

Synthesis of load schemes of power elements of a ball-screw hydraulic power steering with an axial drive structure

The well-known design of ball-screw hydraulic power steering is not without flaws - the bearing supports of the output shaft are the most loaded elements of the unit structure, and the elastic deformation of these supports, during operation, is the reason for the depressurization of the sealing system in this area. The purpose of the work is to determine the layout of ball-screw hydraulic power steering with a steering arm, using which it is possible to ensure the maximum beneficial effect from the use of a system of active unloading of the rolling bearings of the shaft sector, increasing the load-bearing capacity and ensuring better tightness.

The study is based on the provisions of the theory of resistance of materials. The paper examines and compares the two most common configurations for the location of the steering arm's longitudinal axis relative to the cavity of the gear shaft: coaxial and perpendicular location. To achieve the goal, an analysis of the interaction system of the output shaft of the ball-screw hydraulic power steering with rolling bearings, steering arm, and rack and pinion transmission was carried out for the given two configurations. The operating conditions of the output shaft, under its load, and the reactions of the supports are described by systems of equations. For the purpose of comparative evaluation of the ratio of the reactions of the supports depending on the load and taking into account the real linear dimensions of the parts, a methodology and a number of assumptions have been developed in the work. With the help of the developed methodology, a relative comparison of the layout configurations studied in the work was carried out, taking into account the direction of rotation of the output shaft of the ball-screw hydraulic power steering with the steering arm installed.

As a result of the study, the composition of the ball-screw hydraulic power steering with steering arm was determined, which allows to ensure the maximum beneficial effect of the use of the system of active unloading of the rolling bearings of the shaft sector. The use of the steering arm installation scheme, in which the longitudinal axis of the arm is located coaxially relative to the cavity of the gear shaft, creates prerequisites for the development, in the future, of an active system for unloading the rolling bearings at the points of the bearing reactions. Such a system can be implemented, for example, due to the use of hydraulics elements, thereby ensuring an increase in bearing capacity, reducing the load on the output shaft rolling support elements and reducing the impact of this load on the tightness of the unit.

steering wheel, power steering, load, motor vehicle

Одержано (Received) 11.04.2024

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2024

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2024

УДК 631.362.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.31-40](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.31-40)

О.В. Нестеренко, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук, **Р.В. Кісільов**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: nov_78@ukr.net

Аналіз одношарового руху зернового матеріалу у вертикальному пневмосепараційному каналі

Однією з важливих передумов якісного процесу пневмосепарації зернового матеріалу є створення рівнозначних умов розділення для всіх часток зернової суміші. Підвищення питомого навантаження призводить до погіршення розподілу зернового матеріалу та збільшення кількості зіштовхувань часток в зоні сепарації, що суттєво погіршує якість розділення.

Враховуючи аналіз аналітичних досліджень способів та умов введення зерна в робочу зону пневмосепарації на ефективність фракційного розділення є необхідність визначення закономірності взаємодії частинок фракції зернового матеріалу з повітряним потоком при умові його тонкошарової подачі.

© О.В. Нестеренко, О.М. Васильковський, Р.В. Кісільов, В.М. Сало 2024

В статті проаналізовано рух різних фракцій зернової суміші в вертикальному пневмосепараційному каналі при їх одношаровому введенні з урахуванням засміченості повітряного потоку. В результаті аналізу отримані теоретичні залежності, що дозволяють встановити раціональні конструктивні параметри живильників пневмосепараційного каналу та визначити час перебування зернової частки в зоні дії повітряного потоку.

пневмосепарація, зерновий матеріал, пневмосепараційний канал, умови введення зернового матеріалу, робоча зона сепарації

Постановка проблеми. Розділення зерна та легких домішок в вертикальному пневмосепараційному каналі при збільшенні його продуктивності відбувається за досить складних умов, оскільки збільшується товщина зернового струменя, що призводить до перерозподілу часток зернового матеріалу та зменшує ймовірність виділення легких домішок в осадову камеру [1-3]. Це призводить до перерозподілу швидкостей повітряного потоку, збільшує кількість зіткнень зернових часток та підвищує опір пневмосепараційного каналу й енергоємність процесу розділення [4-6].

Однією з причин такого перерозподілу є конструктивне виконання більшості вертикальних пневмосепараційних каналів, які як правило komponуються з плоскими коливальними решетами та мають досить обмежену продуктивність при дотриманні вимог по якості очищення [1, 2, 5].

Для підвищення продуктивності вертикальних пневмосепараційних каналів є необхідним створення умов одношарового розміщення зернового матеріалу в зоні сепарації на відстані, яка виключає взаємодію інших шарів введення зерна. Це дасть можливість більшості зернових часток перебувати в однакових умовах та збільшити відсоток вірогідності виділення в осадову камеру до максимального значення.

Тому досить важливою задачею є теоретичний аналіз руху спрямований на дослідження взаємодії частинок зернової суміші з повітряним потоком з урахуванням одношарового розміщення декількох зернових шарів з урахуванням засміченості повітряного потоку легкими домішками в зоні сепарації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика дослідження закономірностей взаємодії зернового матеріалу з повітряним потоком залишається не повністю вивченою, оскільки швидкоплинність зміни процесів руху частинок зернової суміші є взаємозалежним від великої кількості факторів, що виникають в процесі пневмосепарації [3, 4, 7].

Аналітичними дослідженнями процесу взаємодії зерна з повітряним потоком займались багато вчених [5-11], але при цьому суттєвий вплив має саме початкові умови потрапляння зернової суміші в робочу зону сепарації, які значно змінюють розташування та взаємодію всіх частинок зернових фракцій в повітряному потоці.

За результатами досліджень визначено [3, 4, 6], що в значній частині робочої зони пневмосепараційного каналу розділення зерна відбувається неефективно. Причиною цього є нерівномірне завантаження зернового матеріалу, в результаті якого спостерігається перерозподіл швидкостей повітряного потоку, збільшення значної кількості застійних зон, що призводить до суттєвого зменшення ефективності сепарації [4, 7, 13].

В роботі [10] автором визначено ефективність пневмоканалу в залежності від зміни ширини пневмосепаратора та аеродинамічних властивостей зернового матеріалу, на основі чого отримані математичні моделі динаміки компонентів сумішей для овочевих культур.

Питання розподілу компонентів зернової суміші у нижній зоні вертикального кільцевого пневмосепараційного каналу розглянуто в роботі [11] та доведено можливість фракціонування з нижнім сходом зернових часток.

Аналітичні залежності зміни швидкості частинок суміші рушанки рицини в повітряному потоці в робочій зоні сепаратора із пиловловлюючим пристроєм визначено в роботі [12]. Автором отримані закономірності руху компонентів суміші рушанки рицини в залежності від їх переміщення в робочій зоні сепарації та ефективності очищення повітряного потоку.

За результатами теоретичного аналізу авторами [13] обґрунтовано найбільш раціональну щільність зернових часток при завантаженні зернового матеріалу в зону сепарації та отримано умови за яких застосовується максимально можливе питоме навантаження без зменшення ефективності пневмосепарації.

Необхідність зменшення щільності зернового матеріалу в повітряному потоці та доведення цього значення до відповідних меж з метою покращення взаємодії та збільшенні площі контакту з повітрям доводиться авторами в роботах [14, 15], що має вагоме значення при підвищенні зернового навантаження на пневмосепараційний канал.

Незважаючи на значну кількість наукових праць в напрямку забезпечення сприятливих умов (аналогічних для кожної частки) при розділенні зернової суміші на фракції, можливості подальшого вдосконалення пневмосепараційних систем зерноочисних машин повністю не вичерпані. Тому теоретичні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності роботи вертикальних пневмосепараційних каналів з метою обґрунтування раціональних конструктивно-режимних параметрів є важливою і актуальною задачею.

Постановка завдання. Враховуючи необхідність обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вертикальних пневмосепараційних каналів та їх живильних пристроїв які здатні формувати багаторівневе одношарове введення зернового матеріалу необхідно провести теоретичний аналіз взаємодії зернової суміші з повітряним потоком в зоні сепарації з урахуванням засміченості.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо одношаровий рух зернового матеріалу в вертикальному пневмосепараційному каналі.

При аналізі об'єкта досліджень визначаємо наступні умови:

- окремо взяті шари зернової суміші в робочій зоні каналу не перемішуються;
- зернова частка та легка домішка мають форму кулі і є близькими за розмірами;
- маса окремої зернини більша в багато разів маси легкої домішки;
- зерно та легкі домішки рівномірно розташовані в кожному шарі.

Застосуємо Декартову систему координат OXY (рис. 1), у якій вісь OY буде направлена в напрямку руху повітряного потоку, а вісь OX таким чином, що система координат OXY буде розташована праворуч.

Швидкість повітря V_n вибираємо таким чином, щоб при проходженні через вертикальний пневмосепараційний канал (рис. 1, а):

– основний зерновий матеріал практично не відхилявся від основної траєкторії, що має місце при відсутності повітряного потоку, тобто швидкість повітря V_n менша за швидкість витання зерна $V_{в.з.}$;

– легкі домішки суттєво відхиляються від траєкторії, яка має місце при відсутності повітряного потоку, відповідно, швидкість повітря є більшою за швидкість витання домішок $V_{в.д.}$.

При цьому, швидкість повітряного потоку повинна задовольняти умову:

$$V_{в.д.} < V_n < V_{в.з.} \quad (1)$$

За умови прийнятих припущеннях буде спостерігатись чітке розділення зернової суміші, зерно та легкі домішки будуть рухатись в протилежному напрямку, при цьому

їх взаємодія майже виключена. При завантаженні в пневмосепараційний канал зерно практично не буде відхилятися від своєї траєкторії, а легкі домішки підніматимуться вгору.

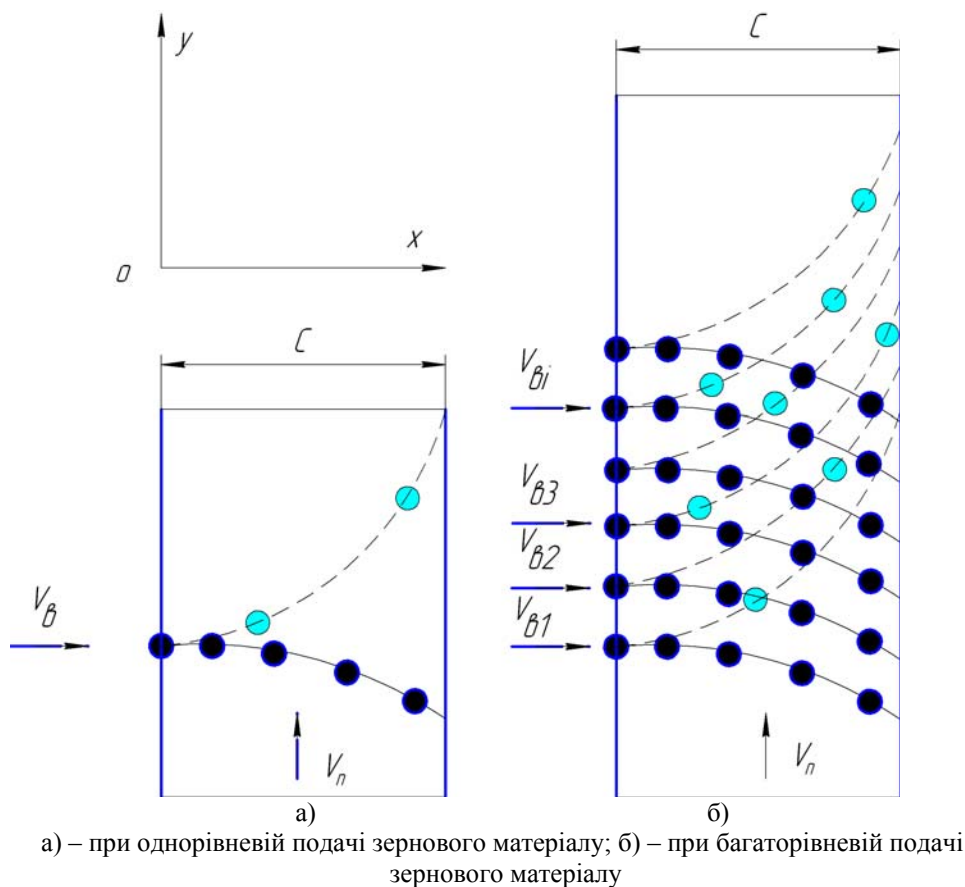


Рисунок 1 – Схема руху основного зерна та легких домішок

Джерело: розроблено авторами

Опишемо рух основного зерна та легких домішок при їх розділенні в пневмосепараційному каналі з одношаровим введенням зернового матеріалу.

При завантаженні зернової частки в повітряний потік на неї будуть діяти: сила ваги $P = m_3 g$ (m_3 – маса усередненої частки, g – прискорення земного тяжіння), сила інерції $m_3 a$ (a – прискорення усередненої зернової частки) та сила опору повітря $F_{on.3}$:

$$m_3 a + P + F_{on.3} = 0, \quad (2)$$

Швидкість повітряного потоку V_n має досить великі значення ($V_n = 8 > 2$ м/с), тому сила опору повітряного потоку $F_{on.3}$ пропорційна квадрату відносної швидкості частки [3] та направлена протилежно її швидкості руху:

$$F_{on.3} = -|V|V m_3 k_3, \quad (3)$$

де $V = (\dot{x}, \dot{y} - V_n)$ – вектор швидкості руху зерна відносно повітряного потоку; k_3 – коефіцієнт парусності зерна з урахуванням засміченості потоку.

$$k_3 = k_3' \cdot k_{e.d.}, \quad (4)$$

де k'_3 – коефіцієнт парусності зерна;

$k_{e.o.}$ – коефіцієнт, який враховує вплив домішок на опір переміщення в засміченому потоці, $k_{e.o.} = 1,03 \dots 1,05$.

В проекціях на осі системи OXY рівняння (3) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} \dot{x} k_3; \\ \ddot{y} = -g + \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} (\dot{y} - V_n) k_3. \end{cases} \quad (5)$$

Горизонтальна та вертикальна складові швидкості зернової частки змінюються в межах, відповідно, $0,5 \dots 0,7$ м/с і $0,1 \dots 0,2$ м/с. Вони є набагато менші за швидкість повітряного потоку, тому:

$$|V| = \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} \approx |V_n - \dot{y}| \approx V_n, \quad (6)$$

і з урахуванням цього рівняння (5) приймуть вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -V_n \dot{x} k_3; \\ \ddot{y} = k_3 (V_n^2 - V_{e.o.}^2). \end{cases} \quad (7)$$

де $V_{e.o.} = \sqrt{\frac{g}{k_3}}$ – швидкість витання зернової частки.

Рівняння системи (7) є незалежними. Понижуємо порядок рівнянь та замінюємо $\dot{x} = u$, $\dot{y} = v$:

$$\begin{cases} \dot{u} = -V_n u k_3; \\ \dot{v} = k_3 (V_n^2 - V_{e.o.}^2). \end{cases}$$

розділюємо змінні:

$$\begin{cases} \frac{du}{u} = -V_n k_3 dt; \\ dv = k_3 (V_n^2 - V_{e.o.}^2) dt, \end{cases}$$

проінтегруємо

$$\begin{cases} \ln|u| = -V_n k_3 t + \ln C_1; \\ v = k_3 (V_n^2 - V_{e.o.}^2) t + C_2, \end{cases}$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування.

Виконуємо зворотні заміни

$$\begin{cases} \dot{x} = C_1 e^{-V_n k_3 t}; \\ \dot{y} = k_3 (V_n^2 - V_{e.o.}^2) t + C_2. \end{cases} \quad (8)$$

Проінтегрувавши систему рівнянь (8), отримаємо

$$\begin{cases} x = \frac{C_1}{-V_n k_3} e^{-V_n k_3 t} + C_3; \\ y = k_3 (V_n^2 - V_{e.з.}^2) \frac{t}{2} + C_2 t + C_4, \end{cases} \quad (9)$$

де C_3, C_4 - постійні інтегрування.

Постійні інтегрування C_1, C_2, C_3, C_4 знаходимо з граничних умов

$$x(0) = 0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0, y(0) = 0, \dot{y}(0) = \dot{y}_0. \quad (10)$$

З рівнянь(8)–(10) отримаємо:

$$C_1 = \dot{x}_0, C_2 = \dot{y}_0, C_3 = \frac{\dot{x}_0}{V_n k_3}, C_4 = 0. \quad (11)$$

Підставивши рівняння (11) в (9), отримаємо:

$$\begin{cases} x = \frac{\dot{x}_0}{V_n k_3} (1 - e^{-V_n k_3 t}), \\ y = k_3 (V_n^2 - V_{e.з.}^2) \frac{t}{2} + \dot{y}_0 t. \end{cases} \quad (12)$$

Перше рівняння дозволяє визначити час t , за який зернова частка проходить відстань від передньої стінки пневмосепаруючого каналу до задньої стінки, тобто час, який частка знаходиться в каналі. При цьому, якщо глибина каналу L , то час t буде розв'язком цього рівняння

$$C = \frac{\dot{x}_0}{V_n k_3} (1 - e^{-V_n k_3 t}). \quad (13)$$

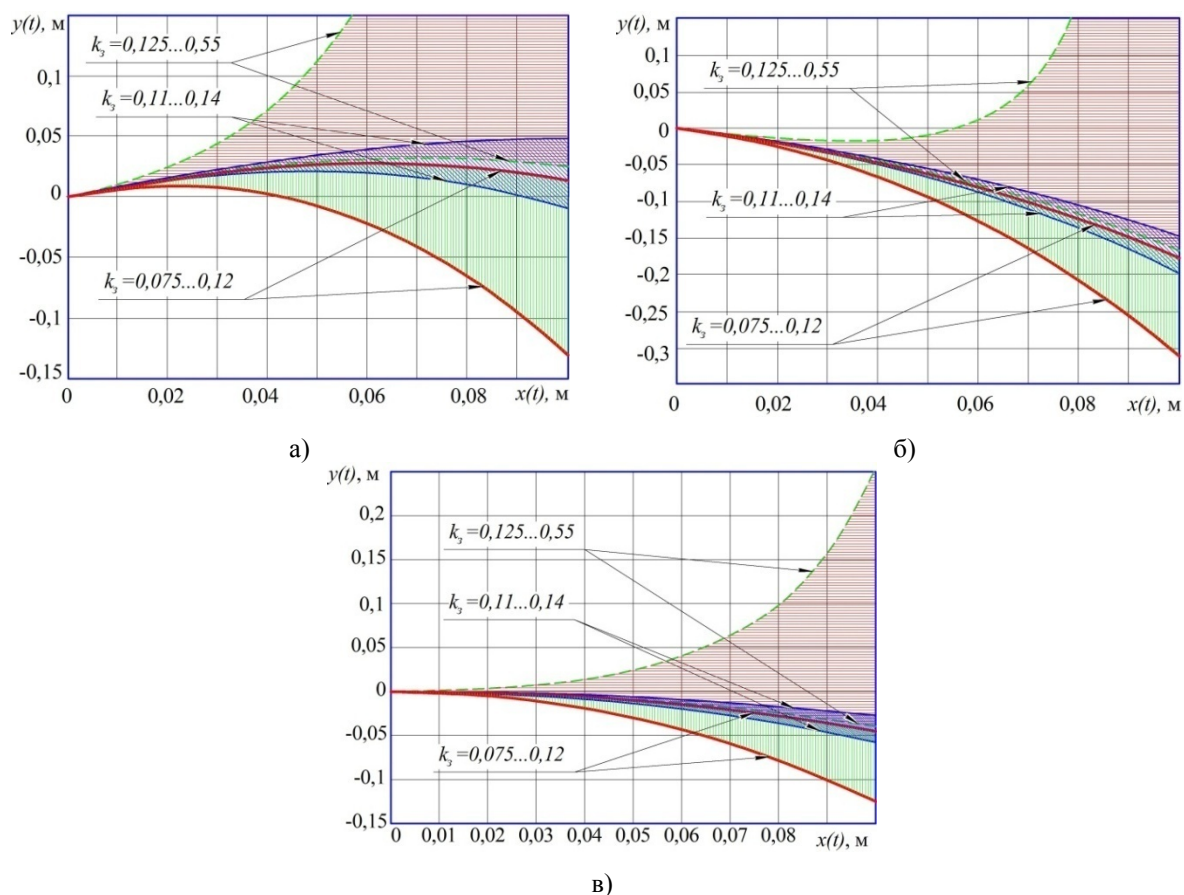
З рівняння (13) визначаємо час перебування частки в пневмосепаруючому каналі:

$$t = -\frac{1}{V_n k_3} \ln \left(1 - \frac{C V_n k_3}{\dot{x}_0} \right). \quad (14)$$

Графічна інтерпретація (рис. 2) отриманих залежностей (12) – (14) дозволяє визначити можливість і умови розділення зернової суміші на фракції.

На основі графічних залежностей (рис. 2) можна зробити наступні висновки.

Для зернового матеріалу, що характеризується показниками коефіцієнта парусності $k_3 = 0,075 \dots 0,12$ – для повноцінного зерна, $k_3 = 0,11 \dots 0,14$ – для некондиційного зерна та $k_3 = 0,125 \dots 0,55$ для легких домішок, спостерігається можливість чіткого розділення зернової суміші на фракції, при відповідних параметрах та режимах роботи пневмосепаруючого каналу за умови одношарового введення.



- а) – кут подачі зерна в канал 40° в напрямку дії вектора швидкості повітряного потоку;
 б) – кут подачі в канал 40° в протилежну сторону напрямку дії вектора швидкості повітряного потоку;
 в) – кут подачі в канал 0° в сторону дії вектора швидкості повітряного потоку

Рисунок 2 – Траєкторії польоту та розподіл по фракціях зернового матеріалу за умов: швидкість введення в канал $\dot{x}_0=0,5$ м/с, швидкість повітряного потоку $V_n=7,5$ м/с

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що при подачі зернового матеріалу під кутом 40° в сторону напрямку дії вектора швидкості повітряного потоку (рис. 1, а), на глибині каналу $L=40$ мм спостерігається повне розділення на фракції легких домішок та повноцінного зерна. При цьому, встановивши в пневмосепараційному каналі швидкість повітряного потоку $V_n=7,5$ м/с, на глибині $L=100$ мм маємо можливість виділення до 96% легких домішок в осадову камеру. Але при цьому будуть втрати повноцінного зерна у відходи.

При введенні зернового матеріалу під кутом 40° в протилежну сторону напрямку дії вектора швидкості повітряного потоку або горизонтально (рис. 2, б, в) втрат повноцінного зерна практично не спостерігається (для $V_n=7,5$ м/с), але при цьому кількість легких домішок, що виділені в осадову камеру не перевищує 30% – 60%. При цьому, для покращення якості сепарації необхідно збільшення енерговитрат на створення повітряного потоку та габаритів пневмосепаруючого каналу.

Висновки. З метою покращення ефективності використання пневмосепараційних каналів зерноочисних машин проведений теоретичний аналіз взаємодії зернового матеріалу з повітряним потоком при одношаровому розташуванні зернового матеріалу в зоні сепарації з урахуванням засміченості повітряного потоку.

За результатами досліджень встановлено, що на процес переміщення зернових часток в повітряному каналі значний вплив здійснюють умови введення в зону сепарації.

Відповідно, при обґрунтуванні раціональних параметрів живильників пневмосепараційних каналів для одношарового введення матеріалу в зону сепарації й встановлення відповідних аеродинамічних режимів повітряного потоку можливо виділити з зернового матеріалу до 96% легких домішок з мінімальними втратами повноцінного зерна.

Список літератури

1. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / Нестеренко О.В. та ін. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25, ч.1. С.49–53.
2. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів / Котов Б.І. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2003. Вип. 33. С. 53-59.
3. Stepanenko S., Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O. Experimental study in a pneumatic microbiculture separator with apparatus camera. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2019. Vol. 12 (61), No. 1 . pp. 117-128.
4. Аналітичні дослідження контактного руху легких домішок у пневмосепаруючому каналі / Нестеренко О.В. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47(2). С. 185-191.
5. Panasiewicz M., Zawiślak K., Kusińska E., Sobczak P. Purification and separation of loose material in pneumatic system with vertical air stream. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.* 2008. Vol. 8. Pp.171-176.
6. Дослідження роботи пневмосепаруючого каналу на фізичній моделі / Васильковський М.І. та ін. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2006. Вип.17. С. 44–48.
7. Котов Б.І., Степаненко С. П. Теоретичні дослідження руху компонентів зернового матеріалу із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2021. Вип. 51. С. 20-35.
8. Lukaszuk J., Molenda M., Horabik J., Szot B., Montross M.D. Air flow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*. 2008 Vol.54. Pp. 50-57.
9. Panasiewicz M. Analysis of the pneumatic separation process of agricultural material. *International Agrophysis*. 1999. Vol.13. No. 2. Pp. 233-239.
10. Крекот М. М. Обґрунтування параметрів процесу і розробка пневматичного сепаратора насіння овочевих культур: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Харків, 2015. 20 с.
11. Колодій О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2015. 24 с.
12. Чебанов А. Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмосепаратора рушанки рицини з пиловловлюючим пристроєм : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2013. 21 с.
13. Котов Б.І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Аналітичні дослідження раціональної подачі зернової суміші в аспіраційний канал пневмовідцентрових сепараторів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*. 2010 р. Вип. 103. С. 54-61.
14. Обґрунтування алгоритму функціонування інерційно-прямоточних зерноочисних машин / Лещенко С.М. та ін. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип.24, ч.1. С. 176-181.
15. Nesterenko, A.V., Leshchenko, S.M., Vasylovskiy, O.M., Petrenko, D.I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding, *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2017. No.53(3). Pp. 65-70.

References

1. Nesterenko, O.V. et al. (2012). Perspektivnyj napriamok intensyfikatsii povitrianoi separatsii zerna [Perspective direction of intensification of air separation of grain]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu*

- vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia - Collection of scientific papers of the Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, 25, 1, 49-53 [in Ukrainian].*
2. Kotov, B.I. et al. (2003). Tendentsii rozvytku konstruksij mashyn ta obladnannia dlia ochyschennia i sortuvannia zerno materialiv [Tendencies of development of designs of machines and equipment for cleaning and sorting of grain materials]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn - Design, production and operation of agricultural machinery, 33, 53-59 [in Ukrainian].*
 3. Stepanenko, S., Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V. & Trokhaniak, O. (2019). Experimental study in a pneumatic microbioculture separator with apparatus camera. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Vol. 12 (61), No. 1. Pp. 117-128.*
 4. Nesterenko, O.V. et al. (2017). Analitychni doslidzhennia kontaktnoho rukhu lehkikh domishok u pnevmoseparuiuchomu kanali [Analytical studies of the contact motion of light impurities in the pneumatic separation channel]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn - Design, production and operation of agricultural machine, 47(2), 185-191 [in Ukrainian].*
 5. Panasiewicz, M., Zawiślak, K., Kusińska, E. & Sobczak, P. (2008), Purification and separation of loose material in pneumatic system with vertical air stream. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln., Vol.8. Pp.171-176.*
 6. Vasylykivs'kyj, M.I. et al. (2006). Doslidzhennia roboty pnevmoseparuiuchoho kanalu na fizychnij modeli [Study of the pneumatic separating channel operation on a physical model]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia - Collection of scientific papers of the Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, 17, 44-48 [in Ukrainian].*
 7. Kotov, B.I. & Stepanenko, S.P. (2021). Teoretychni doslidzhennia rukhu komponentiv zernovoho materialu iz shtucho sformovanim rozpodilom shvydkosti povitria v poperechnomu peretyni kanalu [Theoretical studies of the flow of grain material components with an artificially formed distribution of air velocity in the cross-section of the channel]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn - Design, manufacture and operation of agricultural machinery, 51, 20-35 [in Ukrainian].*
 8. Lukaszuk, J., Molenda, M., Horabik, J., Szot, B. & Montross M.D. (2008). Air flow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering, Vol.54. Pp.50-57.*
 9. Panasiewicz, M. (1999). Analysis of the pneumatic separation process of agricultural material. *International Agrophysis. Vol.13. No. 2. Pp. 233-239.*
 10. Krekot, M.M. (2015). Obgruntuvannia parametriv protsesu i rozrobka pnevmatichnoho separatora nasinnia ovochevykh kul'tur [Substantiation of process parameters and development of a pneumatic separator for vegetable seeds]. *Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].*
 11. Kolodij, O.S. (2015). Obgruntuvannia konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv pnevmohravitatsijnogo separatora nasinnia soniashnyka [Substantiation of structural and technological parameters of the pneumatic gravity separator of sunflower seeds]. *Extended abstract of candidate's thesis. Melitopol' [in Ukrainian].*
 12. Chebanov, A.B. (2013). Obgruntuvannia konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv pnevmoseparatora rushanky rytsyny z pylovlovliuiuchym prystroiem [Substantiation of constructive and technological parameters of the pneumatic separator of castor oilseed rape with a dust collecting device]. *Extended abstract of candidate's thesis. Melitopol' [in Ukrainian].*
 13. Kotov, B.I., Stepanenko, S.P. & Shvydia, V.O. (2010). Analitychni doslidzhennia ratsional'noi podachi zernovoi sumishi v aspiratsijnyj kanal pnevmovidtsentrovnykh separatoriv [Analytical studies of the rational supply of grain mixture to the aspiration channel of pneumatic centrifugal separators]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P.Vasylenka - Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko, 103, 54-61 [in Ukrainian].*
 14. Leschenko, S.M. et al. (2011). Obgruntuvannia alhorytmu funktsionuvannia inertsijno-priamotochnykh zernoochysnykh mashyn [Substantiation of the algorithm of functioning of inertial-straight grain cleaning machines]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia - Collection of scientific papers of the Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, 24,1, 176-181 [in Ukrainian].*
 15. Nesterenko, A.V., Leshchenko, S.M., Vasylykovskiy, O.M. & Petrenko, D.I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding, *INMATEH - Agricultural Engineering. No.53(3). Pp. 65-70.*

Oleksandr Nesterenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasylykovskiy**, Prof., PhD tech. sci.,
Ruslan Kisilov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Salo**, Prof., DSc.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of single-layer movement of grain material in a vertical pneumatic separation channel

The separation of grain and light impurities in a vertical pneumatic separation channel with an increase in its capacity occurs under rather difficult conditions, since the thickness of the grain flow increases, which leads to a redistribution of particles of grain material and reduces the probability of passing light impurities through the grain layers and their release into the sedimentation chamber.

To increase the productivity of vertical pneumatic separation channels, it is necessary to create conditions for single-layer placement of grain material in the separation zone at a distance that excludes the interaction of other layers of grain input. This will allow the majority of grain particles to be in the same conditions and increase the percentage of probability of separation into the sedimentation chamber to the maximum value.

Therefore, a theoretical flow analysis aimed at studying the interaction of grain mixture particles with the air flow, taking into account the single-layer arrangement of several grain layers and the contamination of the air flow with light impurities in the separation zone, is a rather important task.

Theoretical dependences have been obtained that allow substantiating the main parameters of the pneumatic separation channel and determine the residence time of a grain particle in the separation zone, taking into account the clogging of the air flow. For a grain material of mass characterized by the values of the windage coefficient $k_s = 0.075...0.12$ for full grain, $k_s = 0.11...0.14$ for substandard grain, and $k_s = 0.125...0.55$ for light impurities, it is possible to clearly separate the grain mixture into fractions by setting the appropriate parameters and operating modes of the pneumatic separation channel under the condition of a single-layer multilevel input.

Due to the selection of rational parameters of the feeding devices for delivering the material into the separation zone and establishment of appropriate aerodynamic modes of air flow, it is possible to separate up to 96% of light impurities from the grain material, while ensuring minimal losses of full grain to waste.

pneumatic separation, grain material, pneumatic separation channel, grain input conditions, working zone of separation

Одержано (Received) 10.05.2024

Прорецензовано (Reviewed) 14.06.2024

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2024