

**Завгородній О. І.,**  
ORCID 0000-0003-2510-9160  
**Богомолов О. В.,**  
ORCID 0009 0004 8070 6157  
**Богомолов О. О.,**  
ORCID 0009-0006-4137-0181  
**Бойко Є. В.,**  
ORCID 0009-0009-4340-165X  
Державний біотехнологічний  
університет, м. Харків, Україна

**МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНОГО  
РУХУ ЧАСТИНКИ ПО ПОХИЛІЙ  
ПЛОЩИНІ З ПОДАЧЕЮ У  
ПОПЕРЕЧНОМУ НАПРЯМКУ**

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.60>

УДК 631.362

*Завгородній О. І., Богомолов О. В., Богомолов О. О., Бойко Є. В. Моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею у поперечному напрямку*

*Анотація.* Проаналізовано методи сепарації сипких матеріалів, за ознаками подільності, які на даний час застосовуються в відомих сепараторах. Показано, що вибір ознаки подільності є особливо важливим при підготовці посівного матеріалу, тому що з усієї маси насіння отриманого при збиранні необхідно вибрати насіннєвий матеріал, який має найбільший біологічний потенціал закладений в ньому генетично. Ця задача, як правило, вирішується із застосуванням комплексу ознак подільності, що приводить до зниження продуктивності сепарації збільшенню енергії витрат та травмованості зерна, тому правильний вибір та обґрунтування ознаки подільності, яка є найбільш ефективною розглядається в даній роботі. Розглянуто гравітаційний рух пружної округлої частинки по похилій площині. На основі диференціальних рівнянь з використанням теорії удару побудовані циклічні траєкторії польоту частинки у відносній системі координат, зв'язаній з площиною. Показано, що за ознаку гравітаційного розподілу зернових сумішей на похилій площині доцільно прийняти момент інерції частинок відносно їх центра мас.

*Ключові слова:* сепарація, моделювання, ударний рух, похила площина, траєкторії руху, момент інерції.

*Zavgorodniy O. I., Bogomolov O. V., Bogomolov O. O., Boyko E. V. Modeling of the impact motion of a particle along an inclined plane with a feed in the transverse direction*

*Abstract.* The methods of separation of loose materials, according to the signs of divisibility, which are currently used in known separators, are analyzed. It is shown that the choice of the sign of divisibility is especially important in the preparation of seed material, because from the entire mass of seeds obtained during harvesting, it is necessary to select the seed material that has the greatest biological potential genetically inherent in it. This problem is usually solved using a complex of signs of divisibility, which leads to a decrease in separation productivity, an increase in energy consumption and grain injury, therefore the correct choice and justification of the sign of divisibility, which is the most effective, is considered in this work. The gravitational motion of an elastic round particle along an inclined plane is considered. Based on differential equations using the theory of impact, cyclic trajectories of the particle's flight in a relative coordinate system related to the plane are constructed. It is shown that it is advisable to take the moment of inertia of particles relative to their center of mass as a sign of the gravitational distribution of grain mixtures on an inclined plane.

*Keywords:* separation, modeling, impact motion, inclined plane, motion trajectories, moment of inertia.

**Постановка проблеми.** Результат розподілу сипких матеріалів на фракції залежить від обраної ознаки розподілу. Якщо, наприклад, основна фракція і домішки відрізняються за розмірами, то ознакою розподілу може бути товщина, ширина або довжина частинок. В цьому разі застосовують решітні очисні машини чи трієри. На решетах з довгастими отворами суміші розділяють по найменшому розмірі (товщині), на решетах з круглими отворами – по середньому розмірі (ширині), а для розподілу по найбільшому розміру (довжині) застосовують трієри. Якщо фракції суміші за розмірами майже не відрізняються, то для їх розподілу застосовують інші ознаки: шорсткість, волохатість поверхні, форма, питома вага, колір, коефіцієнт парусності тощо. Особливо важливим є вибір ознаки розподілу для підготовки посівного матеріалу. Необхідно з усієї маси насіння, отриманого при збиранні, відібрати насінневий матеріал, що має найбільшу біологічну цінність. Сюди повинне ввійти насіння, яке після висіву реалізує біологічний потенціал, закладений в ньому генетично. Але вказана задача в повній мірі вирішується не завжди просто. Інколи вона змушує застосовувати по черзі кілька ознак розподілу підряд, що знижує продуктивність і може привести до збільшення пошкоджень зерна. В цих умовах на першому плані стоїть правильний вибір чи обґрунтування нової ознаки розподілу, яка є найбільш ефективною. На наш погляд ефективною ознакою розподілу може бути момент інерції частинок відносно їх центра мас. Момент інерції залежить від розподілу мас всередині цієї насінини і саме цей розподіл виділяє зріле виповнене зерно серед інших насінин. Тому видається доцільним розділяти деякі зернові суміші саме за моментом інерції. Останнім часом велика увага надається енергоощадним технологіям, основою яких є гравітація. Як правило, робота гравітаційних сепараторів базується на відмінностях фракцій по шорсткості та пружності але на сьогодні можливість застосування момента інерції частинок, як ознаки розподілу на цих сепараторах, вивчена не достатньо і потребує подальшого розгляду.

**Аналіз існуючих досліджень.** Гравітаційний рух частинки по гравітаційній поверхні розглянуто в роботі [1]. В цій роботі вивчалася кочення частинки при переміщенні сепаруючою поверхні у поперечному напрямку відносно її нахилу. Співударяння частинки з поверхнею не розглядалося. Роботи [2-5] присвячені дослідженню періодичних режимів руху кулястої частинки у повітряному потоці між двома площинами. Розглянуто як періодичні симетричні режими – для вертикально розміщених площин [4], так і асиметричні – для похилих площин [5]. Для підтримки вказаних режимів обов'язкове коливання площин. Найбільш близькою за змістом до цієї статті є робота [6]. Вона присвячена дослідженню неперіодичних режимів руху частинки у повітряному потоці між двома площинами, що коливаються. При деяких обмеженнях на параметри системи взаємодія частинки з верхньою площиною припиниться і вона буде рухатися в ударному режимі по нижній площині.

Як бачимо, взаємодія частинок матеріалу з робочою поверхнею гравітаційних сепараторів відбувається за допомогою удару [9-12]. При великих швидкостях удару, більших, ніж 4 м/с, слід враховувати пластичні деформації, що виникають в зоні контакту [8-10]. При цьому ефективною є Пуассонівська модель удару, де враховуються фази стискання та відновлення частинок. Але гравітаційні технології підтримують переважно режими руху при швидкостях, значно менших 4 м/с. В цьому випадку допустимою є теорія удару, яка основана на відомій гіпотезі Ньютона або уточнена теорія удару Плявнієкса В.Ю., яка прийнята в цій роботі. Розрахунки та графічні ілюстрації виконані в середовищі Mathcad [13].

**Метою роботи** є виявлення особливостей ударного руху частинок суміші на основі аналізу траєкторій вказаного руху та обґрунтування можливості використання момента інерції частинок відносно їх центра мас, як ознаки розподілу сипких матеріалів на фракції.

**Основні результати роботи.** Розглянемо рух окремої частинки сипкого матеріалу по робочій поверхні у вигляді похилої площини (рис. 1). Значна частина сипких матеріалів включає частинки кулястої форми. Наприклад, кулясту форму має насіння ріпаку, гороху, проса, маку, капусти та багатьох інших рослин. Отже, прийнемо далі, що частинки оброблюваного матеріалу мають кулясту форму. Відмітимо також, що результати досліджень для кулястої форми можуть бути перенесені і на частинки інших форм, якщо треба оцінити процеси руху не кількісно, а лише якісно. Крім того, в гравітаційних сепараторах заради зменшення травмування зерна при співударяннях з робочими поверхнями встановлюються малі швидкості зіткнення. В цих умовах опором повітря при дослідженні руху частинок доцільно знехтувати.

Розрахункова схема руху кульки зображена на рис.1. Нехай  $\alpha$  – кут нахилу робочої поверхні;  $\psi$  – кут поперечної подачі частинки відносно горизонталі. Забезпечити необхідну швидкість завантаження  $\vec{U}$  можна, наприклад, за рахунок скочування частинки з деякої висоти  $h$  по прямолінійній напрямній, яка встановлена під тим же кутом  $\psi$  відносно горизонталі. Вважаючи, що частинки скочуються по напрямній без проковзування, одержано вирази для лінійної ( $\vec{U}$ ) і кутової ( $\vec{\omega}$ ) швидкостей до удару в проекціях на вісі відносно системи координат  $xuz$  (рис.1):

$$U = \sqrt{2gh}, \quad U_x = U \cos \psi, \quad U_y = -U \sin \psi \sin \alpha; \quad U_z = U \sin \psi \cos \alpha; \quad (1)$$

$$\omega = U/r, \quad \omega_x = 0, \quad \omega_y = -\omega \cos \alpha, \quad \omega_z = -\omega \sin \alpha. \quad (2)$$

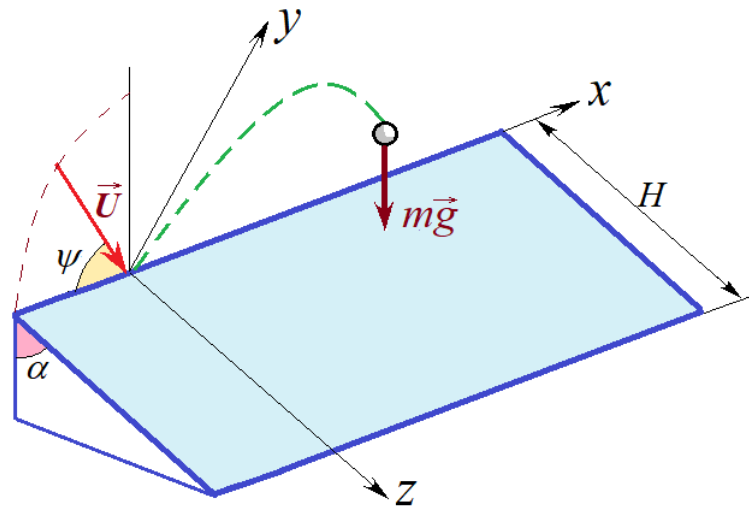


Рис. 1. Схема моделювання руху частинки після удару об похилу площину з подачею в поперечному напрямку

Для знаходження кінематичних параметрів руху частинки після удару застосовувалося рівняння косоного удару об перешкоду Плявнієкса В.Ю. [11]. Наведемо ці рівняння, модифіковані в роботі [12], для частинок кулястої форми:

$$V_x = U_x - \frac{\mu(U_x + \omega_z r)}{1 + \mu}, \quad V_y = -RU_y, \quad V_z = U_z - \frac{\mu(U_z - \omega_x r)}{1 + \mu}, \quad (3)$$

$$\Omega_x = \omega_x + \frac{U_z - \omega_x r}{r(1 + \mu)}, \quad \Omega_y = \omega_y, \quad \Omega_z = \omega_z - \frac{U_x + \omega_z r}{r(1 + \mu)}, \quad (4)$$

де:  $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$ ,  $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$  – швидкість центра мас кульки, відповідно, до та після удару;

$\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ ,  $\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$  – кутова швидкість руху кульки, відповідно, до та після удару;

$R$  – коефіцієнт відновлення швидкості при ударі;

$\mu = (\rho/r)^2$ ;  $r$ ,  $\rho$  – відповідно, радіус кульки і радіус інерції кульки, при цьому  $0 < \mu < 2/3$  [14].

Диференціальні рівняння польоту частинки між співудареннями мають вигляд:

$$\ddot{x} = 0; \quad \ddot{y} = -g \sin \alpha; \quad \ddot{z} = g \cos \alpha. \quad (5)$$

Розв'язок цих рівнянь при початкових умовах (6)

$$x = x_0, \quad y = y_0, \quad z = z_0, \quad \dot{x} = V_{x0}, \quad \dot{y} = V_{y0}, \quad \dot{z} = V_{z0} \quad \text{при} \quad t = t_0 \quad (6)$$

одержано у наступному вигляді:

$$\dot{x} = V_{x0}, \quad \dot{y} = V_{y0} - g(t - t_0) \sin \alpha, \quad \dot{z} = V_{z0} + g(t - t_0) \cos \alpha; \quad (7)$$

$$x = x_0 + V_{x0} (t - t_0), \quad y = y_0 + V_{y0} (t - t_0) - \frac{1}{2} g (t - t_0)^2 \sin \alpha, \quad (8)$$

$$z = z_0 + V_{z0} (t - t_0) + \frac{1}{2} g (t - t_0)^2 \cos \alpha.$$

Кінематичні параметри пружної частинки в момент завантаження на площину (до першого зіткнення) визначалися за співвідношеннями (1)-(2), а початкові умови після відриву від площини – за рівняннями удару (3)-(4). Далі застосовувався метод припасовування інтервалів, коли кінцеві параметри кожного попереднього інтервалу вважалися початковими параметрами для кожного наступного. Інтервалом вважається політ частинки між двома сусідніми ударами об площину. Параметри польоту визначалися рівняннями (7), (8). Розрахунок руху частинки продовжувався до моменту оминання нею нижньої кромки робочої поверхні. Цей момент настає, коли координата  $z$  при польоті частинки досягає ширини  $H$  робочого органу (рис.1). Отже, останній інтервал, як правило, є скороченим, а його тривалість знаходиться з останнього із рівнянь (8) при умові  $z = H$  (з двох коренів приймається додатний):

$$t = t_0 - \frac{V_{z0}}{g \cos \alpha} + \sqrt{\left(\frac{V_{z0}}{g \cos \alpha}\right)^2 + \frac{2(H - z_0)}{g \cos \alpha}}. \quad (9)$$

Для побудови просторової траєкторії руху частинки використовувалась влаштована функція Mathcad:  $\text{CreateSpace}(F, t_0, t_k, tgrig, fmap)$ . В ній:  $F$  – трьох-елементна векторна функція однієї змінної ( $t$ );  $t_0, t_k$  – проміжок для змінної  $t$ ;  $tgrig$  – число точок кривої;  $fmap$  – необов'язковий параметр, який вказує на вид координат для побудови графіка (при відсутності параметра  $fmap$  координати вважаються декартовими). В нашому випадку  $F = (x(t) \quad y(t) \quad z(t))^T$ , де "T" – символ

транспонування вектора. Результати розрахунків проілюстровані графіками нижче. Для більшої наглядності масштабний коефіцієнт висоти підскоку частинок по осі  $Oy$  збільшено до  $\kappa = 3$ .

Критерієм розподілу сумішей в гравітаційному сепараторі може бути “дальність стрибків” частинок при відбиванні від робочої поверхні або “дальність транспортування” (значення координати  $x$  сходу частинок з робочої поверхні – рис.1).

На рис.2 (а) зображені траєкторії руху частинок, які відрізняються шорсткістю ( $f = 0,1$  – крива червоного кольору,  $f = 0,1$  – синього). Як бачимо, коефіцієнт тертя майже не впливає на траєкторію руху частинок. Це означає, що навіть у тому разі якщо коефіцієнти тертя частинок суміші мають великі розбіжності їх сепарація на фрикційних поверхнях з ударом недоцільна і в цьому випадку слід здійснювати пошук іншого способу сепарації, наприклад на віброфрикційних поверхнях або горках з рухомою поверхнею.

На рис. 2 (б) – траєкторії руху частинок, які відрізняються пружністю ( $R = 0,25$  для кривої зеленого кольору,  $R = 0,65$  – для кривої рожевого кольору). Перший критерій (дальність стрибків) успішно використовується, що не суперечить одержаним кривим. Але за другим критерієм (дальність транспортування) розділити суміші на фракції різної пружності неможливо.

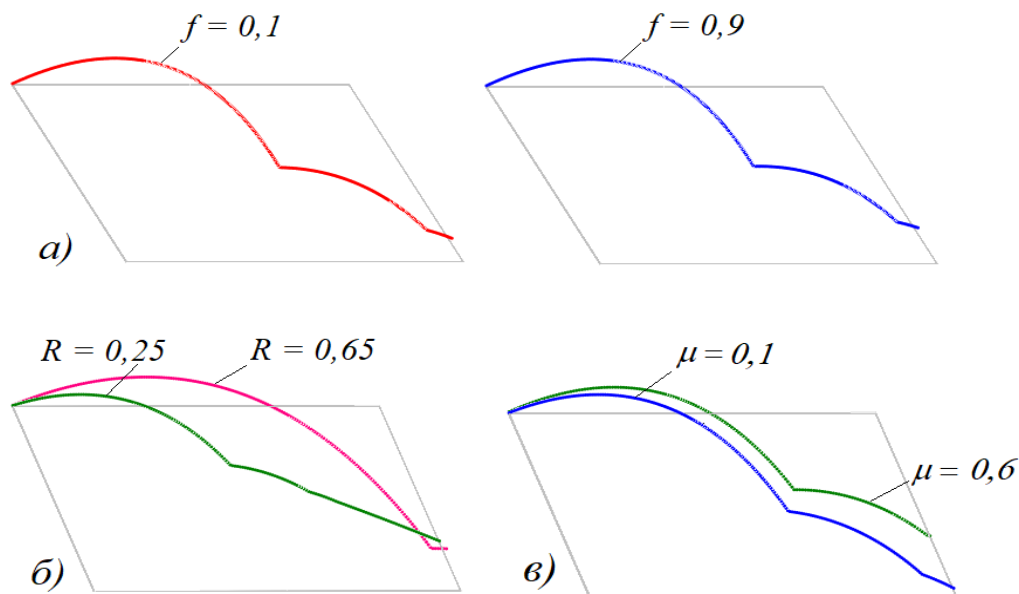


Рис. 2. Просторове зображення траєкторій руху частинок при:  $\alpha = 45^\circ$ ;  $\psi = 60^\circ$ ;  $H = 0,4$  м; а)  $R = 0,5$ ,  $\mu = 0,4$ ; б)  $f = 0,4$ ,  $\mu = 0,4$ ; в)  $R = 0,45$ ,  $f = 0,4$ .

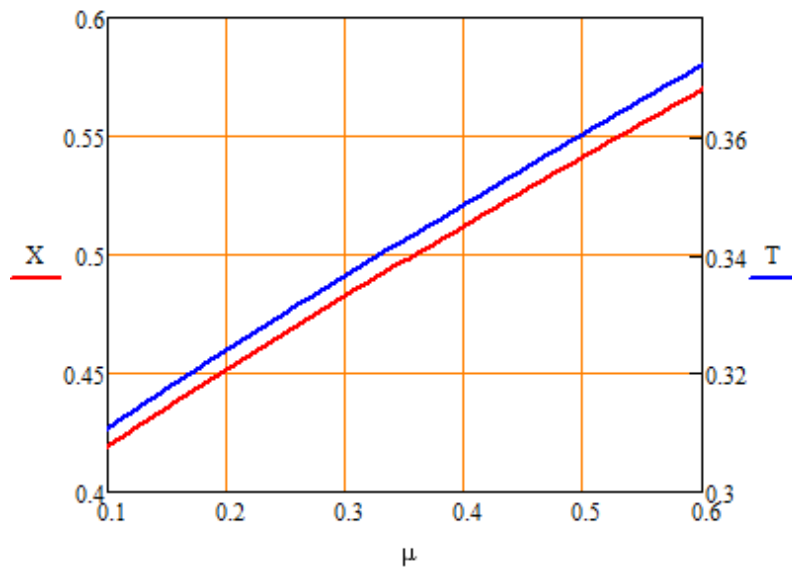


Рис. 3. Залежності дальності і часу транспортування частинок вздовж осі  $Ox$  від показника  $\mu$  при:  $h_0 = 0,3\text{ м}$ ;  $H = 0,4\text{ м}$ ;  $r = 0,006\text{ м}$ ;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\psi = 45^\circ$ ;  $f = 0,6$ ;  $R = 0,5$ .

Можна також відзначити, що траєкторії руху частинок у цьому випадку відрізняються по висоті. Це наводить на думку про пошук нових способів сепарації за цією ознакою. Наприклад, на багатоярусних ударних сепараторах частинки, що мають більшу висоту траєкторій, можуть співударятись з верхніми сепаруючими поверхнями, а значить траєкторії частинок пружної фракції будуть іншими.

На рис.2(в) маємо траєкторії руху частинок в залежності від показника  $\mu$ , який прямо пропорційний моменту інерції ( $J = m\mu r^2$ ). Ці траєкторії (синього та зеленого кольору) суттєво відрізняються між собою за дальністю транспортування при майже однаковій дальності стрибків. Це вказує на можливість розподілу сумішей на фракції, частинки яких відрізняються моментом інерції. Більш детально ця особливість показана на рис.3 (червоний колір). З нього випливає, що дальність транспортування лінійно залежить від показника  $\mu$  на відповідному відрізку  $[0,1; 0,6]$ . Аналогічна залежність має місце для часу транспортування (синій колір). За вказаною ознакою можлива як сепарація, так і сортування насіння.

**Висновки.** Проведено теоретичні дослідження руху частинок кулястої форми по гравітаційній поверхні. Показана доцільність проведення розрахунків і побудови просторових траєкторій руху частинок у середовищі Mathcad. З'ясовано, що дальність транспортування фракцій сипкої суміші, які відрізняються між собою пружністю або шорткністю практично однакова, тому сепарація сумішей за цим критерієм недоцільна. Поряд з цим, частинки суміші з більшою пружністю мають в процесі руху більшу дальність стрибків, що вже успішно використовується, але різниця у висоті підскоку частинок різної пружності, як критерій розподілу, практично не реалізується. На нашу думку цей критерій може бути корисним для багатоярусних гравітаційних сепараторів, де пружні частинки можуть взаємодіяти з верхніми робочими органами, в результаті чого їх траєкторія буде вигідно відрізнятися порівняно з траєкторіями інших частинок. Момент інерції частинок відносно їх центра мас, як критерій розподілу, до цього часу вивчений не достатньо. Як відомо, він залежить від розподілу мас всередині цієї насінини і саме цей розподіл виділяє зріле виповнене зерно серед інших насінин. Виконані дослідження показали, що траєкторії руху частинок з різними моментами інерції мають достатньо різну дальність транспортування. Це свідчить про доцільність розподілу сипких сумішей на гравітаційних сепараторах за цим критерієм.

### Список використаних джерел

1. Богомолів А.В. Сепарація труднорозділюваних сыпучих смесей. Монографія: – Х.: ХНТУСХ ім. П. Василенко. 2013. – 308 с.
2. Патент на корисну модель 75152 від 26.11.2012. Вібродарний сепаратор для очищення сипучих сумішей / Сіняєва О.В., Завгородній О.І.: Україна, Український інститут промислової власності.
3. Патент на корисну модель 76324 від 25.12.2012. Вібросепаратор вертикального типу з повітряним потоком для розділення сипучих сумішей / Сіняєва О.В., Завгородній О.І.: Україна, Український інститут промислової власності.
4. Завгородній А.И. Движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями / Завгородній А.И., Сіняєва О.В. // “Вібрації в техніці та технологіях”: Всеукраїнський науково-технічний журнал, №3(67).– Вінниця: ВНАУ, 2012.– С.20-27.
5. Завгородній А.И. Асимметричный режим движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями / Завгородній А.И., Сіняєва О.В. // “Процеси та апарати харчових виробництв”: Наукові праці національного університету харчових технологій, Вип.47.– Київ, НУХТ, 2012.– С.61-67.
6. Завгородній О.І., Сіняєва О.В. Траєкторії руху кулі в повітряному потоці між похилими площинами, що коливаються // “Механізація сільськогосподарського виробництва”: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, Вип.148.– Харків, ХНТУСГ, 2014.– С.362-370.
7. Шелест А.Г. Сепарування зернових мас із використанням сил гравітації / А.Г. Шелест, Т.П. Чернишук, В.С. Кошулько // Ж. Хранение и переработка зерна, 2017. – №11.– С.47–49.
8. Бредихін В.В., Богомолів О.В., Сліпченко М.В. та ін. Наукові основи ощадної підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом. Монографія. – Харків, Діса+: – 2023. – 408 с.
9. Ольшанський В.П. Про взаємодію важкого твердого тіла з пружним півпростором / В.П. Ольшанський, О.В. Богомолів, О.О. Богомолів //Сучасні напрями технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. – Х.: 2018. – Вип. № 194.– С. 38–46.
10. Ольшанський В.П. Про удар в'язкопружного тіла по нерухомому півпростору/ В.П. Ольшанський //Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин, 2018, №38 (1314), с.37-41.
11. Oscillations with positional friction under mechanical shock / Vasyl Olshansky, Oleksii Bogomolov, Oleksii Bogomolov, Viktor Irklienko, Lilia Kys-Korkyshenko // Тека. A QUARTERL JOURNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY. – 2019, Vol. 19, № 1, P. 49–58.
12. Завгородній О.І. Просторовий удар сферичного тіла об перешкоду / О. І. Завгородній, О. В. Сіняєва // Вісник Харків. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. - Харків : КП "Міська друкарня", 2014. - Вип. 152: Сучас. напрями технології та механізації процесів перероб. і харч. вир-в. - С. 42-51.
13. Паранчук Я. С., Мороз В. І. Обчислювання та програмування в Mathcad: підручник. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. — 364 с.
14. Завгородній А.И., Обыхвост А.В. К исследованию движения частиц округлой формы по рабочим поверхностям машин // Динаміка та міцність машин, будівель і споруд: Зб. наук. пр. ПНТУ ім. Ю. Кондратюка – Полтава, 2009.– С.119-125.

### References

1. Bogomolov A.V. Separation of difficult-to-separate bulk mixtures. Monograph: – Kh.: KhNTUSKh im. P. Vasylenko. 2013. – 308 p.

2. Patent for utility model 75152 dated 11/26/2012. Vibro-impact separator for cleaning bulk mixtures / Sinyaeva O.V., Zavgorodny O.I.: Ukraine, Ukrainian Institute of Industrial Property.

3. Patent for utility model 76324 dated 12/25/2012. Vertical-type vibrating separator with air flow for separating bulk mixtures / Sinyaeva O.V., Zavgorodny O.I.: Ukraine, Ukrainian Institute of Industrial Property.

4. Zavgorodny A.I. Ball motion in the air flow between vibrating planes / Zavgorodny A.I., Sinyaeva O.V. // "Vibrations in engineering and technologies": All-Ukrainian scientific and technical journal, No. 3(67).– Vinnytsia: VNAU, 2012.– P.20-27.

5. Zavgorodny A.I. Asymmetric mode of ball motion in the air flow between vibrating planes / Zavgorodny A.I., Sinyaeva O.V. // "Processes and apparatuses of food production": Scientific works of the National University of Food Technologies, Vol. 47.– Kyiv, NUHT, 2012.– P.61-67.

6. Zavgorodny O.I., Sinyaeva O.V. Trajectories of the ball in the air flow between oscillating inclined planes // "Mechanization of agricultural production": Bulletin of the Petro Vasylenko KhNTUSG, Issue 148.– Kharkiv, KhNTUSG, 2014.– P.362-370.

7. Shelest A.G. Separation of grain masses using gravitational forces / A.G. Shelest, T.P. Chernyshuk, V.S. Koshulko // Journal of Grain Storage and Processing, 2017. №11.– P.47–49.

8. Bredykhin V.V., Bogomolov O.V., Slipchenko M.V. et al. Scientific foundations of economical seed preparation with improved biological potential. Monograph. – Kharkiv, Disa+: – 2023. – 408 p.

9. Olshanskyi V.P. On the interaction of a heavy solid body with an elastic half-space / V.P. Olshansky, O.V. Bogomolov, O.O. Bogomolov //Modern trends in technology and mechanization of processing and food production processes: Bulletin of KhNTUSG. – Kh.: 2018. – Issue No. 194.– P. 38–46.

10. Olshansky V.P. On the impact of a viscoelastic body on a stationary half-space / V.P. Olshansky // Bulletin of NTU "XPI". Series: Dynamics and strength of machines, 2018, No. 38 (1314), p.37-41.

11. Oscillations with positional friction under mechanical shock / Vasyl Olshansky, Oleksii Bogomolov, Oleksii Bogomolov, Viktor Irklienko, Lilia Kys-Korkyshenko // Teka. A QUARTERL JORNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY. – 2019, Vol. 19, No. 1, P. 49–58.

12. Zavgorodny O.I. Spatial impact of a spherical body on an obstacle / O. I. Zavgorodny, O. V. Siniaeva // Visnyk Kharkiv. nat. tekhn. un-tu syl. hosp-va im. P. Vasylenko. - Kharkiv: KP "Miska drukharnia", 2014. - Issue 152: Modern. directions of technology and mechanization of processes of processing. and food production. - P. 42-51.

13. Paranchuk Ya. S., Moroz V. I. Computation and programming in Mathcad: a textbook. — Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic, 2013. — 364 p.

14. Zavgorodny A.I., Obykhvost A.V. To the study of the motion of round-shaped particles on the working surfaces of machines // Dynamics and strength of machines, buildings and structures: Collection of scientific works of the Yu. Kondratyuk Polytechnic University - Poltava, 2009.– P.119-125.

Отримано: 07.04.2026. Прийнято: 16.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.