

NUMERICAL MODELING OF A MACHINE FOR SEPARATION AND CLEANING OF CASTOR BEAN SEEDS FROM FRUITS

E. Aliiev *, H. Tesliuk, V. Holovchenko

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine



ABSTRACT

*In modern EU strategies, the development of the bioeconomy plays an important role, aiming at the gradual replacement of petrochemical raw materials with biological ones. The agricultural sector can make a significant contribution to this process by cultivating industrial crops on low-productive lands. One of the promising crops is castor bean (*Ricinus communis* L.), which is suitable for technical oil production. However, its harvesting and processing are complicated due to the uneven ripening of the fruits and the lack of specialized machines.*

This study proposes a new design of a machine for cleaning castor bean seeds, which combines mechanical fruit shell destruction with subsequent aerodynamic cleaning. The proposed machine integrates crushing and reverse cones with rubber linings to break the fruit shells without damaging the seeds, along with an aerodynamic cleaning system for removing light impurities. Using numerical modeling in Simcenter Star-CCM+, based on DEM and CFD methods, the interaction between the fruits and the machine's working parts as well as the separation processes were analyzed. Regression equations were developed to determine the seed separation productivity, the share of unthreshed fruits, and the content of viable seeds in the seed collector, depending on technological parameters. The optimal values are: the gap between the crushing and reverse cones – 8.6 mm; the rotation speed of the crushing cone – 291 rpm; the feed opening diameter – 98 mm; the cone axis inclination angle – 3.6°; the airflow velocity – 6 m/s; and the sieve inclination angle – 20.3°. The proposed machine ensures high-quality cleaning of castor bean seeds with minimal damage, increases productivity, and reduces dependence on manual labor, which is crucial for the industrial processing of this crop.

Key words:

castor bean,
seed,
cleaning,
modelling,
optimization

Article history:

Received
Accepted

***Corresponding author:**

aliiev@meta.ua

DOI: 10.36910/acm.vi51.1853

To cite this article:

Aliiev, E., Tesliuk, H., & Holovchenko, V (2025). Numerical Modeling of a Machine for Separation and Cleaning of Castor Bean Seeds from Fruits. *Agricultural Machines*, 51, 147-158.
<https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1853>

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАШИНИ ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ НАСІНИН РИЦИНИ ВІД ПЛОДІВ

Е.Б. Алієв *, Г.В. Теслюк, В.В. Головченко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна



АНОТАЦІЯ

У сучасних стратегіях ЄС важливе місце займає розвиток біоекономіки, що передбачає поступову заміну нафтохімічної сировини біологічною. Аграрний сектор може зробити суттєвий внесок у цей процес шляхом використання технічних культур на малопродуктивних землях. Однією з перспективних культур є рицина (*Ricinus communis* L.), яку доцільно вирощувати для виробництва технічної олії. Однак її збирання та переробка ускладнені нерівномірним дозріванням плодів та відсутністю спеціалізованих машин. У роботі запропоновано нову конструкцію машини для очищення насіння рицини, яка поєднує механічне руйнування плодів із подальшим аеродинамічним очищенням. Запропонована машина поєднує дробильний та зворотний конуси з гумовими футеровками для руйнування оболонок плодів без пошкодження насіння, а також систему аеродинамічного очищення для видалення легких домішок. За допомогою чисельного моделювання у середовищі Simcenter Star-CCM+ з використанням DEM та CFD методів проведено аналіз взаємодії плодів із робочими органами машини та процесів сепарації. Побудовано рівняння регресії для визначення продуктивності відокремлення насіння, частки нерозлучених плодів та вмісту ліквідного насіння у збірнику залежно від технологічних параметрів. Оптимальні значення: відстань між дробильним і зворотним конусами – 8,6 мм; частота обертання дробильного конуса – 291 об/хв; діаметр отвору подачі – 98 мм; кут нахилу осі конуса – 3,6°; швидкість повітряного потоку – 6 м/с; кут нахилу решета – 20,3°. Запропонована машина забезпечує якісне очищення насіння рицини при мінімальних пошкодженнях, підвищує продуктивність і дозволяє знизити залежність від ручної праці, що є актуальним для промислової переробки цієї культури.

Ключові слова:

рицина,
насіння,
очищення,
моделювання,
оптимізація

Історія публікації:

Отримано
Затверджено

*Автор для листування:

aliev@meta.ua

DOI: 10.36910/acm.vi51.1853

Цитувати цю статтю:

Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В., & Головченко, В.В. (2025). Чисельне моделювання машини для відокремлення і очищення насіння рицини від плодів. Сільськогосподарські машини, 51, 147-158. <https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1853>

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У відповідності до сучасних стратегій ЄС, спрямованих на розвиток біоекономіки, промисловість має зменшити залежність від традиційної нафтохімії, орієнтуючись на сировину біологічного походження (Janiszewska et al, 2021; Wydra et al, 2021). Аграрний сектор, у свою чергу, може зробити суттєвий внесок у цей процес, зокрема шляхом ефективнішого використання побічних продуктів олійних культур (Park et al, 2021; Román-Figueroa et al, 2020). Проте розширення площ під технічними культурами створює ризики конкуренції між продовольчими і непродовольчими напрямками сільського господарства (Gelfand et al, 2013). Одним із шляхів розв'язання цієї проблеми може стати використання малопродуктивних земель для вирощування технічних культур, що дозволить одночасно досягати енергетичних цілей ЄС та уникнути скорочення площ під продовольчі посіви (Von Cossel et al, 2019; D'Avino et al, 2020). У цьому контексті актуальним є дослідження і розвиток виробничих ланцюгів, пов'язаних з культурами, що потребують мінімальних ресурсів для вирощування.

Рицина (*Ricinus communis* L.) є однією з перспективних непродовольчих культур (Zanetti et al, 2013; Alexopoulou et al, 2015) придатних для вирощування на бідних ґрунтах в умовах України. Досвід вирощування показує, що врожайність насіння сортів рицини може становити 1,7–1,9 т/га (Олеся), 1,8–2,2 т/га (Хортичанка), 1,6–1,8 т/га (Хортицька 3) (Ведмедева та ін., 2018). Рицинову олію широко застосовують у різних сферах: для виробництва біопального, косметичних і фармацевтичних засобів, лакофарбової продукції, мастильних матеріалів для двотактних двигунів, а також у виробництві компонентів піноматеріалів для теплоізоляції (Carrino et al, 2020; Bateni et al, 2016; Ogunniyi, 2006). За умови створення ефективного внутрішнього ланцюга постачання, рицина може суттєво знизити залежність ЄС та України від імпорту технічних рослинних олій.

Особливістю культури є велика різноманітність дикорослих і напівкультурних форм *Ricinus communis* L., які демонструють значну генетичну та морфологічну мінливість, іноді досягаючи розмірів дерев (Anjani, 2012). Насіння рицини утворюється всередині плодів (капсул), які зібрані в китиці і дозрівають поступово, що призводить до нерівномірного дозрівання насіння (Vallejos et al, 2011; Pari et al, 2020). Така біологічна особливість значно ускладнює механізацію збирання. На ринку й досі відсутні спеціалізовані машини для механічного збирання рицини, тому процес здійснюється вручну, що підвищує собівартість продукції. Хоча для отримання насіннєвого матеріалу високих репродукцій ручне збирання є виправданим через невеликі обсяги (Алієв, 2019; Алієв, 2020), все ж виникає технічна потреба в ефективному відокремленні і очищенні насіння рицини від капсул.

Застосування стандартного обладнання для обрушення та очищення насіння інших культур (Петраченко та ін., 2023; Теслюк, 2020; Шевчук та ін., 2018) неприйнятне через високу ймовірність пошкодження насіння рицини. Це пов'язано з відмінностями у реологічних властивостях рицинових насінин порівняно з іншими олійними культурами. У зв'язку з цим постає актуальне завдання – розробити спеціалізовану машину для очищення насіння рицини та визначити її конструктивно-технологічні параметри.

Мета досліджень: формування наукових основ проектування та удосконалення технологічного процесу відокремлення і очищення насіння рицини шляхом чисельного моделювання механічної взаємодії плодів і насіння з робочими органами машини, з урахуванням фізико-механічних властивостей сировини та режимів обробки для забезпечення максимальної ефективності процесу при мінімальних пошкодженнях ліквідного насіння.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Машина для очищення насіння рицини (рис. 1) складається з основних функціональних вузлів: станини, завантажувального бункера, дробильного конуса, зворотного конуса з футеровкою, приводу, системи аеродинамічного очищення та блока керування.

Завантажувальний бункер із прутковою решіткою призначений для подачі сировини та відсіювання великих домішок. Під ним розташований зворотний конус із гумовою футеровкою, чотирма регульовальними гвинтами та зірочками, які через ланцюгову передачу забезпечують вертикальне переміщення вузла, змінюючи зазор між робочими поверхнями.

Усередині зворотного конуса змонтовано дробильний конус із ексцентриковим приводом. При обертанні та прецесії він створює нормальні і дотичні сили, які забезпечують руйнування плодів рицини, з подальшим відділенням насіння від частинок оболонок. Гумова футеровка дробильного конуса мінімізує ризик травмування насіння.

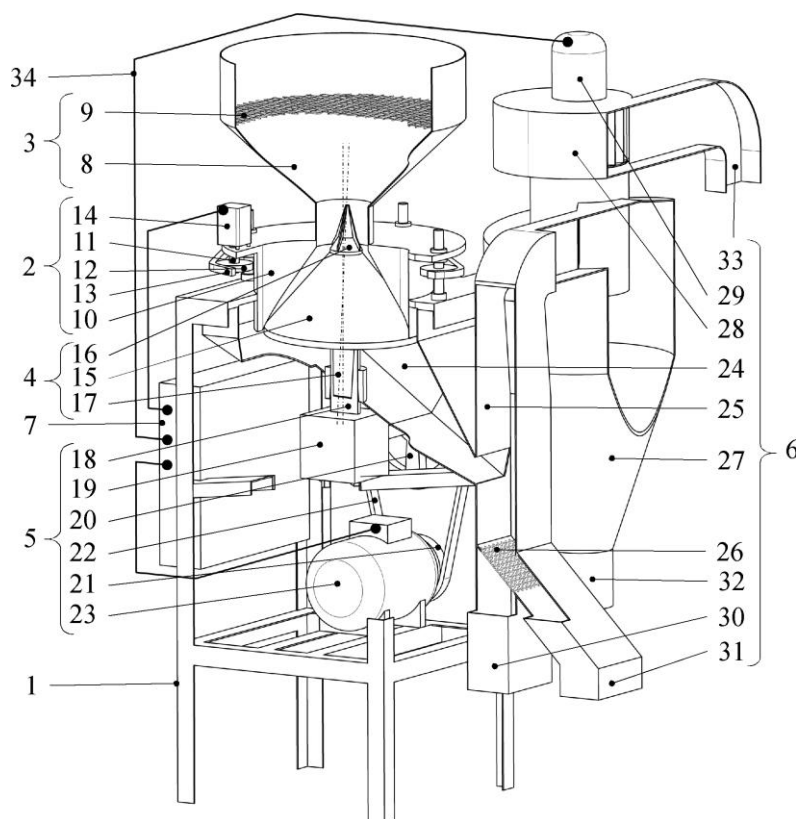


Рис. 1 – Машина для очищення насіння рицини

- 1 – станина; 2 – зворотній конус; 3 – завантажувальний бункер; 4 – дробильний конус; 5 – привід;
 6 – система аеродинамічного очищення; 7 – блок керування; 8 – сміст; 9 – пруткова решітка;
 10 – корпус із внутрішньою футеровою; 11 – регулювальний гвинт; 12 – зірочка; 13 – ланцюг;
 14 – мотор-редуктор; 15 – зовнішня футеровка; 16 – розподільник; 17 – конічний вал; 18 – конусний ексцентриковий стакан-вал; 19 – кутовий редуктор; 20 – ведений шків; 21 – ведучий шків;
 22 – ремінь; 23 – основний електродвигун; 24 – жолоб; 25 – пневмосепаруючий канал; 26 – решето;
 27 – циклон; 28 – відцентровий вентилятор; 29 – електродвигун вентилятора; 30 – забірник насіння;
 31 – забірник нерозлуцених плодів; 32 – забірник частинок коробочок; 33 – забірник дрібних частинок і пилу; 34 – електричні проводи

Привід машини складається з основного електродвигуна, ремінної передачі, кутового редуктора та ексцентрикового стакана-вала, що передає обертання дробильному конусу. Окремий мотор-редуктор змінює зазор між конусами, а вентилятор з циклонним віддільником створює повітряний потік для сепарації легких домішок.

Після руйнування плодів суміш надходить у систему аеродинамічного очищення, де легкі частинки відносяться потоком повітря в циклон і накопичуються в окремих бункерах для частинок коробочок та пилу. Насіння та нерозлучені плоди потрапляють на решето, де відбувається подальше сортування: насіння проходить через отвори і надходить до забірника насіння, а залишки плодів відводяться в інший бункер.

Керування основними параметрами процесу – частотою обертання дробильного конуса, продуктивністю вентилятора та зазором між конусами – здійснюється автоматично за допомогою блока керування. Це дозволяє адаптувати машину до різних умов переробки.

Переваги конструкції:

- поєднання механічного руйнування плодів з аеродинамічним очищенням;
- точне налаштування технологічних параметрів;
- гумові футеровки для запобігання пошкодженню насіння;
- ефективний ексцентриковий механізм для інтенсивної дії на плоди;
- чітке розділення продуктів переробки (насіння, оболонки, пил);
- зручне технічне обслуговування та автоматизація процесу.

Розроблена машина забезпечує високу продуктивність та якісне очищення насіння рідини, що є актуальним для промислового виробництва.

Чисельне моделювання процесу відокремлення і очищення насіння рідини від плодів під дією робочих органів машини проведено в середовищі Simcenter Star-CCM+ із використанням детермінованого підходу дискретних елементів (DEM) у поєднанні з механікою суцільного середовища.

Для забезпечення коректного відображення геометрії, контакту та деформаційних процесів у робочій зоні було прийнято наступні сіткові моделі: генератор багатограних комірок і поверхневої сітки. Генератор багатограних комірок обрано як основний засіб побудови об'ємної обчислювальної сітки для забезпечення високої якості моделі при меншій кількості комірок, що важливо для складної геометрії контактної взаємодії плодів рідини з робочими органами. Генератор поверхневої сітки застосовано для попередньої оптимізації геометрії з метою рівномірного покриття поверхонь та кращої відповідності імпортованим CAD-моделям. Базовий розмір сітки 0,01 м обрано з урахуванням геометричних розмірів плодів рідини (довжина $L = 14,8 \pm 2,2$ мм, ширина $B = 13,5 \pm 1,9$ мм), що забезпечує достатню точність просторового опису об'єкта дослідження при помірному обчислювальному навантаженні.

В середовищі Simcenter Star-CCM+ було реалізовано комплексний підхід, що охоплює взаємодію твердих тіл, газового середовища та контактної механіки частинок. Фізичну модель побудовано на основі середніх за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса, які описують рух в'язкого стисливого газу, з урахуванням рівняння стану ідеального газу. Це дозволяє точно описувати поведінку повітряного середовища, особливо в зонах локального стиснення та прискорення повітряного потоку в робочій зоні машини. Для врахування турбулентності застосовано модель k- ϵ , яка є однією з найбільш універсальних та стійких до розрахункових похибок моделей, і забезпечує опис як великих, так і малих вихорів у потоці.

Для відображення руху частинок плодів рідини та продуктів їх руйнування реалізовано лагранжеву багатофазну модель, у якій кожна частинка розглядається як незалежний об'єкт із власними кінематичними та фізичними характеристиками. У цьому контексті плід рідини змодельовано як сукупність частинок дискретних елементів (DEM), з урахуванням таких моделей як постійна щільність, скупчення частинок, що дозволяє відтворити складну внутрішню структуру плодів, зокрема багатокомпонентність, різну міцність оболонки та ядра.

Для моделювання взаємодії між частинками та навколишнім середовищем застосовано багатофазну взаємодію, що включала: опір коченню для опису перекошування насіння; фазову взаємодію DEM для обміну імпульсом між фазами; модель Герца–Міндліна для розрахунку контактних сил; зчеплені частинки для врахування когезійних зв'язків; модель одиночного руйнування для визначення моменту руйнування частинки під навантаженням.

Розрахунки проводилися у нестационарному неявному режимі, що дало змогу враховувати зміну навантаження з часом і уникнути нестабільностей, пов'язаних із великими часовими кроками. Сила тяжіння була увімкнена як глобальний фактор, що впливає на осадження частинок, їх скупчення та вплив на ефективність подальшого очищення.

Першим етапом моделювання є дослідження процесу руйнування плодів і відокремлення насіння під дією дробильного і зворотного конусів. Схема моделювання наведена на **рис. 2**.

В якості факторів досліджень обрано: діаметр отвору подачі D_{in} (60–140 мм), кут нахилу осі дробильного конусу γ (0–4°), частота обертання дробильного конусу n (200–400 об/хв), відстань між зворотнім і дробильним конусами δ (0–20 мм).

В результаті моделювання отримано сцену візуалізації процесу руйнування плодів рідини і відокремлення насіння і коробочок, яка представлена на **рис. 2**. На рисунку відображено динаміку контакту плодів з робочими поверхнями дробильного і зворотного конусів, де реалізується поетапне руйнування оболонки (коробочки) та вивільнення насіння. Частинки представлені у вигляді елементів моделі дискретних тіл (DEM), з чітким розмежуванням між уламками оболонок (сині субчастинки) і

ядрами насіння (червоні субчастинки). Також візуалізовано швидкість руху частинок й положення у просторі. Рисунок дає змогу наочно оцінити ефективність параметрів роботи дробарки, а також характер розподілу продуктів руйнування – що є важливим для подальшої оптимізації конструкції робочих органів і налаштування режимів подрібнення. Тому в якості критерію досліджень обрано частку нерозлущених плодів та сегментів ξ_f .

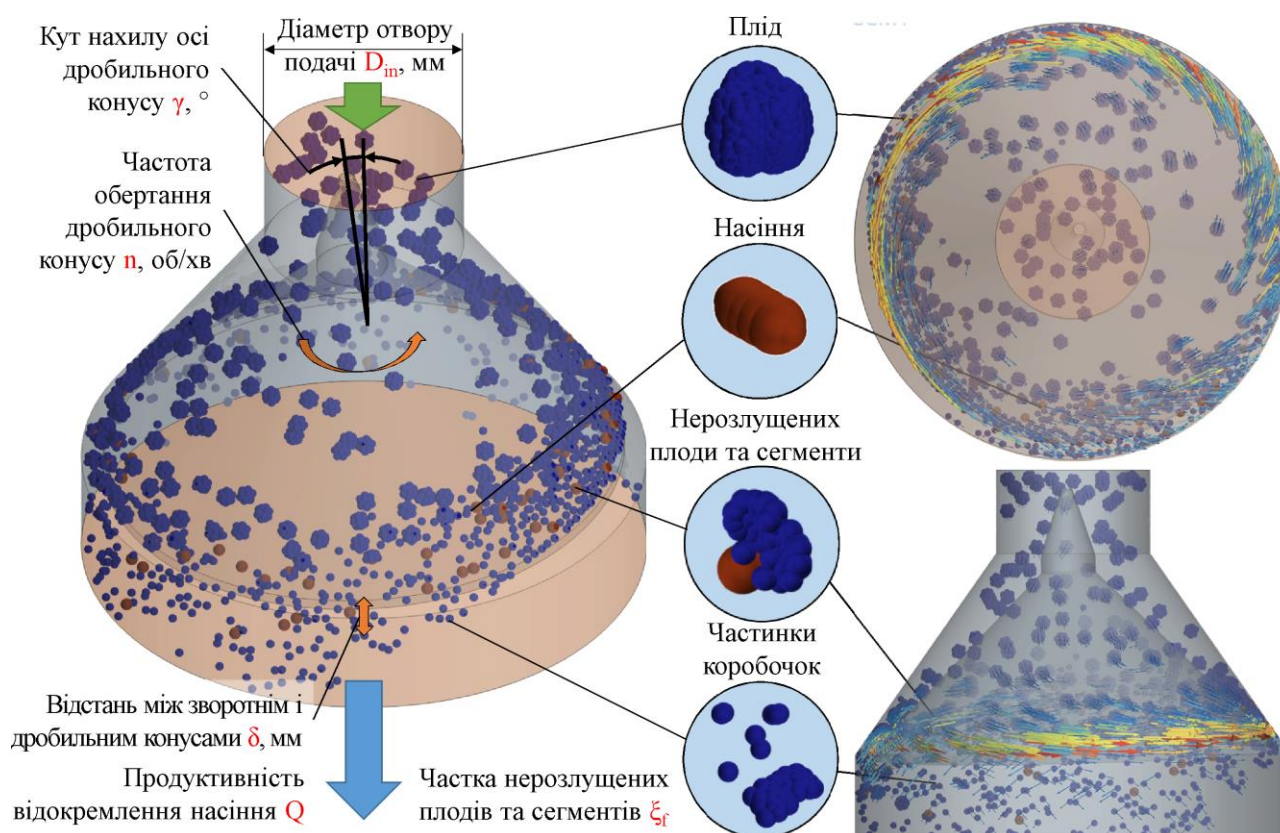


Рис. 2 – Постановка задачі чисельного моделювання процесу руйнування плодів і відокремлення насіння під дією дробильного і зворотного конусів

Другим етапом моделювання є процес очищення насіння рідини від нерозлущених плодів, залишків оболонок та частинок коробочок, який здійснюється в системі аеродинамічного очищення. Дана система складається з пневмосепаруючого каналу з установленим у ньому решетом, а також циклона для виділення легких домішок з повітряного потоку.

Пневмосепаруючий канал виконує функцію розділення матеріалу за аеродинамічними властивостями. Потік повітря, що проходить через канал, захоплює легші фракції – оболонки, частинки коробочок, пилові включення, а важчі насінини рідини та частина нерозлущених плодів осідають. Для забезпечення оптимальних умов розділення розміри каналу вибрано 220×220 мм, що відповідає рекомендаціям попередніх експериментальних і теоретичних досліджень (Кудрявцев, 2024; Kudriavtsev, 2024). Такі габарити забезпечують достатню площу перерізу для стабілізації повітряного потоку і ефективного сепарування суміші за крупністю та питомою вагою.

Циклон призначений для уловлювання виношених з каналу дрібних частинок та пилу. Його конструктивні параметри (висота, діаметр, співвідношення між вхідним і вихідним отворами) вибрано з урахуванням рекомендацій попередніх досліджень (Zhao et al, 2018; Wang, 2004), що дозволяє забезпечити високий ступінь очищення повітряного потоку при мінімальних втратах насіння.

Решето в пневмосепаруючому каналі виконує додаткову функцію поділу за розмірами. Використовується прутковий тип решета, що забезпечує ефективне пропускання насіння і затримання більших фрагментів коробочок. Розмір щілини між прутками вибрано 12 мм, що є

меншим за розміри плодів і більшим за розміри насінин рицини. Це дозволяє мінімізувати втрати насіння при одночасному ефективному видаленні більших за розміром домішок.

В рамках проведення моделювання та подальших експериментальних досліджень основним конструктивним фактором, що варіюється, є кут встановлення решета β . Зміна кута в межах від 10° до 40° (згідно з кутом природного укусу), дозволяє регулювати ефективність сепарації та забезпечує оптимальний режим роботи системи аеродинамічного очищення, впливаючи на напрям і швидкість руху частинок у повітряному потоці.

Схема моделювання наведена на рис. 3. Вхідний матеріал представлений сумішшю нерозлущених плодів та сегментів, насіння і частинок коробочок.

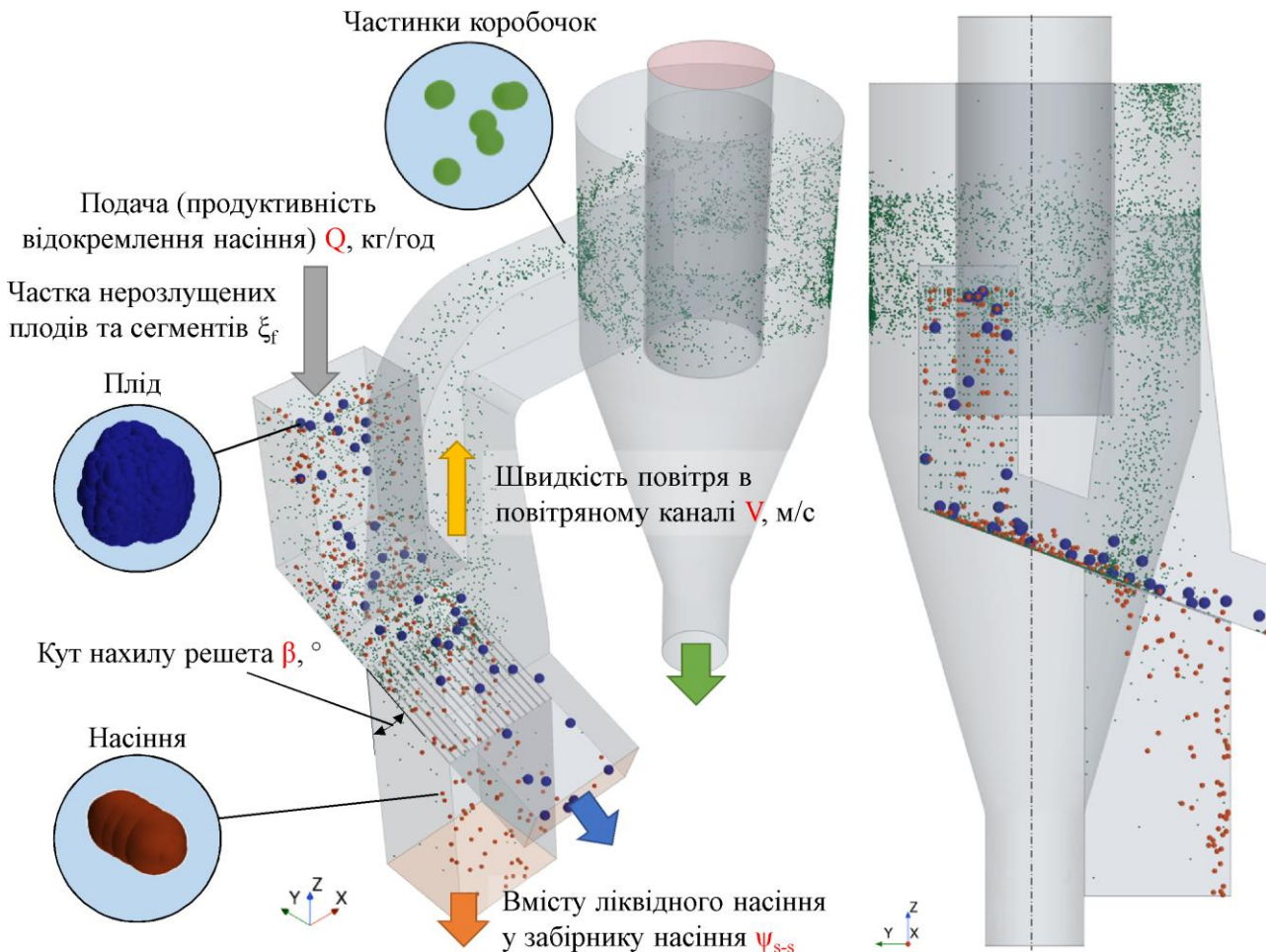


Рис. 3 – Постановка задачі чисельного моделювання процесу очищення насіння від плодів та частинок під дією повітряного потоку

За результатами першого етапу моделювання частка нерозлущених плодів та сегментів становить $\xi_f = 0,14$, частка насіння – $\xi_s = 0,61$, а частка частинок коробочок – $\xi_p = 0,25$. Подача (продуктивність відокремлення насіння) Q є одним із факторів дослідження. Згідно з першим етапом досліджень, значення Q знаходиться в межах від 30 кг/год до 230 кг/год. Третім фактором дослідження є швидкість повітря в пневмосепаруючому каналі V , яка варіюється в межах від 2 м/с до 6 м/с.

Критерієм дослідження є вміст ліквідного насіння у забірнику насіння ψ_{s-s} , який визначався в середовищі Simcenter Star-CCM+ автоматично кожні 0,1 с. Загальна тривалість моделювання становила 300 с.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У результаті чисельного моделювання із використанням програмного пакету Wolfram Cloud побудовано рівняння регресії другого порядку, що описують залежності досліджуваних критеріїв від впливових факторів.

Рівняння регресії для продуктивності відокремлення насінин Q (кг/год) подано у такій формі (рис. 4):

$$Q = -240,523 - 0,59051 D_{in} + 0,002264 D_{in}^2 + 2,36164 n + 0,0013958 D_{in} n - 0,00427722 n^2 + 6,68519 \gamma - 0,733333 \gamma^2 + 1,59111 \delta + 0,0190278 D_{in} \delta + 0,00917222 n \delta - 0,0602222 \delta^2. \quad (1)$$

За критерієм Фішера $F_{(1)} = 33,1 > F_{\alpha}(15, 66, 0.05) = 1,85$ рівняння (1) є статистично значущим.

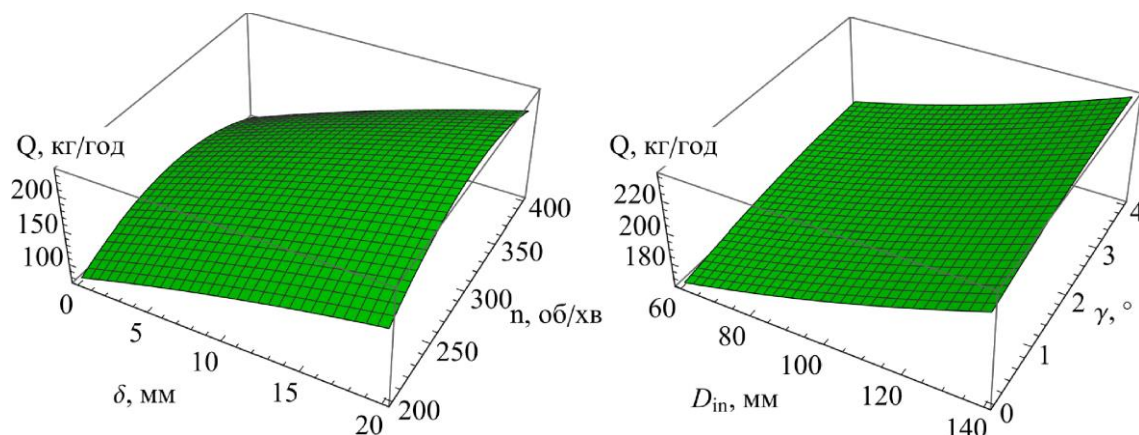


Рис. 4 – Залежність продуктивності відокремлення насінин рідини Q від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ , частоти обертання дробильного конусу n , діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ

Залежність (1) має нелінійний характер і включає як лінійні, так і квадратичні та комбіновані (взаємодійні) члени, що відображає складну фізико-механічну природу процесу руйнування плодів і відокремлення насіння. Фізично, зменшення або надмірне збільшення діаметра отвору подачі D_{in} може впливати на рівномірність надходження плодів у робочу зону, що, у свою чергу, позначається на стабільності процесу та рівні завантаження дробильного механізму. У рівнянні лінійний коефіцієнт при D_{in} має від'ємне значення, що вказує на загальну тенденцію до зменшення продуктивності при його збільшенні, однак квадратичний додатний член свідчить про наявність точки перегину, тобто певного оптимального значення, при якому негативний вплив згладжується.

Частота обертання дробильного конуса n позитивно впливає на інтенсивність руйнування плодів, оскільки збільшується кількість контактів і зростає динамічний тиск, проте надмірне підвищення n призводить до зниження продуктивності через перевантаження системи, підвищення інерційних втрат або виникнення хаотичних рухів у робочій зоні. Це підтверджується наявністю від'ємного квадратичного члена, що обмежує зростання ефективності при надмірно високих обертах.

Кут нахилу осі дробильного конуса γ визначає геометрію розміщення плодів у зоні стиску. Його позитивний вплив пояснюється покращенням умов подачі й стиснення плодів під дією сили тяжіння та осьових зусиль. Однак при надто великому куті можливе "випадання" плодів із зони ефективної дії, що відображається негативним квадратичним коефіцієнтом.

Відстань між дробильним і зворотним конусами δ безпосередньо впливає на ступінь стиснення плоду. При збільшенні відстані зменшується контактний тиск, що зменшує ефективність руйнування оболонки плоду, але надто мала відстань призводить до надмірного стискання, що може призвести до руйнування не лише оболонки, а й самого насіння. Наявність у рівнянні як позитивного лінійного, так і негативного квадратичного члена вказує на необхідність точного регулювання цього параметра.

Для досягнення максимального значення $Q = 236$ кг/год необхідно узгодити параметри ($\delta = 20$ мм, $n = 320$ об/хв, $D_{in} = 140$ мм, $\gamma = 4^\circ$) так, щоб забезпечити ефективне, але не надмірне стиснення

плодів, рівномірну подачу сировини, оптимальну швидкість обертання та сприятливу геометрію розміщення робочих органів.

Рівняння регресії для частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f має наступну форму (рис. 5):

$$\xi_f = 0,290644 - 0,00199167 D_{in} + 0,000014456 D_{in}^2 - 0,00124889 n + 2,30741 \cdot 10^{-6} n^2 - 0,0278889 \gamma + 0,0046852 \gamma^2 + 0,014887 \delta + 9,778 \cdot 10^{-6} n \delta - 0,000311111 \gamma \delta - 0,000378704 \delta^2. \quad (2)$$

За критерієм Фішера $F_{(2)} = 89,0 > F_t(15, 66, 0.05) = 1,85$ рівняння (2) є статистично значущим.

Форма рівняння (2) свідчить про складну нелінійну взаємодію між цими параметрами, що відображає фізичну суть процесу механічного руйнування плодів.

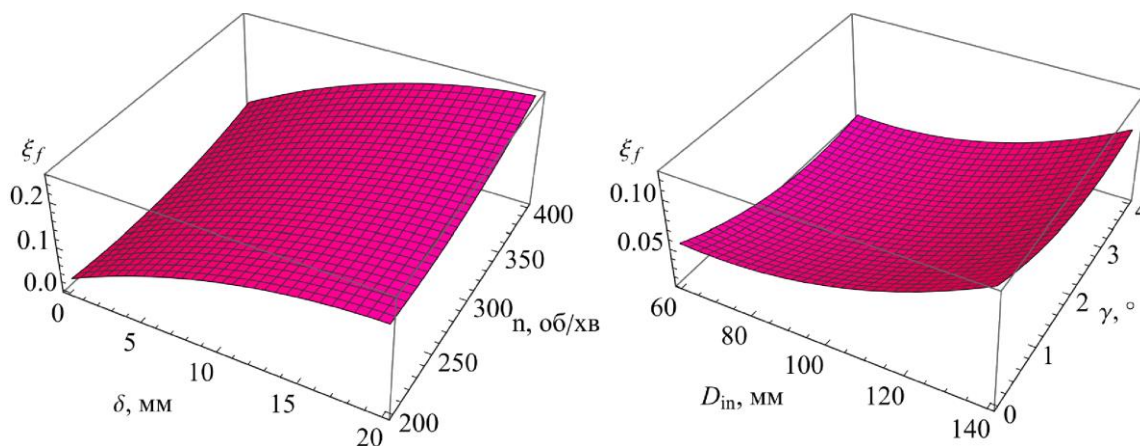


Рис. 5 – Залежність частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ , частоти обертання дробильного конусу n , діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ

Зменшення частки нерозлущених плодів із ростом діаметра отвору подачі D_{in} пояснюється покращенням умов подавання сировини в зону стискання. Проте надмірне збільшення діаметра може призвести до зниження тиску в зоні руйнування, через що частина плодів залишається нерозлущеною – це підтверджується зміною знаку квадратичного члена. Таким чином, існує оптимальне значення $D_{in} = 69$ мм, за якого забезпечується рівномірна подача та ефективне стискання.

Частота обертання дробильного конуса n впливає на інтенсивність контакту плодів з робочими органами. При збільшенні швидкості зростає кінетична енергія взаємодії, що сприяє кращому руйнуванню оболонок плодів. Проте при надто високих обертах ($n > 271$ об/хв) може зменшитись час контакту між плодами й робочою поверхнею, або виникнути ефект "розкидання", що знижує якість розлущення. Це відображено наявністю позитивного квадратичного члена, який обмежує позитивний вплив надмірного зростання частоти.

Кут нахилу осі дробильного конуса γ визначає геометричну орієнтацію зони подрібнення відносно сили тяжіння та напрямку подачі. При збільшенні кута поліпшується обтікання та розташування плодів у робочій зоні, що сприяє кращому зминанню. Однак надто великий кут може змінити напрям зусиль таким чином, що плоди уникатимуть максимального навантаження або вислизатимуть, не руйнуючись. Тому залежність має нелінійний характер із оптимумом ($\gamma = 2,9^\circ$).

Відстань між дробильним і зворотним конусами напряму визначає ступінь стиснення. Зі зростанням δ тиск між поверхнями зменшується, і відповідно зменшується ефективність руйнування оболонок плодів. Але при надто малій відстані зростає ризик блокування плодів або пошкодження самого насіння. Це підтверджується наявністю квадратичного члена з негативним коефіцієнтом, що описує наявність мінімуму частки нерозлущених плодів за оптимального значення δ .

Взаємодійні члени рівняння (наприклад, між n та δ , або між γ та δ) свідчать про те, що ефективність процесу визначається не лише окремими параметрами, а й їх поєднанням. Зокрема, оптимальне поєднання частоти обертання та відстані дозволяє забезпечити стійкий контакт і контрольований ступінь стискання, тоді як невдалі комбінації можуть погіршити умови подрібнення.

Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини скористаємося умовою мінімізації частки нерозлущених плодів (сегментів) при високій продуктивності відокремлення насінин:

$$\begin{cases} Q(\delta, n, D_{in}, \gamma) \rightarrow \max, \\ \xi_f(\delta, n, D_{in}, \gamma) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (3)$$

За допомогою Wolfram Cloud і методу мінімізації мультиплікативної цільової функції, сформованої шляхом скалярного ранжування, реалізовано ефективний підхід до багатокритеріальної оптимізації. Він полягає у зведенні задачі з кількома критеріями до однокритеріальної через побудову агрегованої функції у вигляді добутку нормалізованих значень кожного критерію з урахуванням їх вагомості. Такий підхід дозволяє одночасно мінімізувати, наприклад, енерговитрати й частку нерозлущених плодів та максимізувати вміст ліквідного насіння. Загальний вигляд функції має форму:

$$K = \frac{Q(\delta, n, D_{in}, \gamma) - Q^{\min}}{Q^{\max} - Q^{\min}} \frac{\xi_f^{\max} - \xi_f(\delta, n, D_{in}, \gamma)}{\xi_f^{\max} - \xi_f^{\min}} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Вирішуючи рівняння (4) спільно з (1) і (2) отримані раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини: $\delta = 8,6$ мм; $n = 291$ об/хв; $D_{in} = 98$ мм; $\gamma = 3,6^\circ \rightarrow Q = 150,7$ кг/год; $\xi_f = 0,141$.

У форматі рівняння регресії для визначення ψ_{s-s} (вмісту ліквідного насіння у забірнику) подається у такому вигляді (рис. 6):

$$\psi_{s-s} = 0,593978 + 0,00319717 Q - 9,73923 \cdot 10^{-6} Q^2 + 0,0035 V + 0,00793827 \beta - 0,000195062 \beta^2. \quad (5)$$

За критерієм Фішера $F_{(5)} = 42,5 > F_{(10, 17, 0.05)} = 2,54$ рівняння (5) є статистично значущим.

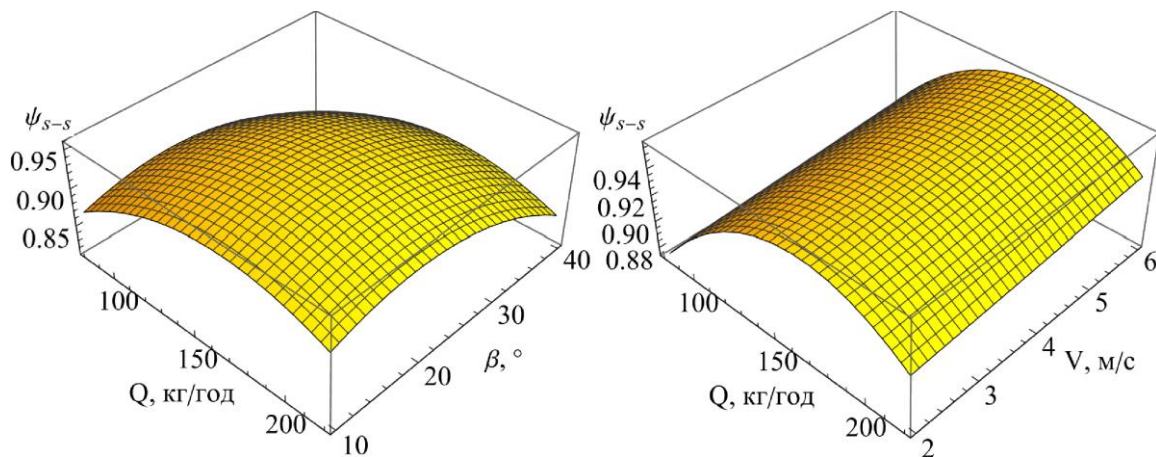


Рис. 6 – Залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння ψ_{s-s} від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q , кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V

Аналіз отриманої моделі дозволяє визначити характер впливу кожного із факторів на ефективність процесу відокремлення ліквідного насіння. Позитивний коефіцієнт при лінійному члені подачі Q свідчить про те, що збільшення продуктивності відокремлення сприяє підвищенню вмісту ліквідного насіння у забірнику. Однак наявність квадратичного члена з від'ємним коефіцієнтом вказує на існування оптимального значення подачі, при перевищенні якого ефективність процесу починає знижуватись. Це зумовлено фізичними обмеженнями: при надмірній подачі на решеті утворюється щільний шар матеріалу, що ускладнює відокремлення ліквідного насіння і призводить до його втрат разом з домішками. Вплив швидкості повітряного потоку V має виключно позитивний характер, оскільки збільшення швидкості повітря сприяє кращому видаленню легких домішок та пустих оболонок, забезпечуючи стабільні умови для просіювання ліквідного насіння через решето. Водночас вплив кута нахилу решета β проявляється як у лінійній, так і у квадратичній формі. Початкове збільшення кута нахилу покращує процес відокремлення завдяки прискоренню переміщення матеріалу і зменшенню часу перебування домішок на решеті. Однак при надмірних

значеннях кута ефективність знижується, оскільки ліквідне насіння не встигає відокремитися і потрапляє до відходів. Це відображено від'ємним коефіцієнтом при квадраті кута нахилу. Таким чином, модель враховує нелінійний характер взаємозв'язків між факторами та результативною ознакою, що відповідає фізичній суті процесу. Отримане рівняння дозволяє визначити оптимальні параметри роботи машини для забезпечення максимального вмісту ліквідного насіння у забірнику: $\psi_{s-s} = 0,956 \rightarrow Q = 150,7 \text{ кг/год}$, $\beta = 20,3^\circ$, $V = 6 \text{ м/с}$.

ВИСНОВКИ

Запропонована конструкція машини для очищення насіння рицини дає змогу забезпечити комплексну післяжнивну переробку плодів рицини шляхом ефективного розлушування коробочок, відокремлення насіння та високоякісного очищення отриманого вороху від легких домішок, пилу та частинок коробочок. Завдяки поєднанню механічного подрібнення з системою аеродинамічного очищення досягається підвищення якості продукції та зменшення втрат насіння. Автоматизоване регулювання положення зворотного конуса за допомогою мотор-редуктора підвищує точність налаштувань і стабільність технологічного процесу. Додаткове оснащення машини блоком керування забезпечує автоматизацію окремих функціональних вузлів, поліпшує умови експлуатації, підвищує надійність роботи та зменшує вплив людського фактора під час роботи машини.

В результаті чисельного моделювання процесу відокремлення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q (1), частки нерозлушених плодів (сегментів) ξ_f (2) від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ , частоти обертання дробильного конусу n , діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ . В результаті чисельного моделювання процесу очищення насіння рицини отримано залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику ψ_{s-s} (5) від подачі (продуктивності відокремлення насіння) Q , кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V . Статистичний аналіз отриманих рівнянь регресії дав змогу оцінити внесок кожного з досліджуваних факторів у формування цільових показників роботи машини, виокремити статистично значущі параметри та побудувати достовірні аналітичні моделі процесу.

Використання методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної цільової функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу визначити оптимальні значення факторів ($\delta = 8,6 \text{ мм}$; $n = 291 \text{ об/хв}$; $D_{in} = 98 \text{ мм}$; $\gamma = 3,6^\circ$; $\beta = 20,3^\circ$; $V = 6 \text{ м/с}$), за яких досягається максимальна продуктивність процесу ($Q = 150,7 \text{ кг/год}$) при забезпеченні прийняттого рівня якості відокремлення ($\xi_f = 0,141$) та очищення $\psi_{s-s} = 0,956$. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої конструкції машини та доцільність її впровадження у виробничих умовах.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Alexopoulou, E., Papatheohari, Y., Zanetti, F., Tsiotas, K., Papamichael, I., Christou, M., Namatov, I., & Monti, A. (2015). Comparative studies on several castor (*Ricinus communis* L.) hybrids: Growth, yields, seed oil and biomass characterization. *Industrial Crops and Products*, 75, 8–13. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.015
- Anjani, K. (2012). Castor genetic resources: A primary gene pool for exploitation. *Industrial Crops and Products*, 35(1), 1–14. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.06.011
- Bateni, H., & Karimi, K. (2016). Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 4–12. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.08.014
- Carrino, L., Visconti, D., Fiorentino, N., & Fagnano, M. (2020). Biofuel production with castor bean: A win-win strategy for marginal land. *Agronomy*, 10(11), 1690. DOI: 10.3390/agronomy10111690
- D'Avino, L., Di Bene, C., Farina, R., & Razza, F. (2020). Introduction of cardoon (*Cynara cardunculus* L.) in a rainfed rotation to improve soil organic carbon stock in marginal lands. *Agronomy*, 10(7), 946. DOI: 10.3390/agronomy10070946

- Gelfand, I., Sahajpal, R., Zhang, X., Izaurralde, R. C., Gross, K. L., & Robertson, G. P. (2013). Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*, 493(7433), 514–517. DOI: 10.1038/nature11811
- Janiszewska, D., Olchowski, R., Nowicka, A., Zborowska, M., Marszałkiewicz, K., Shams, M., Giannakoudakis, D. A., Anastopoulos, I., & Barczak, M. (2021). Activated biochars derived from wood biomass liquefaction residues for effective removal of hazardous hexavalent chromium from aquatic environments. *GCB Bioenergy*, 13(7), 1247–1259. DOI: 10.1111/gcbb.12839
- Kudriavtsev, I. (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2(125), 47–55. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-5
- Ogunniyi, D. S. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresource Technology*, 97(9), 1086–1091. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.03.028
- Park, K., Sanjaya, S. A., Quach, T., & Cahoon, E. B. (2021). Toward sustainable production of value-added bioenergy and industrial oils in oilseed and biomass feedstocks. *GCB Bioenergy*, 13(10), 1610–1623. DOI: 10.1111/gcbb.12883
- Pari, L., Latterini, F., & Stefanoni, W. (2020). Herbaceous oil crops, a review on mechanical harvesting state of the art. *Agriculture*, 10, 309. DOI: 10.3390/agriculture10080309
- Román-Figueroa, C., Cea, M., Paneque, M., & González, M. E. (2020). Oil content and fatty acid composition in castor bean naturalized accessions under Mediterranean conditions in Chile. *Agronomy*, 10(8), 1145. DOI: 10.3390/agronomy10081145
- Vallejos, M., Rondanini, D., & Wassner, D. F. (2011). Water relationships of castor bean (*Ricinus communis* L.) seeds related to final seed dry weight and physiological maturity. *European Journal of Agronomy*, 35, 93–101. DOI: 10.1016/j.eja.2011.04.003
- Von Cossel, M., Lewandowski, I., Elbersen, B., Staritsky, I., Van Eupen, M., Iqbal, Y., Mantel, S., Scordia, D., Testa, G., Cosentino, S. L. et al. (2019). Marginal agricultural land low-input systems for biomass production. *Energies*, 12(16), 3123. DOI: 10.3390/en12163123
- Wang, L. (2004). *Theoretical study of cyclone design* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- Wydra, S., Hüsing, B., Köhler, J., Schwarz, A., Schirrmeister, E., & Voglhuber-Slavinsky, A. (2021). Transition to the bioeconomy – Analysis and scenarios for selected niches. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126092. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126092
- Zanetti, F., Monti, A., & Berti, M. T. (2013). Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review. *Industrial Crops and Products*, 50, 580–595 DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.08.030
- Zhao, B., & Su, Y. (2018). Particle size cut performance of aerodynamic cyclone separators: Generalized modeling and characterization by correlating global cyclone dimensions. *Journal of Aerosol Science*, 120, 1–11. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2018.02.009
- Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. https://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_4.pdf
- Алієв, Е. Б. (2020). Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя. 530 с.
- Ведмедєва, К. В., Кавязіна, М. Ю., & Махова, Т. В. (2018). Оцінка зразків ріцини за господарсько-цінними ознаками. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 26, 39–48. https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2018/26/Vedmedeva2_26.pdf
- Кудрявцев, І. М. (2024). Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження аеродинамічного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2(113), 132–142. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-15
- Петраченко, Д. О., Мохер, Ю. В., & Коропченко, С. П. (2023). Технологія оброщення насіння промислових конопель для малого бізнесу. *Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 645–671. DOI: 10.30525/978-9934-26-328-6-29
- Теслюк, Г. В. (2020). Обґрунтування технологічного процесу, параметрів та режимів роботи машини для виділення насіння гарбуза: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Дніпропетровськ. 147 с. <https://uacademic.info/ua/document/0410U001669>
- Шевчук, В. В., & Сукач, О. М. (2018). Процеси і засоби для подрібнення насіння олійних культур: монографія. Львів: Львівський національний аграрний університет. 105 с. https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/558/1/Shevchuk_monograf.pdf