні конструкції не здатні забезпечити високих показників ефективності за умов роботи з різними культурами. Для кожного виду зерна доцільним є розроблення спеціального механізму, який врахує його геометричні, структурні та механічні особливості. Саме тому створення ефективного обрушувача для насіння промислових конопель, яке має характерну варіативність розмірів, маси та міцності оболонки, є актуальним та науково обґрунтованим напрямом дослідження.

За результатами проведеного порівняльного аналізу до найбільш ефективних віднесено відцентровий спосіб обрушування насіння промислових конопель, що ґрунтується на принципі ударної взаємодії. Зазначений спосіб уможливує стабільність роботи обладнання, високий вихід ядер за мінімального ступеня пошкодження за умов уникнення попереднього калібрування сировини. Відзначене підтверджує перспективність подальшого вдосконалення відцентрових конструкцій обрушувачів в напрямку уточнення конструкційних параметрів і режимів роботи для забезпечення оптимального балансу між продуктивністю та якістю продукту.

Постановка завдань. Метою роботи є підвищення ефективності виробництва насіння промислових конопель без попереднього калібрування чи унормування вологості шляхом циклічного обрушування партії робочим колесом закритого типу.

Задачі досліджень:

– встановити вплив циклічного обрушування партії насіння на ефективність руйнування оболонки;

– встановити вплив циклічного обрушування партії насіння на вихід ядра;

Викладення основного матеріалу. Відцентровий обрушувач, у якому реалізовано принцип однократного удару, позитивно зарекомендував себе за умов обрушування насіння промислових конопель [16]. Використання механізму дозволило проводити процес без попереднього калібрування, унормування вологості та одержати 28,0-38,0% готових ядер із засміченістю до 1,0% [17].

Дослідження проведено з метою встановлення ефективності обрушування насіння промислових конопель відцентровим пристроєм із закритим робочим колесом, що має чотири профільні отвори. Кількісно оцінено вихід готових ядер на кожному етапі циклічного обрушування однієї партії насіння, а також визначено доцільну кількість повторних циклів. Науковою гіпотезою відзначено доцільність повторного обрушування недообробленої фракції, проте кількість ефективних циклів потребує встановлення економічно обґрунтованої межі.

У межах дослідження конструкційною основою визначено відцентровий механізм із закритим робочим колесом з чотирма профільними отворами. Визначення впливу циклічної обробки за незмінних параметрах подачі, частоти обертання та геометрії каналів уможливило об'єктивно оцінити ефективність базової конфігурації обрушувача.

Обрушування насіння конопель проводили з використанням розробленого відцентрового пристрою. Пристрій для обрушування (рис. 1-а) містить корпус 1, робоче колесо 2 з каналами, що закріплено на валу електродвигуна 3, закриту робочу камеру 4, відбійну деку 5 з гладкою внутрішньою поверхнею, вивантажувальний лоток 6.

Робоче колесо закритого секторального типу з чотирма профільними отворами (рис. 1-б) містить два диска. Нижній диск глухий, із жорстким з'єднанням на валу. Верхній диск з

центральним завантажувальним отвором діаметром 74 мм. Між дисками формують чотири радіальні отвори квадратного перерізу розміром 20×20 мм і довжиною 44 мм, утворені гіперболічними боковими поверхнями секторів.

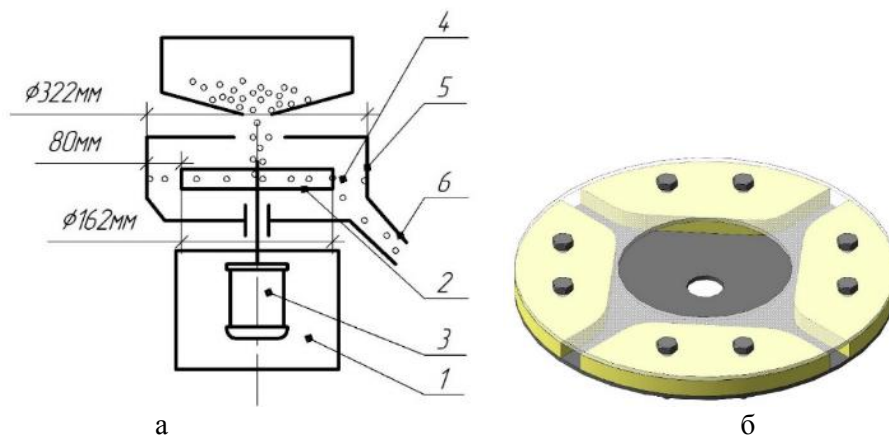


Рис. 1. Схема механізму (а) та робочого колеса (б)

Геометрію робочого колеса прийняли визначальною для забезпечення ефективного прискорення насіння до контактної швидкості. Профільовані отвори з гіперболічною формою бокових поверхонь створювали рівномірне розподілення зусиль на насінини за умов проходження через канал, що сприяло стабільному розгону без завихрень. Квадратна форма поперечного перерізу дозволила уникнути фіксації або обертання насінин під час проходження, що підвищило ймовірність руйнування оболонки при ударі. Довжина отвору та діаметр колеса узгоджені таким чином, щоб максимізувати відцентрове прискорення без перевищення межі руйнівної сили, здатної привести до пошкодження ядра. Завантажувальний отвір забезпечив стабільну подачу насіння у робочий простір, мінімізуючи ймовірність закупорювання каналів.

Частота обертання колеса в дослідях становила $6000 \pm 200 \text{ хв}^{-1}$. Насіння подавали зверху через конструкційний отвір у вільному сипучому стані в завантажувальний отвір робочого колеса. Там воно прискорювалося у профільованих каналах і спрямовувалося на внутрішню поверхню відбійної деки, що забезпечувало руйнування оболонки насіння. Ударну взаємодію реалізовували завдяки перетворенню кінетичної енергії насіння, що набувало швидкості під дією відцентрового прискорення, у імпульс контакту з жорсткою поверхнею деки. Унаслідок цього в оболонці виникали локальні напруження, що перевищували межу її міцності, спричиняючи відокремлення ядра.

Для досліджень використовували насіння промислових конопель сорту «Глесія», вирощене у виробничих посівах Інституту луб'яних культур НААН України. Насіння мало наступні показники: вологість 8,4%, засміченість органічними домішками 1,2%, маса 1000 насінин 17,46 г. Зазначені показники відповідали середнім для даного сорту.

Вологість насіння визначали відповідно до стандартної методики (ДСТУ 4138-2002) із використанням лабораторної сушильної шафи. Масу насіння та фракцій рушанки встановлювали зважуванням на електронних вагах з точністю до 0,01 г. Для кожного варіанта обрушування формували наважку масою 1000 г. Кожен експериментальний варіант повторювали п'ять разів з метою забезпечення достовірності результатів.

Обрушування проводили без попереднього калібрування насіння. Початкову пробу масою 1000 г завантажували в пристрій і піддавали обрушуванню (перший цикл). У результаті отримували рушанку: суміш ядер, залишків оболонок і недообрушеного насіння.

Для подальшого розділення фракцій використовували повітряно-решітний сепаратор, який забезпечував відокремлення компонентів рушанки. Після очищення виділяли три основні фракції: 1 – недорухане та пошкоджене насіння; 2 – готові ядра; 3 – відходи.

Недообрушену фракцію повертали на повторне обрушування (другий цикл). Циклічність повторювали доти, поки кількість залишків у вигляді недообрушеного насіння не зменшувалася до 2-4% від початкової маси.

Після завершення кожного циклу обрушування окремо визначали масову частку отриманих ядер, що дозволяло оцінити ефективність кожного окремого етапу. Після виконання всіх циклів результати підсумовували, визначали загальний вихід ядер відносно початкової маси проби.

Зазначений методичний підхід уможливив як кількісно охарактеризувати ефективність кожного циклу, так і встановити сумарну продуктивність обрушування.

Статистичне оброблення результатів здійснювали у програмному середовищі Microsoft Excel з вбудованим модулем «Аналіз даних». Застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) для перевірки наявності статистично значущих відмінностей між циклами обрушування. Порівнювали не лише вихід готових ядер, але й частку недорученого насіння. Аналіз здійснювали за рівнем значущості $\alpha = 0,05$. Також перевіряли відповідність вибірових даних нормальному розподілу за критеріями асиметрії та ексцесу. Стандартне відхилення не перевищувало 4% для основних показників.

Контроль точності вимірювань здійснювали за допомогою електронних аналітичних ваг з похибкою не більше $\pm 0,01$ г. Повторюваність дослідів забезпечували шляхом дотримання однакових умов обрушування для кожної серії: постійна маса початкової наважки, стабільна частота обертання робочого колеса, стабільна подача оброблюваної сировини, стабільна вологість насіння, незмінна конфігурація робочого органу. Кожен варіант досліду повторювали п'ять разів, результати фіксували та опрацьовували статистично. Температуру повітря в лабораторному приміщенні підтримували на рівні 25 ± 1 °С.

Змінення кількості недорученого насіння після кожного циклу обрушування наведено на рис. 2.

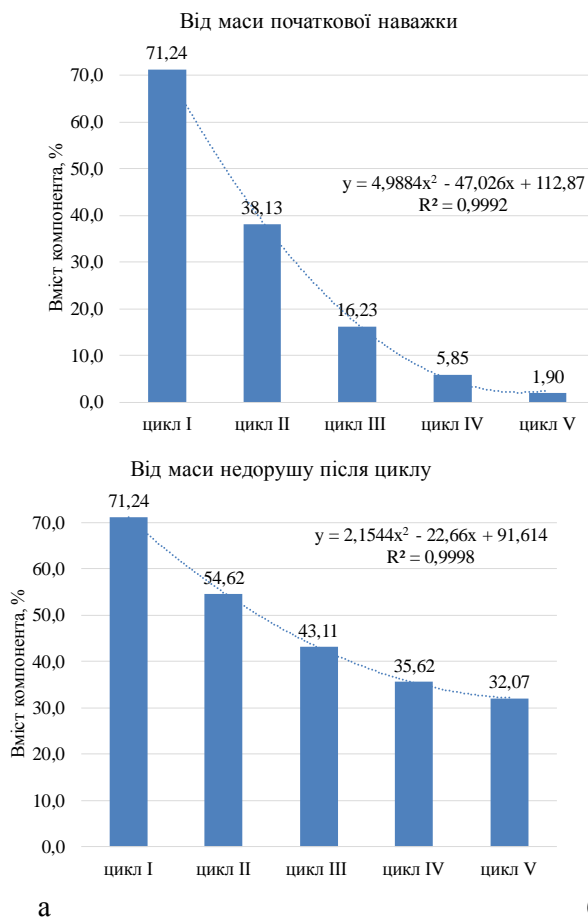


Рис. 2. Змінення кількості недорученого насіння в залежності від маси початкової наважки (а) та від маси недорученого насіння після циклу (б)

У табл. 1 наведено результати статистичного оброблення отриманих даних з визначення кількості недорученого насіння після кожного циклу обрушування.

Наведені у (табл. 1) результати свідчать, що варіація між групами є значно більшою, ніж варіація всередині груп. Це підтверджує наявність суттєвого впливу фактору, що розрізняє групи, на досліджувану змінну. Результати обробки вказують на високу статистичну значущість цих відмінностей.

На рис. 2 наведено залежність змінення кількості недорученого насіння під час обрушування за п'ять циклів. На рис.2-а – від маси початкової наважки, на рис.2-б – від маси недоручу після кожного циклу. Відповідно до рис.2-а спостерігається значне зменшення залишків недоручу після кожного циклу. Після першого циклу недоручене насіння становило 71,24%. Після другого циклу цей показник зменшився до 38,13%, після третього – до 16,23%, після четвертого – до 5,85%. А після п'ятого циклу залишилося лише 1,90% необробленого насіння від загальної маси партії. Зазначені результати засвідчують загальну тенденцію процесу, – основну частину насіння обрушено на перших трьох циклах. На пізніх етапах залишалися більш стійкі до механічного впливу та руйнування зерна, що ймовірно зумовлено їх специфічною структурою.

Табл. 1

Статистично оброблені результати досліджень з визначення кількості недорученого насіння після кожного циклу обрушування

Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F критичне
Між групами	16368,76	4	4092,19	205,2306	6,23E-16	2,866081
В середині груп	398,7896	20	19,93948	-	-	-

Відповідно до рис.2-б, що відображає кількість недорученого насіння у відсотках від маси недоручу після кожного циклу, відзначено змінення ефективності з урахуванням кожного наступного етапу обробітку. Після першого циклу недоручене насіння становило 71,24% (від початкової маси 100%). Після другого циклу залишилося 54,62% від недоручу (від початкової маси 71,24%). Тобто обробітку не піддалося половина зерен, що не обрушилися на першому етапі. Після третього циклу недорученими залишилося 43,11% (від початкової маси 54,62%), що відповідає приблизно чвертині від попередньої маси. Після четвертого циклу залишилося 35,62%, що становить близько третини недоручу після третього циклу, а після п'ятого циклу – 32,07%.

Відзначено, що на початкових циклах обрушуванню піддавалися переважно зерна зі слабкою структурою оболонки. На заключних етапах залишалися більш стійкі фракції. Зменшення кількості недорученого насіння на кожному наступному циклі свідчить про зменшення доступної для обрушування маси, що обмежує ефективність процесу на пізніх етапах.

Змінення кількості обрушених ядер після кожного циклу наведено на рис. 3.

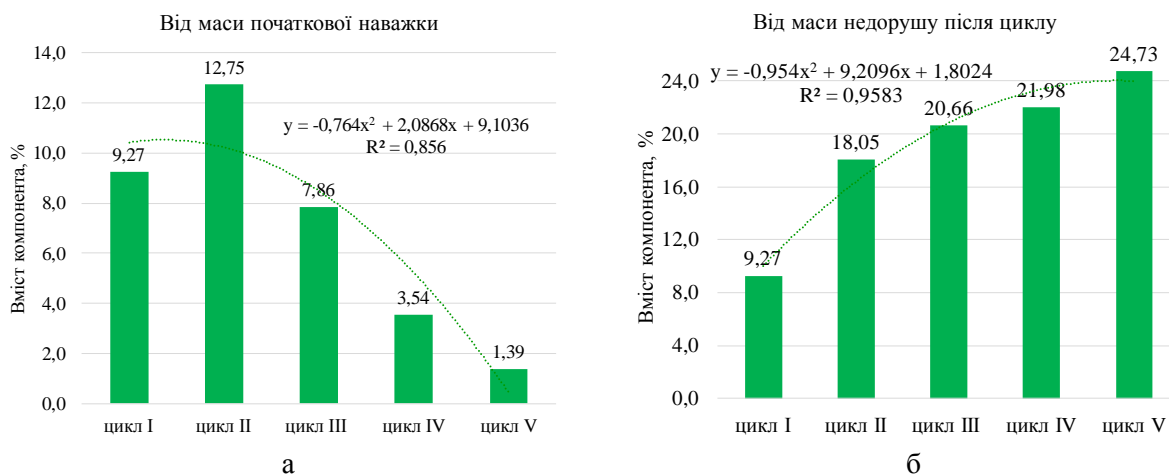


Рис. 3. Змінення кількості ядер за циклами обрушування в залежності від маси початкової наважки (а) та від маси недорученого насіння після циклу (б)

У табл. 2 наведено результати статистичного оброблення отриманих даних з визначення кількості ядер після кожного циклу обрушування.

Аналізом результатів дослідження (табл. 2) встановлено наявність статистично значущих відмінностей між групами. Отримане значення F-критерію суттєво перевищує критичне, а рівень значущості є набагато меншим за 0,05, що підтверджує достовірність впливу досліджуваного фактора. Варіація між групами істотно перевищує варіацію всередині груп, що свідчить про реальний ефект факторної ознаки.

На рис.3-а наведено результати досліджень з визначення виходу ядер у відсотках від початкової маси. Відзначено поступове зменшення ефективності виділення ядер у кожному наступному циклі. Після першого циклу отримано 9,27% ядер. Після другого циклу – 12,75%, після третього – 7,86%, після четвертого – 3,54%, а після п'ятого циклу – 1,39%, відповідно. Загальний вихід ядер за всі п'ять циклів становив 34,81% від початкової маси.

Табл. 2

Статистично оброблені результати досліджень з визначення кількості недорученого насіння після кожного циклу обрушування

Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F критичне
Між групами	412,0004	4	103,00011	104,2291805	4,2584E ⁻¹³	2,866081
В середині груп	19,76416	20	0,988208	-	-	-

На рис. 3-б наведено вихід ядер у відсотках від маси недоручу після кожного циклу. У першому циклі отримали 9,27% ядер від початкової маси недоручу. На другому циклі цей показник збільшився до 18,05%, на третьому – до 20,66%, на четвертому – до 21,98%, а на п'ятому – до 24,73%, відповідно. Збільшення частки ядер відносно залишків недоручу після кожного циклу свідчить про те, що обрушування стосується все меншої кількості, яка більш доступна для руйнування насіння.

Порівнюючи результати досліджень (рис. 2 та рис. 3) відмітимо взаємозв'язок між ефективністю обрушування та виходом готового продукту. Значна кількість недоручу (71,24%) після першого циклу свідчить про те, що обрушуванню піддається насіння зі слабкою структурою оболонки. Решта насіння залишається недостатньо обробленим внаслідок природньо існуючого нерівномірного механічного впливу, а також значним діапазом коливань механіко-технологічних властивостей насінин. У другому циклі помітне зменшення недорученого матеріалу (38,13%) свідчить про те, що більша частина залишків піддається руйнуванню, оскільки кінетична енергія в цьому випадку більш ефективно спрямована на насіння, яке залишилося. Третій цикл характеризувався зменшенням загальної ефективності обрушування, оскільки залишилося переважно насіння зі стійкою структурою оболонки, яке важко руйнувати за встановлених параметрів процесу. Не зважаючи на те, що частка ядер ще залишалася значною, темпи його приросту поступово зменшувалися. На четвертому та п'ятому циклах обрушуванню піддається мінімальна кількість насіння, а його залишки стають дедалі менш доступними для руйнування внаслідок їхньої підвищеної міцності.

Аналізуючи наведені результати досліджень відмітимо, що основний обсяг ядер виділяли на перших трьох циклах. Застосування встановлених параметрів і режимів роботи обрушувача на подальших циклах характеризувалося низькою продуктивністю. Зазначене вказує на актуальність подальших досліджень направлених на підвищення ефективності технологічного процесу обрушування насіння конопель.

У подальшому перспективним виглядає дослідження змінення кількості каналів або параметрів траєкторії насіння з метою зменшення кількості циклів до двох або трьох без зменшення обсягів загального виходу ядер. Запропоновану методику доцільно адаптувати до інших сортів конопель, за умови уточнення фізико-механічних властивостей насіння.

Висновки. Наведено результати дослідження ефективності відцентрового методу обрушування насіння промислових конопель за допомогою пристрою із робочим колесом закритого секторального типу з чотирма профільними отворами. Встановлено, що обрушування без попереднього калібрування забезпечує загальний вихід ядер на рівні 34,81% із засміченістю не більше 1%.

За частоти обертання робочого колеса 6000 ± 200 хв⁻¹ вихід ядер на перших трьох циклах становив 9,27%, 12,75% та 7,86% відповідно, тоді як на четвертому та п'ятому циклах – лише 3,54% і 1,39%. Зменшення виходу пов'язане з підвищеною міцністю оболонок залишкових насінин. Частка недообрушеного насіння поступово зменшувалася від 71,24% після першого циклу до 1,90% після п'ятого.

Отримані результати засвідчили доцільність обмеження кількості циклів обрушування до трьох, що в сукупності зменшило експлуатаційні витрати без втрати виходу ядер. Геометрія каналів (20×20 мм, довжина 44 мм) у поєднанні з частотою обертання 6000 об/хв. забезпечили достатній

рівень відцентрового прискорення для ефективного обрушування. У межах досліджуваної конструкції встановлено, що чотири отвори є обґрунтованим технічним рішенням для базового варіанту.

Література

1. Farinon B., Molinari R., Costantini L., Merendino N. (2020), The seed of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): Nutritional quality and potential functionality for human health and nutrition, *Nutrients*, 12(7), 1935, <https://doi.org/10.3390/nu12071935>
2. José Ignacio Alonso-Esteban, José Pinela, Ana Ćirić, Ricardo C. Calhella, Marina Soković, Isabel C.F.R. Ferreira, Lillian Barros, Esperanza Torija-Isasa, María de Cortes Sánchez-Mata. (2022). Chemical composition and biological activities of whole and dehulled hemp (*Cannabis sativa* L.) seeds. *Food Chemistry*, Volume 374, 2022, 131754. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131754>.
3. Oseyko M., Sova N., Yefimov V., Petrachenko D. (2024), Chemical composition of seeds of industrial Ukrainian hemp varieties, *Ukrainian Food Journal*, 13(3), pp. 542–556, <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-3-8>
4. Montero Lidia, Ballesteros-Vivas Diego, Gonzalez-Barrios Andrés Fernando, Sánchez-Camargo Andrea del Pilar. (2023). Hemp seeds: Nutritional value, associated bioactivities and the potential food applications in the Colombian context. *Frontiers in Nutrition*, V. 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1039180>
5. Kabir, A. A., and Fedele, O. K. (2018). A Review of Shelling, Threshing, De-Hulling and Decorticating Machines. *Journal of Agricultural Research*, 3(1), pp. 1–10, <https://doi.org/10.23880/oajar-16000148>.
6. Baker, A., Dwyer-Joyce, R. S., Briggs, C., and Brockfeld, M. (2012). Effect of different rubber materials on husking dynamics of paddy rice. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 226(6), pp. 516–528, <https://doi.org/10.1177/1350650111435601>
7. Doehlert, D. C., Wiesenborn, D. P., McMullen, M. S., Ohm, J.-B., and Riveland, N. R. (2009). Effects of impact dehuller rotor speed on dehulling characteristics of diverse oat genotypes grown in different environments. *Cereal Chemistry*, 86(6), 653–660, <https://doi.org/10.1094/CCHEM-86-6-0653>.
8. Yehia, M. E., and Katab, A. R. (2018). Effect of hulling machines on hulling characteristics and quality of rice grains. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 35(1), 259–274, <https://doi.org/10.21608/mjae.2018.95604>.
9. Khodabakhshian, R., and Bayati, M. R. (2011). Investigation into the effects of impeller vane patterns and pistachio nut size on hulling efficiency of pistachio nuts using a centrifugal huller. *Journal of Food Processing & Technology*, 2, 115, <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000115>.
10. Dmitriev, A., Ziganshin, B., Khaliullin, D., and Aleshkin, A. (2020). Study of efficiency of peeling machine with variable deck. *Engineering for Rural Development*, 19, Jelgava, Latvia, pp. 1053–1058, <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF249>.
11. Dauda, S. M., Adeoye, P. A., Bello, K., and Agboola, A. A. (2012). Performance evaluation of a locally developed rice dehulling machine. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 2(1), 15–21.
12. Dave Oomah B. (2006). Factors Affecting the Efficiency of Abrasive Type Dehulling of Grain Legumes Investigated with a New Intermediate-Sized, Batch Dehuller. *Journal of Food Science*, 49(1), 267–272. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1984.tb13723>.
13. Fakayode, O. A., and Akpan, J. F. (2020). Development, Testing and Optimization of a Moringa (*Moringa oleifera*) Seed Dehuller. *Agricultural Research*, 9(2), pp. 249-261, <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00426-6>.
14. Romanic R. S., and Luzaic, T. Z. (2022). Dehulling Effectiveness of High-Oleic and Linoleic Sunflower Oilseeds Using Air-Jet Impact Dehuller: A Comparative Study. *Food Science and Technology (Campinas)*, 42, e58620, <https://doi.org/10.1590/fst.58620>.
15. Baker, B. (2015). Dehulling ancient grains: economic considerations and equipment. Retrieved January 08, 2025, from <https://eorganic.org/node/13028>
16. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Koropchenko, S., Rogovskii, I., Gorbenko, O., Volianskyi, M., Sheichenko, D. (2024). Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (128)), 34–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>
17. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., Shatrov, R. (2024-2). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 54–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869>