

УДК 631.362.32

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.135-147>

П. Г. Лузан, доц., канд. техн. наук, А. Є. Грінчук, О. Р. Лузан, канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: luzanpg@gmail.com

Теоретичне обґрунтування процесу руху часток зернового матеріалу на решеті з комбінованим профілем прутків

У статті наведено теоретичне обґрунтування процесу руху часток зернового матеріалу на решеті, робоча поверхня якої утворена по чергово розташованими прутками круглого та трикутного поперечних перерізів. Проаналізовано сили, що діють на частку під час її переміщення по поверхні решета, орієнтації відносно щілини та проходження крізь неї. Встановлено, що асиметрія контактної взаємодії частки з комбінованою поверхнею сприяє її орієнтації прохідним розміром до щілини. Отримано умови проходження частки крізь щілину та вивільнення частки у разі її заклинювання.

зерновий матеріал, решето, сепарація, зернова частка, комбінований профіль прутків, самоочищення решета

Постановка проблеми. Післязбиральна обробка зерна є одним із визначальних етапів технологічного процесу в аграрному виробництві, оскільки від якості очищення і сортування зернового матеріалу істотно залежать умови його подальшого зберігання, переробки та використання як насіннєвого або продовольчого ресурсу. У більшості зерноочисних машин розділення матеріалу за геометричними розмірами здійснюється на решітних поверхнях. Ефективність цього процесу значною мірою визначається конструкцією решета, формою його робочих елементів, параметрами щілин, а також умовами взаємодії окремих часток із робочою поверхнею.

Ефективність роботи решітної поверхні визначається не лише співвідношенням геометричних розмірів отворів і зернового матеріалу, а й характером контакту часток із робочими елементами протягом усього процесу їх переміщення. Саме кінематичні умови взаємодії частки з поверхнею формують її просторову орієнтацію, визначають кількість повторних контактів зі щілинами та ймовірність проходження крізь них. Тому вдосконалення геометрії робочих елементів решета є одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності процесу сепарації без істотного ускладнення конструкції зерноочисної машини.

Традиційні плоскі та пруткові решета, незважаючи на конструктивну простоту, мають низку експлуатаційних недоліків. Одним із найбільш істотних є забивання щілин частками, розміри яких близькі до прохідних. Це зумовлює зменшення живого перерізу решета, погіршення якості розділення та необхідність застосування додаткових засобів очищення, які ускладнюють конструкцію машини і підвищують енерговитрати. Іншим важливим недоліком є недостатня здатність робочої поверхні орієнтувати частку в положення, за якого її мінімальний поперечний розмір може бути реалізований для проходження крізь щілину.

Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності сепарації є створення решіт, конструкція яких забезпечує одночасно спрямовану орієнтацію зернових часток відносно щілини та зменшення ймовірності її забивання під час

роботи. Реалізація такого підходу можлива шляхом використання робочої поверхні, сформованої комбінованими прутками різного профілю, один із яких має пружне закріплення. Проте закономірності руху зернової частки по такій поверхні, умови її орієнтації, проходження крізь щілину та механізм самоочищення робочої поверхні залишаються недостатньо дослідженими, що і зумовило необхідність виконання даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження процесів сепарації зернових матеріалів розвиваються у декількох взаємопов'язаних напрямках: удосконалення конструкцій зерноочисних машин, обґрунтування параметрів решітних поверхонь, дослідження руху зернового шару та моделювання взаємодії окремих часток із робочими органами. У працях [1–5] показано, що ефективність розділення зернового матеріалу визначається не лише розмірами отворів решета, а й формою робочої поверхні, кінематичними параметрами її руху, властивостями зернової суміші та умовами контакту часток із елементами решета.

Значна увага у відомих дослідженнях приділена вивченню сепарації зернових матеріалів на вібраційних, пневмовібраційних і відцентрових робочих органах. Зокрема, у роботах [3–5, 20–22] розглянуто вплив сил тяжіння, інерції, тертя та аеродинамічної дії на переміщення часток зернової суміші. Встановлено, що процес сепарації має складний динамічний характер і супроводжується ковзанням, перекочуванням, періодичним відривом часток від поверхні та повторними контактами із решетом. Разом із тим у більшості таких робіт об'єктом аналізу є зерновий шар або потік матеріалу загалом, тоді як механіка взаємодії окремої зернівки з конкретними елементами робочої поверхні розглядається менш детально.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з удосконаленням конструкцій решіт і очисних пристроїв зерноочисних машин. У працях [6–8] проаналізовано конструктивні особливості решітних систем, умови їх навантаження зерновим матеріалом та вплив форми отворів на ефективність розділення. Показано, що зміна геометрії отворів або профілю робочої поверхні дає можливість підвищити пропускну здатність решета та поліпшити умови проходження часток. Водночас такі конструктивні рішення переважно орієнтовані на зміну форми отвору або загальної схеми руху матеріалу, тоді як питання спрямованої орієнтації частки за рахунок асиметрії контакту з прутками різного профілю залишаються недостатньо розкритими.

Важливою проблемою роботи решітних поверхонь є забивання отворів і щілин частками, розміри яких близькі до прохідних. У роботі [9] показано, що зниження продуктивності зерноочисних машин значною мірою пов'язане із заклинюванням часток у комірках решета, а однією з основних сил, що утримує частку в отворі, є сила тертя. Це підтверджує необхідність пошуку таких конструктивних рішень, які забезпечують не лише проходження частки крізь отвір, а й її вивільнення у разі часткового заклинювання. Однак більшість відомих очисних пристроїв передбачає застосування додаткових механічних елементів для очищення решета, що ускладнює конструкцію та підвищує енергомісткість процесу.

Сучасні дослідження процесів сепарації дедалі частіше ґрунтуються на використанні чисельного моделювання. Метод дискретних елементів дає змогу аналізувати рух окремих зернівок, їх зіткнення між собою та з робочою поверхнею, а також оцінювати вплив форми часток на характер їх переміщення [10–12, 14–16]. У роботах [10, 11] за допомогою DEM-моделювання досліджено рух зернових матеріалів на вібраційних решетах і встановлено, що параметри коливань істотно впливають на швидкість переміщення, сегрегацію та ймовірність проходження часток крізь отвори. У дослідженнях [13, 17–19] поєднання DEM та CFD використано для аналізу взаємодії

зернового матеріалу з повітряним потоком і решітною поверхнею, що дозволило оцінити вплив швидкості повітря, кута нахилу та частоти коливань на якість очищення.

Разом із тим чисельні методи, незважаючи на високу інформативність, не завжди дають прості аналітичні залежності, придатні для попереднього інженерного обґрунтування конструктивних параметрів решета. Для розроблення нових робочих органів важливими залишаються теоретичні моделі, які дозволяють встановити причинно-наслідковий зв'язок між геометрією робочих елементів, силами, що діють на частку, умовами її орієнтації та проходження крізь щілину.

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що на цей час достатньо повно вивчені загальні закономірності сепарації зернових матеріалів на решетах, вплив вібраційних режимів на рух зернового шару та можливості чисельного моделювання процесу очищення. Водночас недостатньо дослідженими залишаються закономірності взаємодії окремої зернової частки з решетом, робоча поверхня якого утворена по чергово розташованими прутками круглого та трикутного поперечних перерізів. Практично відсутні аналітичні моделі, які одночасно враховують асиметрію контактної взаємодії, орієнтацію зернівки відносно щілини, динамічну зміну ширини проходу та умови самоочищення у разі заклинювання частки. Саме це зумовлює необхідність теоретичного обґрунтування процесу руху часток зернового матеріалу на решеті з комбінованим профілем прутків.

Постановка завдання. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування закономірностей взаємодії зернової частки з решітною поверхнею, утвореною по чергово розташованими прутками круглого та трикутного поперечних перерізів, один із яких має пружне закріплення, а також встановлення впливу конструктивних і кінематичних параметрів решета на умови орієнтації частки, її проходження крізь щілину та самоочищення робочої поверхні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

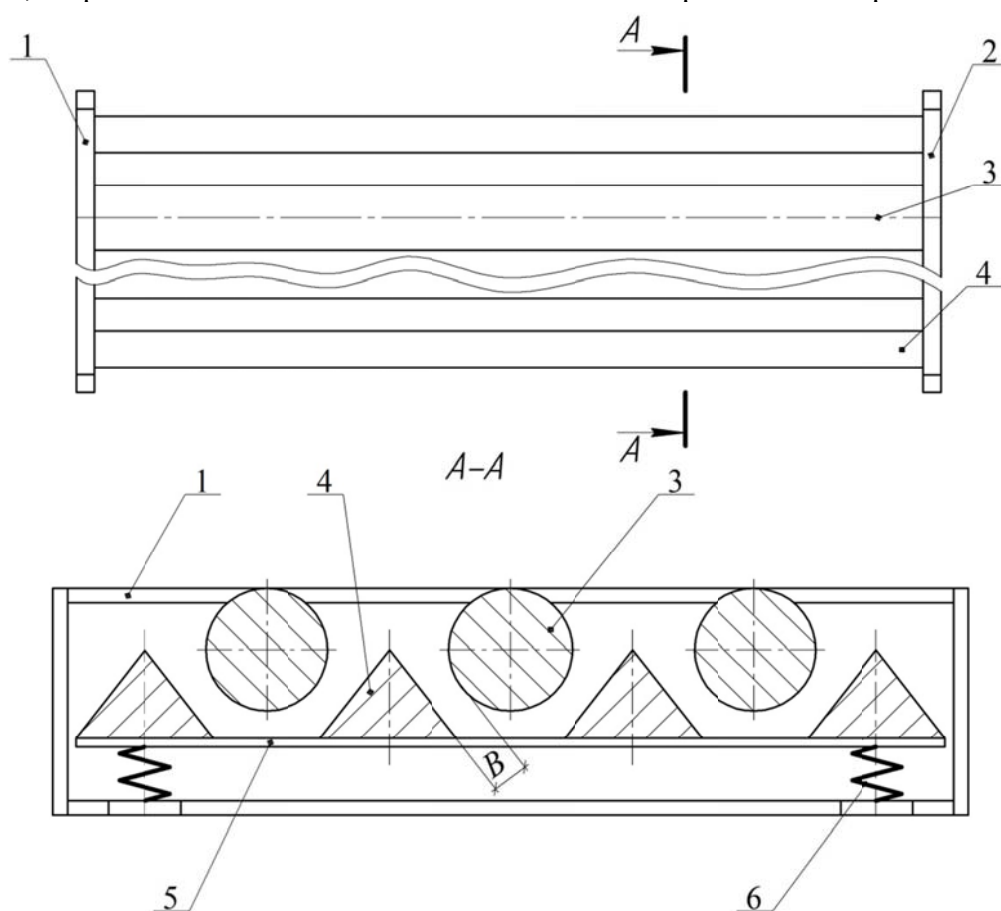
- розробити розрахункову схему взаємодії зернової частки з робочими елементами комбінованого решета;
- обґрунтувати математичну модель руху зернової частки по поверхні решета з урахуванням сил інерції, тяжіння, тертя та контактної взаємодії;
- встановити умови початку відносного переміщення, орієнтації та проходження зернової частки крізь щілину між прутками;
- дослідити вплив пружного закріплення трикутного прутка на зміну ширини щілини та визначити умови самоочищення решета при заклинюванні частки;
- визначити аналітичні залежності, які можуть бути використані для подальшого обґрунтування конструктивних параметрів решета з комбінованим профілем прутків.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження процесу взаємодії зернової частки з комбінованою решітною поверхнею побудовано розрахункову схему, яка відображає характер контакту частки з робочими елементами решета та послідовність її переміщення до моменту проходження крізь щілину. Основною особливістю запропонованої конструкції є те, що робоча поверхня утворена по чергово розташованими повздовжніми прутками круглого та трикутного поперечних перерізів. Круглі прутки жорстко закріплені у верхній частині рамок решітного стану, тоді як трикутні прутки з'єднані між собою та встановлені на пружних елементах. Така конструктивна схема забезпечує можливість зміни ширини щілини під дією контактних навантажень, що принципово відрізняє запропоноване решето від традиційних жорстких решітних поверхонь (рис. 1).

При побудові математичної моделі прийнято, що зернова частка розглядається як тверде тіло, деформаціями якого можна знехтувати. Рух частки досліджується у

площині, перпендикулярній до осей прутків, а коливання решета вважаються гармонічними. Такий підхід дозволяє виділити основні закономірності взаємодії зернівки з робочими елементами без ускладнення моделі другорядними факторами, які практично не впливають на характер процесу.

Для теоретичного аналізу розглянемо рух окремої зернової частки масою m по поверхні решета, нахиленого під кутом α до горизонту. Частка одночасно взаємодіє з круглим та трикутним прутками, між якими утворюється щілина шириною B . На зернівку діють сила тяжіння G , нормальні реакції N_1 і N_2 , сили тертя F_1 та F_2 , а також інерційна сила, зумовлена коливальним рухом решітного стану (рис. 2). Саме сукупність цих сил визначає характер відносного переміщення частки по робочій поверхні, її орієнтацію відносно щілини та можливість проходження крізь неї.



1 – ліва рамка, 2 – права рамка, 3 – прутки круглого поперечного перерізу, 4 – прутки трикутного поперечного перерізу, 5 – сталеві смуги, 6 – пружні елементи

Рисунок 1 – Загальний вигляд решета з комбінованими прутками

Джерело: розроблено авторами

Для опису руху введемо локальну систему координат, у якій вісь Ox спрямована вздовж поверхні решета, а вісь Oy – перпендикулярно до неї. Оскільки решітний стан здійснює гармонічні коливання, прискорення його робочої поверхні визначається залежністю

$$a(t) = A\omega^2 \cos(\omega t), \quad (1)$$

де A – амплітуда коливань; ω – кутова частота збудження.

Залежність (1) характеризує кінематичний режим роботи решета і визначає величину інерційної сили, що діє на зернову частку. Зі збільшенням амплітуди або частоти коливань інерційний вплив на частку зростає, що безпосередньо позначається на умовах її переміщення по поверхні решета.

З урахуванням сил, які діють на зернову частку, рівняння її руху вздовж поверхні решета можна записати у вигляді

$$m\ddot{x} = mg \sin \alpha + mA\omega^2 \cos(\omega t) - F_t, \quad (2)$$

де F_t – результуюча сила тертя, що протидіє руху частки.

Рівняння (2) відображає баланс сил у напрямку руху зернівки та є основою подальшого аналізу процесу її переміщення. Воно показує, що швидкість і характер руху визначаються співвідношенням між рушійними силами, сформованими складовою сили тяжіння та інерційною дією коливань, і силами опору, які виникають у місцях контакту зернівки з робочими елементами.

У першому наближенні результуючу силу тертя можна визначити із залежності

$$F_t = fN, \quad (3)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання; N – сумарна нормальна реакція з боку прутків.

Із виразу (3) випливає, що сила тертя безпосередньо залежить від нормального навантаження зернівки на поверхню решета. Тому зміна положення частки, її орієнтації або величини контактних реакцій призводить до зміни сили тертя, а отже, і до зміни умов її переміщення.

Початок відносного переміщення зернової частки по поверхні решета настає за умови

$$mg \sin \alpha + mA\omega^2 \cos(\omega t) > fN. \quad (4)$$

Умова (4) визначає межу переходу від стану спокою до ковзання частки по поверхні решета. Якщо рушійні сили перевищують силу тертя, зернівка починає переміщуватися, а циклічний характер коливань решітного стану зумовлює періодичну зміну швидкості її руху та умов контакту з прутками. Саме ця особливість створює передумови для багаторазової переорієнтації зернівки відносно щілини та підвищує ймовірність її проходження прохідним розміром.

Під час подальшого переміщення зернової частки по робочій поверхні характер її взаємодії з прутками суттєво залежить від їх геометричної форми. На відміну від традиційних решіт, у яких контакт відбувається із симетричними робочими елементами, у запропонованій конструкції круглий прутко виконує функцію опорної поверхні, тоді як трикутний прутко формує похилу контактну грань. Унаслідок цього сили реакції прикладаються до зернівки у різних точках, що призводить до виникнення обертового моменту.

У загальному випадку величина обертового моменту визначається залежністю

$$M_0 = (N_1 - N_2)l, \quad (5)$$

де l – плече між лініями дії контактних реакцій.

Залежність (5) показує, що орієнтація зернової частки визначається не лише величиною контактних реакцій, а й особливостями їх просторового прикладання. Саме асиметрія контактної взаємодії створює момент, який повертає зернівку навколо її центра мас у положення, найбільш сприятливе для проходження крізь щілину. При цьому зі збільшенням різниці між нормальними реакціями круглої та трикутної

поверхонь величина поворотального моменту зростає, а процес орієнтації відбувається інтенсивніше.

Таким чином, комбіноване поєднання круглих і трикутних прутків виконує не лише функцію формування щілини необхідної ширини, а й активно впливає на кінематику руху зернової частки. Саме це є однією з принципових переваг запропонованої конструкції порівняно з традиційними решетами, у яких контактні умови залишаються практично симетричними.

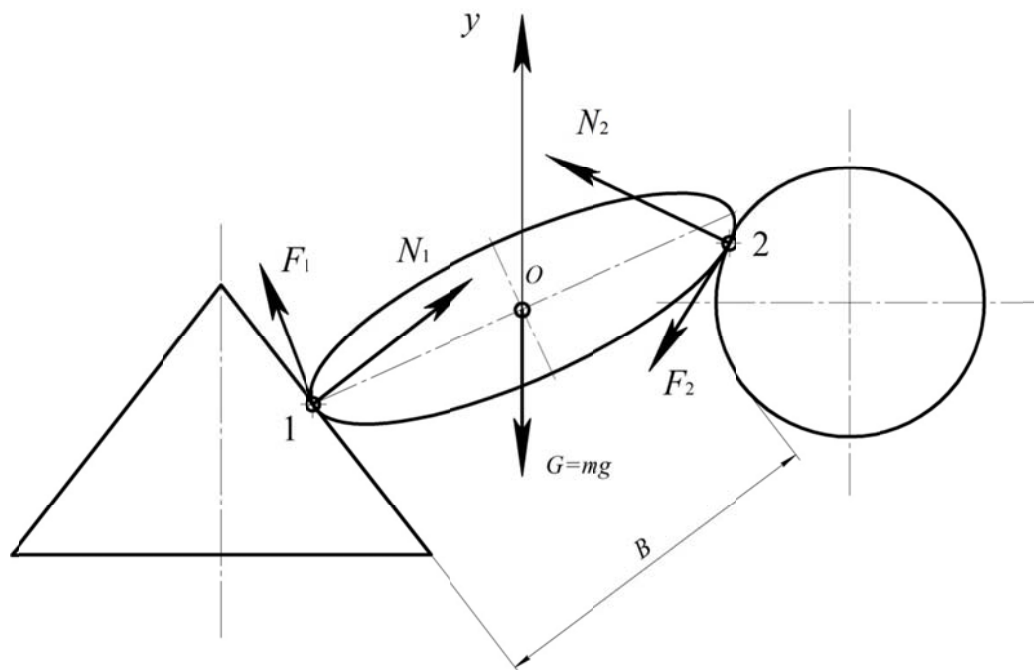


Рисунок 2 – Розрахункова схема взаємодії зернової частки комбінованими прутками решета

Джерело: розроблено авторами

Після переорієнтації зернової частки наступним етапом процесу є оцінювання можливості її проходження крізь щілину між сусідніми прутками. Очевидно, що проходження можливе лише тоді, коли поточний прохідний розмір зернівки не перевищує ефективної ширини щілини.

Для нерухомої решітної поверхні відповідна умова має вигляд

$$b_{\text{ек}} \leq B, \quad (6)$$

Залежність (6) характеризує граничний стан, за якого зернова частка може пройти крізь щілину без додаткової зміни її геометричних параметрів. Якщо прохідний розмір частки перевищує ширину щілини, вона затримується на поверхні решета або може частково заклинюватися між прутками.

Однак запропонована конструкція відрізняється від традиційних тим, що трикутний прутки має пружне закріплення. Під дією контактної навантаження він може зміщуватися, внаслідок чого фактична ширина щілини змінюється в процесі роботи.

Динамічна ширина проходу визначається залежністю

$$B_d(t) = B_0 + \Delta B(t), \quad (7)$$

де B_0 – номінальна ширина щілини у стані спокою; $\Delta B(t)$ – збільшення щілини, зумовлене переміщенням трикутного прутка.

На відміну від традиційних решіт, де ширина проходу є сталою величиною, у запропонованій конструкції вона змінюється відповідно до величини контактної навантаження. Це дозволяє локально збільшувати прохідний переріз саме в момент взаємодії із зерною часткою без істотного впливу на загальну геометрію робочої поверхні.

З урахуванням пружного переміщення трикутного прутка умова проходження зернової частки набуває вигляду

$$b_{\text{ек}} \leq B_0 + \Delta B(t). \quad (8)$$

Отримана залежність є однією з ключових у запропонованій математичній моделі, оскільки вона вперше пов'язує можливість проходження зернової частки одночасно з її поточною орієнтацією та динамічною зміною ширини щілини. Це означає, що навіть у випадках, коли за статичних умов проходження було б неможливим, короткочасне збільшення ширини щілини за рахунок пружного зміщення трикутного прутка створює додаткові можливості для проходження частки.

Отже, процес проходження зернівки крізь щілину визначається спільною дією двох взаємопов'язаних механізмів. Перший полягає у переорієнтації частки під дією обертального моменту, який виникає завдяки асиметричній геометрії контактної взаємодії. Другий пов'язаний із тимчасовою зміною ширини щілини внаслідок пружного переміщення трикутного прутка. Саме поєднання цих механізмів забезпечує підвищення ймовірності проходження прохідних зернин та створює передумови для зменшення забивання робочої поверхні.

У реальних умовах роботи решітної поверхні не всі зернові частки проходять крізь щілину після першого контакту з робочими елементами. За несприятливої просторової орієнтації або за незначної різниці між прохідним розміром зернівки та шириною щілини частка може частково входити між прутками і втрачати можливість подальшого переміщення. У такому випадку виникає явище заклинювання, яке є однією з основних причин зниження продуктивності решітних поверхонь та погіршення ефективності сепарації.

Заклиненна зернова частка перебуває у стані механічної рівноваги, який визначається співвідношенням між силами, що сприяють її подальшому переміщенню, та силами тертя у контактних зонах. У першому наближенні умову стійкого заклинювання можна подати у вигляді

$$F_{\text{п}} \leq F_{\text{т}}. \quad (9)$$

де $F_{\text{п}}$ – складова сили, що прагне перемістити частку; $F_{\text{т}}$ – сумарна сила тертя в зоні контакту.

Залежність (9) характеризує граничний стан, за якого зернова частка ще утримується між прутками. Якщо сили тертя перевищують або дорівнюють виштовхувальній силі, частка зберігає стійке положення, а процес сепарації в цій локальній зоні практично припиняється. Отже, для забезпечення безперервної роботи решета необхідно створити умови, за яких рівновага буде порушена.

На відміну від традиційних жорстких решіт, у запропонованій конструкції ця умова реалізується завдяки пружному закріпленню трикутного прутка. Під дією контактної навантаження він здійснює пружне зміщення, внаслідок чого одночасно змінюються як силові умови взаємодії, так і геометрія щілини. Таким чином, пружний

елемент виконує не лише функцію несучої конструкції, а й бере безпосередню участь у процесі самоочищення робочої поверхні.

Сила, що виникає внаслідок пружного деформування елемента, визначається залежністю

$$F_{\text{пр}} = kx_{\text{п}}. \quad (10)$$

де $x_{\text{п}}$ – переміщення трикутного прутка; k – жорсткість пружного елемента.

Із залежності (10) випливає, що величина пружної сили прямо пропорційна переміщенню прутка. Це означає, що зі збільшенням контактного навантаження автоматично зростає і сила, яка сприяє вивільненню заклиненої зернової частки. Таким чином, конструкція решета забезпечує своєрідний механізм саморегулювання, коли інтенсивність впливу на заклинену зернівку визначається умовами її взаємодії з робочою поверхнею.

З урахуванням інерційної складової, яка виникає внаслідок коливального руху решітного стану, умову вивільнення зернової частки можна записати у вигляді

$$F_{\text{пр}} + F_i > F_t. \quad (11)$$

де F_i – інерційна складова сили в зоні контакту.

Залежність (11) є визначальною для пояснення механізму самоочищення запропонованої конструкції. Вона показує, що вивільнення заклиненої частки відбувається лише за умови, коли сумарна дія пружної та інерційної сил перевищує сили тертя у зоні контакту. При цьому пружне зміщення трикутного прутка забезпечує не лише виникнення додаткової виштовхувальної сили, а й одночасне локальне збільшення ширини щілини. Отже, процес самоочищення реалізується завдяки одночасній дії двох взаємопов'язаних механізмів – силового та геометричного, які взаємно підсилюють один одного.

Для визначення величини пружного переміщення необхідно дослідити динамічну поведінку трикутного прутка. З цією метою його розглянемо як коливальну систему з однією узагальненою координатою, динаміка якої у першому наближенні описується рівнянням

$$m_p \ddot{x}_p + c \dot{x}_p + kx_p = F_0 \sin(\omega t). \quad (12)$$

де m_p – приведена маса рухомої частини; c – коефіцієнт демпфування; k – жорсткість пружних елементів; F_0 – амплітуда збуджувальної сили.

Рівняння (12) описує вимушені коливання пружно закріпленого прутка під дією періодичного навантаження. Його розв'язання дозволяє визначити параметри коливального процесу та оцінити їх вплив на зміну ширини щілини під час роботи решета.

Амплітуда усталених вимушених коливань визначається залежністю (рис. 3)

$$A_k = \frac{F_0 / k}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}}. \quad (13)$$

де $r = \omega / \omega_0$ – відношення частоти збудження до власної частоти системи; $\omega_0 = \sqrt{k / m_p}$ – власна кутова частота; $\xi = c / (2\sqrt{km_p})$ – коефіцієнт демпфування.

Аналіз залежності (13) свідчить, що амплітуда коливань визначається співвідношенням між частотою зовнішнього збудження, жорсткістю пружної системи та її демпфувальними властивостями. У міру наближення частоти збудження до власної частоти системи амплітуда коливань зростає, що сприяє збільшенню пружного переміщення трикутного прутка і, відповідно, динамічному розширенню щілини.

Разом із тим надмірне наближення до резонансного режиму може супроводжуватися значним збільшенням динамічних навантажень, нестійкістю руху зернового шару та прискореним зношуванням елементів конструкції. Тому під час проєктування решета доцільно обирати такі параметри жорсткості пружного закріплення та режими коливань, які забезпечують достатню інтенсивність самоочищення без переходу системи у небезпечну резонансну область.

З практичної точки зору це означає, що вибір жорсткості пружних елементів повинен забезпечувати достатню амплітуду переміщення трикутного прутка без переходу системи у резонансний режим. Такий підхід дозволяє одночасно забезпечити ефективне самоочищення решета та необхідну довговічність його конструктивних елементів.

Отримані аналітичні залежності дозволяють встановити причинно-наслідковий зв'язок між конструктивними параметрами пружно закріпленого трикутного прутка, режимами коливального руху та ефективністю самоочищення щілин решета. Це створює теоретичну основу для подальшого обґрунтування конструктивних параметрів комбінованої решітної поверхні та оптимізації її роботи залежно від фізико-механічних властивостей зернового матеріалу.

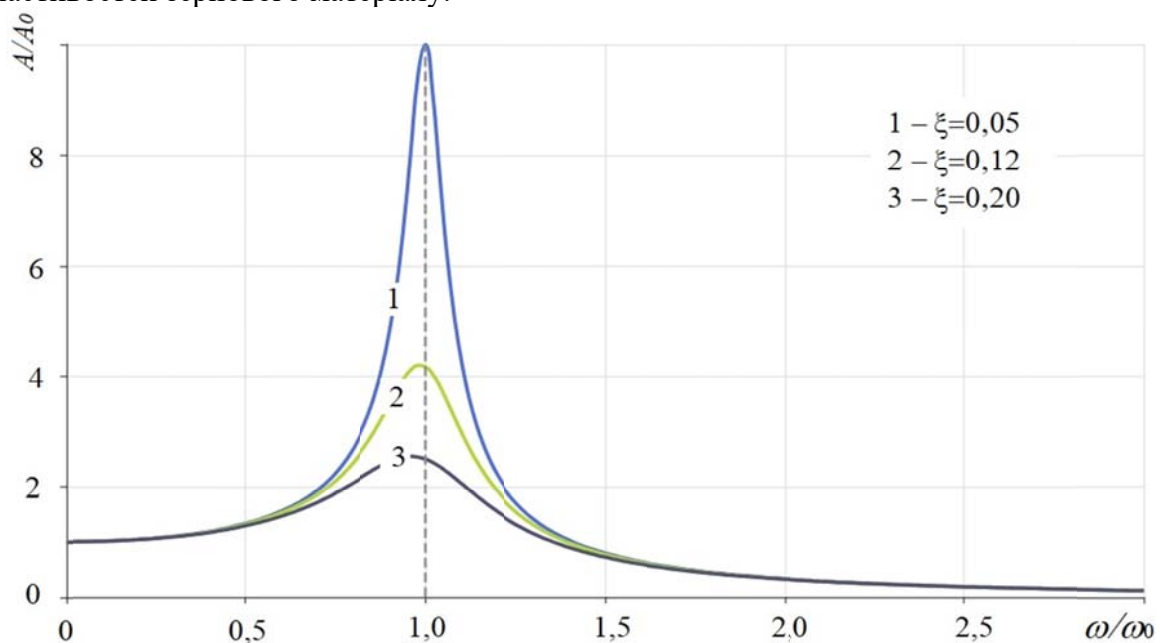


Рисунок 3 - Амплітудно-частотна характеристика трикутного прутка

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, побудована математична модель комплексно описує процес взаємодії зернової частки з комбінованою решітною поверхнею на всіх основних етапах її переміщення: від початку ковзання по робочій поверхні до проходження крізь щілину або вивільнення у випадку заклинювання. Отримані аналітичні залежності дозволяють оцінити вплив конструктивних параметрів прутків, жорсткості пружного закріплення та кінематичних режимів роботи решета на ефективність процесу сепарації

і можуть бути використані як теоретична основа для подальшого оптимізаційного синтезу конструкції.

На відміну від відомих моделей, запропонований підхід одночасно враховує асиметрію контактної взаємодії зернової частки з прутками різного профілю, пружне переміщення трикутного прутка, динамічну зміну ширини щілини та умови самоочищення решета.

Висновки. У роботі виконано теоретичне дослідження процесу взаємодії зернової частки з комбінованою решітною поверхнею, утвореною почергово розташованими круглими та трикутними прутками, один із яких має пружне закріплення. На основі побудованої математичної моделі встановлено закономірності руху зернової частки, її орієнтації відносно щілини, проходження крізь робочу поверхню та механізму самоочищення решета.

1. Розроблено математичну модель взаємодії зернової частки з комбінованою решітною поверхнею, яка враховує дію сил тяжіння, інерції, нормальних реакцій, сил тертя та пружної взаємодії між зерною часткою і трикутним прутком. Запропонована модель дає можливість послідовно описати основні етапи переміщення зернівки від моменту контакту з робочою поверхнею до її проходження крізь щілину.

2. Встановлено, що визначальний вплив на орієнтацію зернової частки здійснює асиметрична геометрія контактної взаємодії, яка створює повертальний момент і сприяє розташуванню зернівки у положенні, найбільш сприятливому для проходження крізь щілину. Це дозволяє підвищити ймовірність проходження прохідних зернин без збільшення номінальної ширини щілини.

3. Теоретично обґрунтовано, що самоочищення решета забезпечується одночасною дією двох взаємопов'язаних механізмів: силового, обумовленого пружною та інерційною дією на заклинену частку, та геометричного, пов'язаного з локальним збільшенням ширини щілини внаслідок пружного переміщення трикутного прутка. Поєднання зазначених механізмів забезпечує втрату стійкості заклиненої зернової частки та її подальше вивільнення.

4. Отримано аналітичні залежності, що встановлюють взаємозв'язок між жорсткістю пружного закріплення, параметрами коливального режиму та амплітудою переміщення трикутного прутка. Показано, що вибір раціонального співвідношення між жорсткістю пружного елемента та частотою коливань дозволяє підвищити ефективність самоочищення без переходу системи в небезпечну резонансну область.

5. Запропонована математична модель може бути використана як теоретична основа для подальшого обґрунтування конструктивних і кінематичних параметрів комбінованих решітних поверхонь зерноочисних машин, а також під час розроблення нових конструкцій робочих органів із керованими пружними властивостями.

Отримані результати можуть бути використані під час проектування нових комбінованих решіт зерноочисних машин, вибору їх конструктивних параметрів та оптимізації режимів роботи з метою підвищення ефективності сепарації зернових матеріалів і зменшення забивання робочої поверхні.

Список літератури

1. Сало В.М., Лузан П.Г., Богатирьов Д.В. Технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання: монографія. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2014. 148 с.
2. Сало В.М., Лузан П.Г., Богатирьов Д.В. Наукові основи сепарації зерна на решетах з клиноподібною формою отворів: монографія. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2013. 148 с.
3. Котов Б.І., Деревенько І.А., Степаненко С.П. Теоретичні аспекти сепарації зернових матеріалів на ступінчастоконічному решеті вібровідцентрових машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. Вип. 3. С. 175–180.

4. Алієв Е.Б., Яропуд В.М. Техніко-технологічне забезпечення прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу сояшиника. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. Вип. 1(92). С. 40–47.
5. Бредихін В.В. Теоретичні основи вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння: монографія. Харків, 2017. 81 с.
6. Задорожній О., Мороз С.М., Васильковський О.М. Аналіз конструкцій очисних пристроїв гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану зерноочисних машин загального призначення. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. Вип. 53. С. 237–246. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246>
7. Лузан П.Г., Кісільов Р.В., Лузан О.Р. Обґрунтування параметрів решета з щілинами непостійного розміру. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2019. Вип. 49. С. 147–154. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.147-154>
8. Kharchenko S., et al. Influence of physical and constructive parameters on the durability of vibrating sieves of grain separation machines. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16(6). P. 156–165. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/156128>
9. Romanyuk N.N., et al. Improvement of devices for cleaning sieves of grain cleaning machines. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2767. 020005. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0127256>
10. Li H., Wang J.S., Yuan J.B., Yin W.Q., Wang Z.M., Qian Y.Z. Analysis of threshed rice mixture separation through vibration screen using discrete element method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. Vol. 10(6). P. 231–239. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171006.2910>
11. Chen Y.H., Tong X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2009. Vol. 19, No. 4. P. 493–497. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60092-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60092-2)
12. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct / Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S., Piven M., Abduev M., Miernik A., Popardowski E., Kielbasa P. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(10). 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>
13. Zhao L., et al. Simulation study of rice cleaning based on DEM-CFD coupling method. *Processes*. 2022. Vol. 10(2). Article 281. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020281>
14. Guo Q., et al. A review of the discrete element method/modelling in agricultural engineering. *Journal of Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 54(4). DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2023.1534>
15. Horabik J., Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 147. P. 206–225.
16. Influence of Sieve Surface Attitude on Sieving Performance of Granular Materials with Non-Uniform Feeding Conditions / Zhu, L., Chen, S., Zhao, Z., Ding, H., & Zhu, Y. *Agriculture*, 12(12), 2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122023>
17. Chen Y.H., Tong X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2010. Vol. 20, No. 4. P. 615–620. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60254-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60254-4)
18. Shi R., et al. Design of the vibrating sieving mechanism for a quinoa combine harvester and coupled analysis of DEM-MBD. *Agriculture*. 2025. Vol. 15(12). Article 1317. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15121317>
19. Wang G., Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2011. Vol. 21, No. 3. P. 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>
20. Бажан І.М., Лещенко С.М., Васильковський О.М. Оцінка ефективності роботи решіт зерноочисних машин із зигзагоподібним розташуванням отворів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. Вип. 13(44). С. 151-166. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).151-166](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).151-166)
21. A Study on the Dynamic Behavior of a Sieve in an Industrial Sifter / Modrzewski, R.; Obraniak, Rylski, A.; Siczek, K. *Appl. Sci*. 2022, 12, 8590. <https://doi.org/10.3390/app12178590>
22. Степаненко С. П., Котов Б. І., Попадюк І. С. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густиною під час одномірного переміщення зернового потоку. *Механізація та електрифікація сільського господарства: Загальнодержавний збірник*. 2021. Вип. №14 (113). Глевах : ННЦ “ІМЕТГ”, 2021. С. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>

References

1. Salo, V. M., Luzan, P. H., & Bohatyrov, D. V. (2014). *Tekhnichne zabezpechennia pidhotovky zerna do zberihannia* [Technical support for grain preparation for storage]. SPD FO Lysenko V. F.

2. Salo, V. M., Luzan, P. H., & Bohatyrov, D. V. (2013). *Naukovi osnovy separatsii zerna na reshetakh z klynopodibnoi formoiu otvoriv* [Scientific foundations of grain separation on sieves with wedge-shaped openings]. SPD FO Lysenko V. F.
3. Kotov, B. I., Derevenko, I. A., & Stepanenko, S. P. (2016). *Teoretychni aspekty separatsii zernovykh materialiv na stupinchastokonichnomu reshete vibrovidtsentrovyykh mashyn* [Theoretical aspects of separation of grain materials on a stepped-conical sieve of vibrocentrifugal machines]. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnolohiiakh*, (3), 175–180.
4. Aliiev, E. B., & Yaropud, V. M. (2019). *Tekhniko-tehnologichne zabezpechennia pretsyziinoi separatsii nasinnievoho materialu soniashnyka* [Technical and technological support for precision separation of sunflower seed material]. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnolohiiakh*, 1(92), 40–47.
5. Bredykhin, V. V. (2017). *Teoretychni osnovy vibropneumovidtsentrovoho rozdilennia nasinnievyykh materialiv za hustynoiu nasinnia* [Theoretical foundations of vibro-pneumo-centrifugal separation of seed materials by seed density]. Kharkiv.
6. Zadorozhnii, O., Moroz, S. M., & Vasylovskiy, O. M. (2023). *Analiz konstruktivnykh prystroiv hravitatsiinykh reshit z kolyvalnym rukhom reshitnoho stanu zernoochysnykh mashyn zahalnoho pryznachennia* [Analysis of cleaning device designs for oscillating gravity sieves in general-purpose grain cleaning machines]. *Konstruiuvannia, Vyrobnnytstvo ta Ekspluatatsiia Silskohospodarskykh Mashyn*, (53), 237–246. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246>
7. Luzan, P. H., Kisilov, R. V., & Luzan, O. R. (2019). *Obgruntuvannia parametriv resheta z shchilynamy nepostiinoho rozmiru* [Substantiation of parameters of a sieve with variable-size openings]. *Konstruiuvannia, Vyrobnnytstvo ta Ekspluatatsiia Silskohospodarskykh Mashyn*, (49), 147–154. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.147-154>
8. Kharchenko, S., Kharchenko, F., Samborski, S., Paśnik, J., Kovalyshyn, S., & Sirovitskiy, K. (2022). Influence of physical and constructive parameters on the durability of vibrating sieves of grain separation machines. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(6), 156–165. <https://doi.org/10.12913/22998624/156128>
9. Romanyuk, N. N., Ednach, V. N., Bondarenko, D. N., Tikhonov, E. A., Karnaukhov, A. I., Butenko, A. F., & Sokolova, V. A. (2023). Improvement of devices for cleaning sieves of grain cleaning machines. *AIP Conference Proceedings*, 2767, 020005. <https://doi.org/10.1063/5.0127256>
10. Li, H., Wang, J. S., Yuan, J. B., Yin, W. Q., Wang, Z. M., & Qian, Y. Z. (2017). Analysis of threshed rice mixture separation through vibration screen using discrete element method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(6), 231–239. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171006.2910>
11. Chen, Y. H., & Tong, X. (2009). Application of the DEM to screening process: A 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 19(4), 493–497. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60092-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60092-2)
12. Kharchenko, S., Borshch, Y., Kovalyshyn, S., Piven, M., Abduev, M., Miernik, A., Popardowski, E., & Kielbasa, P. (2021). Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct. *Applied Sciences*, 11(10), Article 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>
13. Zhao, L., Chen, L., Yuan, F., & Wang, L. (2022). Simulation study of rice cleaning based on DEM-CFD coupling method. *Processes*, 10(2), Article 281. <https://doi.org/10.3390/pr10020281>
14. Guo, Q., & Xia, H. (2023). A review of the discrete element method/modelling in agricultural engineering. *Journal of Agricultural Engineering*, 54(4). <https://doi.org/10.4081/jae.2023.1534>
15. Horabik, J., & Molenda, M. (2016). Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems Engineering*, 147, 206–225. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>
16. Zhu, L., Chen, S., Zhao, Z., Ding, H., & Zhu, Y. (2022). Influence of sieve surface attitude on sieving performance of granular materials with non-uniform feeding conditions. *Agriculture*, 12(12), Article 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122023>
17. Chen, Y. H., & Tong, X. (2010). Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 20(4), 615–620. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60254-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60254-4)
18. Shi, R., Ren, X., Dai, F., Zhao, W., & Wang, T. (2025). Design of the vibrating sieving mechanism for a quinoa combine harvester and coupled analysis of DEM-MBD. *Agriculture*, 15(12), Article 1317. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121317>
19. Wang, G., & Tong, X. (2011). Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 21(3), 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>

20. Bazhan, I. M., Leshchenko, S. M., & Vasylykovskiy, O. M. (2026). Otsinka efektyvnosti roboty reshit zernoochysnykh mashyn iz zyhzhopodibnym roztashuvanniam otvoriv. *Tsentrlnoukrainskyi Naukovyi Visnyk. Tekhnichni Nauky*, 13(44), 151–166. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).151-166](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).151-166)
21. Modrzewski, R., Obraniak, A., Rylski, K., & Siczek, K. (2022). A study on the dynamic behavior of a sieve in an industrial sifter. *Applied Sciences*, 12(17), Article 8590. <https://doi.org/10.3390/app12178590>
22. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., & Popadiuk, I. S. (2021). Doslidzhennia protsesu pnevmovibratsiinoho podilu zerna za hustynoiu pid chas odnomirnogo peremishchennia zernovoho potoku. *Mekhanizatsiia ta Elektryfikatsiia Silskoho Hospodarstva*, 14(113), 77–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>

Petro Luzan, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Hrinchuk Andrii**, Postgraduate student, **Olena Luzan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Substantiation of the Motion of Grain Material Particles on a Sieve with a Combined Rod Profile

The efficiency of grain cleaning largely depends on the interaction between grain particles and the working surface of sieves. Conventional rod sieves with fixed slot geometry are prone to particle jamming and clogging, which reduce separation efficiency and process stability. This study presents a theoretical substantiation of the motion of grain material particles on a sieve with a combined rod profile consisting of alternating circular and triangular rods. The circular rods are rigidly fixed, whereas the triangular rods are mounted on elastic elements, enabling controlled variation of the slot width during operation.

A mathematical model describing particle motion on the inclined sieve surface was developed considering gravitational, inertial, frictional, and contact forces. The interaction between a grain particle and the combined rod profile was analyzed to determine the conditions governing particle orientation, passage through the slot, jamming, and subsequent release. The dynamic behavior of the elastic triangular rod was additionally represented as a single-degree-of-freedom oscillatory system, and its amplitude–frequency characteristics were investigated.

The analysis demonstrated that the asymmetric contact between the particle and the combined rod profile generates a turning moment that promotes particle orientation by its passing dimension toward the slot. The elastic displacement of the triangular rod leads to a temporary increase in slot width, facilitating particle passage while reducing the probability of clogging. Analytical expressions describing particle passage, jamming, and self-cleaning conditions were obtained, providing a theoretical basis for selecting the design and operating parameters of the proposed sieve.

The proposed combined rod profile improves the separation process through the simultaneous action of particle self-orientation and adaptive variation of slot geometry. The obtained theoretical relationships can be used in the design and optimization of self-cleaning grain sieves and grain-cleaning machines to improve separation efficiency, operational reliability, and process stability.

grain material, sieve, grain separation, grain particle, combined rod profile, self-cleaning sieve, elastic element, grain-cleaning machine

Одержано (Received) 19.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026