

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОАСПІРАЦІЙНОГО СЕПАРУВАННЯ НАСІННЕВОГО МАТЕРІАЛУ

Ігор Паламарчук, д. т. н., Сергій Кюрчев, к. т. н.,
Валентина Верхоланцева, к. т. н., Олександр Колодій, к. т. н.
*Таврійський державний агротехнологічний університет,
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна,
e-mail: dec.tgatu@ukr.net*

<https://doi.org/>

Постановка проблеми. У процесах розділення сипкої сільськогосподарської сировини, зокрема насінневого матеріалу, чіткість відокремлення фракцій значним чином визначає схожість насіння та відповідно показники врожайності. Переважно ця операція реалізується аспіраційним способом, що відзначається великою кількістю процесних, конструктивних і технологічних факторів, створюючи труднощі в розробці достатньо ефективного математичного апарату та передбаченні траєкторії руху часток [5; 12 – 19; 21; 25]. Тому використання додаткових інтенсифікуючих чинників перебігу досліджуваного процесу, які дозволяють збільшити інерційні сили в системі з механізмом їх керування, сприяючи підвищенню чіткості розщеплення, є безумовно актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед основних теоретичних розробок стосовно досліджуваного процесу можна відзначити, зокрема, доробок наукової школи Л. М. Тищенка, який описував процес пневматичної сепарації в апараті вертикального виконання за допомогою нелінійної динаміки двофазного середовища [22–24]. Під час дослідження цього процесу П. М. Василенко використовував рівняння руху насінини в аеродинамічному середовищі [7], а В. В. Адамчук описував процес аспіраційної сепарації у змінному повітряному потоці, досліджуючи рух частинок [2]. Дослідження руху частинки в похилому аспіраційному каналі проведено М. М. Абдуєвим [1].

Дослідженнями сепарації насіння сільськогосподарських культур за різницею аеродинамічних властивостей їх компонентів займалися: у природному повітряному потоці – В. П. Гарячкін, М. Г. Гладков, О. І. Завгородній та інші [8–10]; у напрямленому вертикальному потоці – В. П. Гарячкін, В. В. Котов, А. І. Нелюбов та інші [9; 12]; у похилому та горизонтальному потоці – П. М. Заїка, Ю. О. Манчинський, М. Г. Гладков та інші вчені [8; 11].

Подальші дослідження цього процесу виявили, що повітря впливає на траєкторію насінини переважно в момент руху зернової маси від внутрішньої стінки до зовнішньої: у центральній частині каналу швидкість повітря максимальна, а біля стінок зменшується, що погіршує умови розділення. Але при цьому нижня зона повітряного потоку як чинник поділу насінневого матеріалу не використовується, хоча внаслідок різної швидкості витання зернових фракцій у цій ділянці розподільника можливо отримати додатковий ефект підвищення чіткості розділення.

Постановка завдання. Метою досліджень є обґрунтування конструктивних і технологічних параметрів віброаспіраційного фракціонування за допомогою математичного аналізу кінематичних, силових та енергетичних характеристик руху часток сипкого середовища в умовах дії гравітаційних, відцентрових, архімедових силових факторів під час реалізації досліджуваного процесу.

Виклад основного матеріалу. За допомогою математичного середовища MathCAD та розробленої розрахункової програми будуємо кінематичні, силові та енергетичні характеристики досліджуваного процесу [6; 19; 20; 23; 25]. Серед кінематичних параметрів розглядали переміщення, швидкість та прискорення насінин досліджуваних фракцій. Як силові параметри досліджуваного процесу розглядали змушувальну силу та крутний момент, які були створені за рахунок реалізації керованого автоколивального режиму руху центральної труби розподільника. Критерієм техніко-економічної оцінки розробленого віброаспіраційного сепарування були витрати потужності в процесі.

Перед початком математичного моделювання прийняли такі припущення, що ґрунтуються на досвіді дослідження представлених процесів та обладнання для їх реалізації:

- 1) рух насінини при вході до центрального каналу осьовий прямолінійний;
- 2) сили опору діють у радіальному напрямі;
- 3) змушувальні сили фактори передаються безпосередньо до насінин, що рухаються у центральному каналі.

На рис. 1 подано розрахункову схему розробленого віброаспіраційного сепаратора [3; 4].

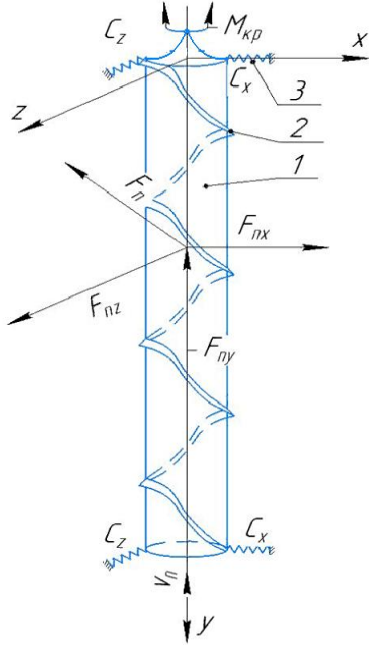


Рис. 1. Розрахункова схема віброаспіраційного сепаратора:

1 – центральна труба розподільника; 2 – вітрильний елемент; 3 – пружний елемент;

v_n, F_n – швидкість та сила тиску потоку повітря; C_x, C_z – жорсткості пружних елементів у напрямку осей Ox та Oz ; F_x, F_z, F_y – складові сили F_n ; $M_{кр}$ – крутний момент, що виникає під час обертання центральної труби розподільника; r_T – радіус центральної труби

Fig. 1. Calculation scheme of vibro-suction separator:
1 – central tube of distributor; 2 – sailing element;
3 – elastic element; v_n, F_n – velocity and force of pressure of air flow; C_x, C_z – stiffness of elastic elements in the direction of the axes Ox and Oz ; F_x, F_z, F_y – components of force F_n ; $M_{кр}$ – torque that occurs when the central tube of the distributor is rotated; r_T – radius central tube

Швидкість руху насінини визначали:

$$\dot{x} = v_x = \frac{l_x \cdot w \cdot F_n \cdot \cos wt}{t \cdot \sqrt{2} \cdot C_x - \frac{m_H \cdot F_n}{m_T}} = \frac{l_x \cdot \sqrt{\frac{F_n}{\sqrt{2} \cdot m_T \cdot l}} \cdot F_n \cdot \sin wt}{\sqrt{2} C_x - \frac{m_H}{m_T} \cdot l}, \quad (1)$$

$$\dot{z} = v_z = \frac{l_z \cdot \sqrt{\frac{F_n}{\sqrt{2} \cdot m_T \cdot l}} \cdot F_n \cdot \sin wt}{l \cdot \sqrt{2} \cdot C_z - \frac{m_H \cdot F_n}{m_T}}, \quad (2)$$

де v_x, v_z – проекції швидкості потоку повітря v_n на осі Ox та Oz , м/с; F_n – сила тиску потоку повітря, Н; C_x, C_z – жорсткості пружних елементів у напрямках осей Ox та Oz , Н·м/рад; l_x, l_z – лінійне зміщення центрального перерізу по осях Ox та Oz , мм; m_T, m_H – маси важкої та легкої насінин, г; w – кутова швидкість розподільника, об./с; l – лінійне зміщення розподільника, мм.

Прискорення руху насінини визначали за такими формулами:

$$\ddot{x} = a_x = \frac{l_x \cdot w^2 \cdot F_n \cdot \sin wt}{\frac{m_H \cdot F_n}{m_T} - l \cdot \sqrt{2} \cdot C_x}, \quad (3)$$

$$\ddot{z} = a_z = \frac{l_z \cdot w^2 \cdot F_n \cdot \sin wt}{\frac{m_H \cdot F_n}{m_T} - l \cdot \sqrt{2} \cdot C_z}. \quad (4)$$

Визначали силиві характеристики процесу, а саме змушувальні або збуджувальні сили, таким чином:

$$F_{bx} = \frac{l_x \cdot F_n \cdot \sin wt}{\sqrt{2} \cdot l}, \quad (5)$$

$$F_{bz} = \frac{l_z \cdot F_n \cdot \sin wt}{\sqrt{2} \cdot l}, \quad (6)$$

де F_{bx}, F_{bz} – складові змушувальні сили, що створює вібрації труби, Н.

Таким чином,

$$F = \sqrt{F_{bx}^2 + F_{bz}^2}. \quad (7)$$

Визначаємо крутний момент:

$$M_{кр} = F \cdot r_T = r_T \sqrt{\left(\frac{m_T}{r_T} \cdot x^2\right) + \left(\frac{m_T}{r_T} \cdot z^2\right)} = r_T \sqrt{x^4 + z^4}. \quad (8)$$

Шлях руху досліджуваних фракцій насінин за осями x та y :

$$S = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (9)$$

Абсолютна швидкість у радіальній площині:

$$v = \sqrt{\left(\dot{x}\right)^2 + \left(\dot{z}\right)^2}. \quad (10)$$

Абсолютне прискорення у радіальній площині:

$$a = \sqrt{\left(\ddot{x}\right)^2 + \left(\ddot{z}\right)^2}. \quad (11)$$

Аналіз результатів розрахунку всіх досліджуваних параметрів у середовищі MathCAD (див. табл. 1 – 5) виявив, що спостерігається істотне розщеплення значень цих параметрів. Це вказує на можливості підвищення ефективності та якості проєктованого процесу віброаспіраційної сепарації; обґрунтування значень робочих та конструкторських параметрів, а також режимів обробки.

Таблиця 1. Шлях руху фракцій насінин, м**Table 1.** The path of movement of fractions of seeds, m

Показ- ник	Кут повороту розподільника								
	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°	360°
$S_s \min$	0,00	0,48	0,68	0,83	0,96	0,83	0,68	0,48	0,00
$S_s \max$	0,00	29,72	42,03	51,48	59,44	51,48	42,03	29,72	0,00
$S_v \min$	0,00	0,34	0,48	0,59	0,68	0,59	0,48	0,34	0,00
$S_v \max$	0,00	19,18	27,13	33,22	38,36	33,22	27,13	19,18	0,00

Таблиця 2. Абсолютна швидкість руху фракцій насінин у радіальній площині, м/с**Table 2.** Absolute speed of movement of fractions of seeds in the radial plane, m/s

Показник	Кут повороту розподільника				
	270°	300°	315°	330°	360°
$V_s \min$	0,00	2,18	3,08	2,66	0,00
$V_s \max$	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03
$V_v \min$	0,00	1,08	1,53	1,88	0,00
$V_v \max$	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02

Таблиця 3. Абсолютне прискорення фракцій насінин у радіальній площині, м/с²**Table 3.** Absolute acceleration of seed fractions in the radial plane, m/s²

Показ- ник	Кут повороту розподільника								
	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°	360°
$a_s \min$	0,00	0,9690	1,3703	1,6783	1,9379	1,6783	1,3703	0,9690	0,00
$a_s \max$	0,00	0,0077	0,0108	0,0133	0,0153	0,0133	0,0108	0,0077	0,00
$a_v \min$	0,00	0,6830	0,9660	1,1830	1,3661	1,1830	0,9660	0,6830	0,00
$a_v \max$	0,00	0,0061	0,0086	0,0105	0,0121	0,0105	0,0086	0,0061	0,00

Таблиця 4. Залежності змушувальної сили автоколивального руху від кута повороту центральної труби, Н**Table 4.** Dependences on the force of self-oscillating motion from the angle of rotation of the central tube, N

Показ- ник	Кут повороту розподільника								
	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°	360°
$F_s \min$	0,00	33,3333	47,1405	57,7350	66,6667	57,7350	47,1405	33,3333	0,00
$F_s \max$	0,00	0,4167	0,5893	0,7217	0,8333	0,7217	0,5893	0,4167	0,00
$F_v \min$	0,00	16,6667	23,5702	28,8675	33,3333	28,8675	23,5702	16,6667	0,00
$F_v \max$	0,00	0,2083	0,2946	0,3608	0,4167	0,3608	0,2946	0,2083	0,00

Таблиця 5. Залежності крутного змушувального моменту автоколивального руху від кута повороту центральної труби, Н·м**Table 5.** Dependence of the torque moment of self-oscillating motion on the angle of rotation of the central tube, N·m

Показник	Кут повороту розподільника								
	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°	360°
$M_{кр.s \min}$	0,00	1355,29	1916,67	2347,43	2710,58	2347,43	1916,67	1355,29	0,00
$M_{кр.s \max}$	0,00	16,94	23,96	29,34	33,88	29,34	23,96	16,94	0,00
$M_{кр.v \min}$	0,00	677,64	958,33	1173,71	1355,29	1173,71	958,33	677,64	0,00
$M_{кр.v \max}$	0,00	8,47	11,98	14,67	16,94	14,67	11,98	8,47	0,00

Висновки. 1. Моделювання процесу сепарування у центральній частині розподільника віброаспіраційного сепаратора виявило: розщеплення траєкторій середньої та важкої фракції насіння у межах 20...40 %; швидкості витання частинок складають відповідно 3,2...4,8 м/с та їх прискорення 1,8...3,8 м/с², що створює необхідні умови для чіткого та якісного розділення необхідних фракцій, а також за необхідності – для їх збільшення.

2. Отримані різниці кінематичних характеристик для розділюваних фракцій дозволили обґрунтувати конструктивні параметри приймальних патрубків віброаспіраційного сепаратора: діаметр матеріалопроводу для середньої фракції рекомендовано в межах 50...70 мм, а для важкої – 90...110 мм.

3. Означені результати досягнуто за рахунок створення автоколивального режиму руху центральної труби вертикального розподільника, що забезпечує значення змушувальної сили 68...100 Н та крутного змушувального моменту 2700...4100 Нм. Це вимагає незначних додаткових енерговитрат (до 9,1...11,5 Вт) і достатньо простої конструктивної модифікації віброаспіраційного сепаратора.

Бібліографічний список

1. Абдуев М. М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків, 2007. 21 с.
2. Адамчук В. В. Механіко-технологічні і технічні основи підвищення ефективності внесення твердих мінеральних добрив та хіммеліорантів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.06.06. Київ, 2006. 40 с.
3. Аеродинамічний сепаратор для насіння: пат. 86300 Україна. № 86300; заявл. 21.06.2013; опубл. 25.12.2013, Бюл. № 24. С. 4.
4. Аеродинамічний сепаратор для насіння: пат. 102657 Україна. № 102657; заявл. 19.05.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. С. 4.
5. Богданов Є. В., Кюрчев С. В. Теоретичне дослідження явища резонансу дебалансного вібраційного дозатора сипких матеріалів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2010. Вип. 10, т. 6. С. 65–69.
6. Бурдо О. Г., Калинин Л. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах. Одесса, 2008. 348 с.
7. Василенко П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УСХА, 1960. 263 с.
8. Гладков Н. Г. Зерноочистительные машины. Конструкция, расчет, проектирование и эксплуатация. Москва: Машгиз, 1961. 368 с.
9. Горячкин В. П. Собрание починений. Москва, 1965. Т. 3. 384 с.
10. Завгородний А. И., Синяева О. В. Движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями. *Вибрації в техніці та технологіях*. 2012. № 3(67). С. 20–27.
11. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Зернозбиральні машини. Харків, 2004. Т. 2, ч. 2, кн. 2. 404 с.
12. Котов В. В. Определение скорости движения зерна в воздушном потоке. *Технологии и средства механизации полеводства*. Зерноград, 2002. С. 137–140.
13. Кюрчев С. В. Методика дослідження впливу вологості насіння соняшника на раціональну швидкість повітряного потоку в пневмогравітаційному сепараторі. *Техніка та енергетика*. Київ, 2018. Т. 9, № 2. С. 139–141.
14. Кюрчев С. В., Колодій А. С. Методика исследования рациональной величины скорости воздушного потока в аспирационном канале. *Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК*: сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XX международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2013» (20–22 марта 2013 г., г. Ставрополь). Ставрополь, 2013. С. 36–38.
15. Кюрчев С. В., Колодій А. С. Результаты исследования разработанного сепаратора семени с вертикальным аспирационным каналом. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2014. Vol. 16, № 2. P. 322–329.
16. Кюрчев С. В., Колодій О. С. Аналіз методів збільшення врожайності сільськогосподарських культур та вимоги до сепаруемого матеріалу. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. Серія: Технічні науки. Вінниця, 2012. Вип. 11 (2). С. 322–327.
17. Кюрчев С. В., Колодій О. С. Багатокритеріальний аналіз існуючих сепараторів насіння із різним робочим знаряддям. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. Серія: технічні науки. Харків, 2015. Вип. 156, т. 1. С. 86–92.
18. Кюрчев С. В., Колодій О. С. Методика дослідження раціонального діаметра патрубка постачання насіння в середині вертикального аспіраційного каналу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2013. Вип. 13, т. 3. С. 146–150.
19. Кюрчев С. В., Колодій О. С. Результаты дослідження раціональних розмірів вертикального аспіраційного каналу сепаратора насіння сільськогосподарських культур. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. Серія: технічні науки. Харків, 2014. Вип. 148. С. 56–63.
20. Обладнання складів. Зберігання зерна і зернопродуктів: навч. посіб. / В. Ф. Ялпачик та ін. Мелітополь: Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2018. 293 с.
21. Пневмогравітаційний сепаратор для насіння: пат. 119052 Україна. № 119052; заявл. 20.03.2017; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 17. С. 4.

22. Технологічні властивості сировини: навч. посібник / О. П. Прісс, С. В. Кюрчев, В. Ф. Жукова, Н. А. Гапрідашвілі. Мелітополь, Херсон, 2014. 224 с.

23. Тищенко Л. Н., Пивень М. В. Исследование внутрислоевого движения частиц зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании. *Вибрационные машины и технологии: Сборник научных трудов Курского государственного технического университета*. Курск, 2003. С. 150–156.

24. Тищенко Л. Н., Пивень М. В. К исследованию динамики зернового потока на наклонном решете. *Підвищення надійності відновлюємих деталей*

машин. Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. Харків, 2001. Вип. 8, т. 1. С. 198–205.

25. Тищенко Л. Н. К нелинейной двухпоточковой теории виброцентробежной сепарации зерновых смесей. *Вибрации в технике и технологиях*. 2003. № 6(32). С. 13–17.

26. Scientific achievements in environmental and life science Polish Ukrainian cooperation. Scientific monograph: collective monograph / L. Zbaravska, O. Chaikovska, O. Ovcharuk, S. Kiurchev. Kraków, 2018. Vol. 2. 141 p.

Паламарчук І., Кюрчев С., Верхоланцева В., Колодій О.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОАСПІРАЦІЙНОГО СЕПАРУВАННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ

У розробленій системі для фракціонування насіння соняшнику створюється автоколивальний рух за рахунок двох груп сил, що опозитно діють на центральну трубу сепаратора: змушувальних силових факторів та опорів, які виникають при розтяганні та стисканні пружних елементів. Як результат такої взаємодії збільшується рушійна сила процесу розділення внаслідок збільшення відцентрової сили при виникненні крутіння центральної труби розподільника, а також поліпшуються умови розщеплення потоку насіння на фракції.

Розроблена конструкція відзначається простотою виконання та мінімальними витратами на модернізацію. Як показали теоретичні дослідження, усі основні кінематичні та енергетичні характеристики динаміки руху часток окремих фракцій дають чітке розщеплення за числовими значеннями, що створює потенційну можливість підвищення якості процесу фракціонування та відповідно поліпшення схожості насіння й урожайності соняшнику.

За результатами математичного моделювання розщеплення траєкторій середньої та важкої фракцій виявилось у межах 20...40 %, що дозволило обґрунтувати конструктивні параметри приймальних бункерів для важкої та середньої фракцій.

Результати моделювання були отримані за рахунок математичного аналізу складених залежностей для траєкторії окремих часток насіння, швидкості їх витання у повітряному потоці, активних та реактивних сил, що діють у системі, та енергетичних показників, які були інтерпретовані в аналітичній та графічній формах.

Ключові слова: фракціонування, насіннєвий матеріал, фракція, центральна труба, автоколивальний рух, швидкість витання, змушувальні сили.

Palamarchuk I., Kiurchev S., Verkholtantseva V., Kolodii O.

MATHEMATICAL MODELING OF VYROASPIRATION SEPARATION OF SEED MATERIAL

In the developed system for the fractionation of sunflower seeds, self-oscillating motion is created at the expense of two groups of forces acting optically on the central separator pipe: the force-inducing forces and resistances that arise during the stretching and compression of the elastic elements. As a result of such interaction, the driving force of the separation process increases as a result of increasing the value of the centrifugal force in the event of the torsion of the central tube of the distributor; the conditions for splitting the seed flow into the fraction are improved.

The designed design is marked by the ease of execution and the minimal cost of upgrading. As theoretical studies have shown, all the main kinematic and energy characteristics of the dynamics of the particles of individual fractions give a clear split in numerical quantities, which creates a potential opportunity to improve the quality of the fractionation process and, accordingly, improve the similarity of the seeds and yield of sunflower.

According to the results of mathematical modeling, the splitting of trajectories of medium and heavy fractions was found to be within the range of 20...40%, which allowed to substantiate the design parameters of receiving bunkers for heavy and average fractions.

The results of mathematical modeling were obtained by mathematical analysis of the composite dependences for the trajectory of individual seeds particles, their velocity in the air flow, active and reactive forces operating in the system and energy indices, which were interpreted in analytical and graphical terms.

Key words: fractionation, seed material, fraction, central tube, autoclaving motion, acceleration velocity, force forces.