УДК 631.362.3
О.В. Нестеренко, Д.І. Петренко, к.т.н., С.М. Лещенко, к.т.н., О.М. Васильковський, к.т.н., С.Я. Гончарова., к.ф-м.н.
Кіровоградський національний технічний університет

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЖИВИЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ БАГАТОРІВНЕВОГО ВВЕДЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ У ВЕРТИКАЛЬНИЙ ПНЕВМОСЕПАРУЮЧИЙ КАНАЛ

В статті приведене аналітичне обґрунтування параметрів направляючої поверхні багаторівневого живильного пристрою, яка складається з прямолінійної та дугоподібної ділянок. Результати досліджень дозволяють встановити раціональні режими роботи

запропонованого живильника з метою забезпечення оптимальних умов сепарації при багаторівневому введенні зернового матеріалу.

БАГАТОРІВНЕВИЙ ЖИВИЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ, ПНЕВМОСЕПАРАЦІЙНИЙ КАНАЛ, ВВЕДЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ, ПНЕВМОСЕПАРАЦІЯ.

Постановка проблеми. При сепарації зернового матеріалу у вертикальному пневмосепараційному каналі (ПСК) виникає негативне явище перерозподілу швидкостей повітряного потоку в робочій зоні ПСК, що значно зменшує повноту розділення зернової суміші та збільшує виніс повноцінного зерна у відходи [1, 2].

Одним з перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є зменшення опору зерновому матеріалу в місцях його введення та виведення за рахунок створення найбільш раціональних умов введення в ПСК [3], що дозволяє значно вирівняти поле швидкостей повітряного потоку та підвищити якісні показники сепарації [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями встановлено, що одним з факторів, які суттєво впливають на ефективність процесу сепарації, є швидкість введення зернової суміші до ПСК та її напрямок [1, 2].

Швидкість введення взаємопов’язана з багатьма факторами, основним з яких є величина питомого навантаження. Відповідно, за рахунок збільшення швидкості введення матеріалу можна суттєво підвищити продуктивність ПСК та зменшити його опір. Але з іншої сторони, при збільшенні швидкості введення погіршуються якісні показники сепарації, оскільки зменшується час його взаємодії з повітряним потоком [6].

Експериментальними дослідженнями встановлено, що введення зерна в ПСК горизонтально приводить до покращення ефекту очищення та зменшення втрат повноцінного зерна у відходи [7]. Тому, величина питомого навантаження та швидкість введення повинні бути раціональними для певних умов введення зернової суміші.

Вирішення проблеми підвищення продуктивності ПСК з дотриманням якісних показників сепарації згідно агротехнічних вимог, можливо за рахунок розділення вихідної товщини зернового матеріалу на декілька рівновеликих потоків при подачі до ПСК в різні робочі зони по його висоті [3-5]. Для цього нами запропонована конструкція багаторівневого живильного пристрою, яка повинна забезпечити однакові режими введення по всім направляючим поверхням. Відповідно, для створення найбільш оптимальних умов сепарації та досягнення ефективної роботи ПСК з використанням багаторівневого живильного пристрою є необхідним визначення закономірностей руху

зернової суміші по направляючих поверхнях живильника та його раціональних параметрів.

Мета дослідження – обґрунтувати параметри живильного пристрою для багаторівневого введення зернового матеріалу у вертикальний пневмосепаруючий канал

Результати дослідження. Рух зернового матеріалу в пневмосепараторі з живильним пристроєм для багаторівневого введення можна умовно поділити на декілька етапів (рис.1):

1. По прямолінійній поверхні направляючої гравітаційної кривої;
2. По дугоподібній поверхні направляючої гравітаційної кривої;
3. Від передньої до жалюзійної стінки в ПСК.

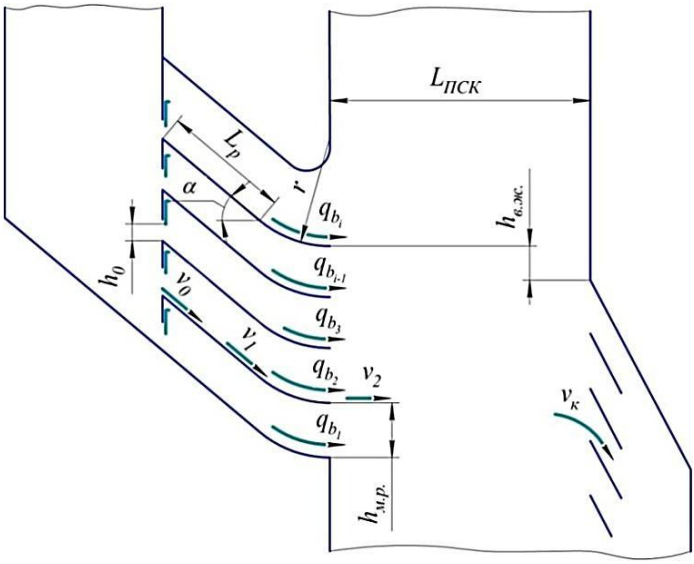


Рис. 1 – Схема до визначення основних параметрів живильного пристрою

Першим етапом руху зернового матеріалу після витікання з бункеру, при якому він має початкову швидкість v_0, є його рух по прямолінійній поверхні довжиною L_p під кутом α до горизонту (рис. 2, а). Відповідно, для означених умов необхідно забезпечити його швидкісний режим таким, щоб при введенні в ПСК товщина зернового

шару дорівнювала одному зерну. Забезпечення величини необхідної швидкості руху матеріалу відбувається за рахунок відповідних параметрів прямолінійної ділянки живильного лотка: кута нахилу до горизонту α та його довжини L_p, але при цьому кут α повинен бути більшим за кут тертя зернового матеріалу по поверхні $\alpha \geq \varphi_{TEP}$.

На дугоподібну ділянку з радіусом r та довжиною L_∂ зерновий матеріал потрапляє зі швидкістю v_1, після проходження якої він буде мати необхідну швидкість введення в ПСК v_2 та питоме навантаження q_{bi} (рис. 2, б).

Під час руху по прямолінійній похилій поверхні на частку зернового матеріалу діє сила ваги $G = mg$, нормальна сила реакції опори N та сила тертя $F = fN$.

Диференційне рівняння руху частки зернового матеріалу по похилій поверхні лотка запишемо у вигляді:

$$m\frac{dv_1}{dt} = mg\sin\alpha - fmg\cos\alpha, \qquad (1)$$

де $v_1 = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$ – швидкість руху частки на розгінній ділянці;

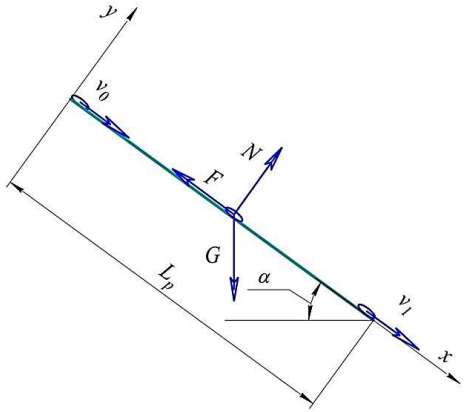
f – коефіцієнт тертя; m – маса частки.

Вирішивши останнє рівняння з врахуванням граничних умов $\dot{x} = v_1$ при $t = t_L$ та $x = 0$ при $t = 0$ знаходимо довжину розгінної ділянки:

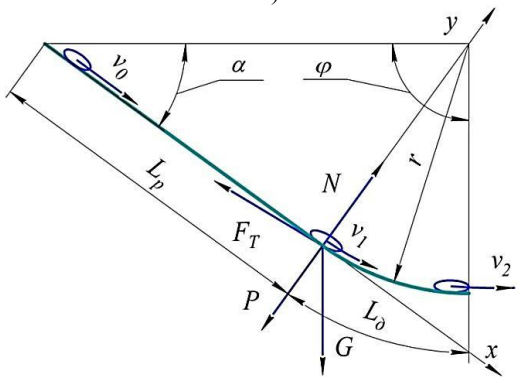
$$L_p = g\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right)\frac{(v_1 - v_0)^2}{2g^2(\sin\alpha - f\cos\alpha)^2} + v_0\frac{(v_1 - v_0)}{g(\sin\alpha - f\cos\alpha)}, \qquad (2)$$

або після спрощень отримаємо:

$$L_p = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2g(\sin\alpha - f\cos\alpha)}. \qquad (3)$$



а)



б)

Рис. 2 – Схема до визначення початкових умов руху частки по направляючій поверхні живильного пристрою

Звідки швидкість руху зернового матеріалу в кінці розгінної прямолінійної ділянки:

$$v_1 = \sqrt{2gL_p\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right)} + v_0 . \qquad (4)$$

Наступним етапом руху зернового матеріалу є його рух по дугоподібній поверхні направляючої живильного пристрою (рис. 2, б).

На початку руху по дузі з радіусом r зерновий матеріал має вхідну швидкість v_1, при цьому, на зернову частку на цій ділянці діють сила ваги $G = mg$, нормальна сила реакції опори, сила тертя по поверхні $F_T = fN$ та сила інерції $P = \frac{mv^2}{r}$.

Диференційне рівняння руху по криволінійній ділянці направляючої поверхні живильного пристрою запишемо у вигляді:

$$\frac{dv_2}{dt} = g(\cos\varphi - f\sin\varphi) - f\frac{v_2^2}{r}, \qquad (5)$$

де v_2 – швидкість руху частки на дугоподібній поверхні живильника;
φ – кут, що визначає положення частки на кривій радіусом r.

З метою вирішення рівняння (10) введемо наступні позначення:

$$v_2 = r\frac{d\varphi}{dt} = r\dot{\varphi}; \frac{dv_2}{dt} = r\ddot{\varphi}.$$

Отримаємо:

$$\frac{r\ddot{\varphi}}{g} + f\frac{r\dot{\varphi}^2}{g} = \cos\varphi - f\sin\varphi. \qquad (6)$$

В диференційному рівнянні (6) можна понизити порядок. Для цього перейдемо в ньому від змінної φ до показника кінематичного режиму k:

$$k = \frac{\dot{\varphi}^2 r}{g}; \frac{dk}{d} = \frac{dk}{dt}\frac{dt}{d} = 2\dot{\varphi}\ddot{\varphi}\frac{r}{g}\frac{1}{\dot{\varphi}} = 2\ddot{\varphi}\frac{r}{g}; \frac{r\ddot{\varphi}}{g} = \frac{\dot{k}}{2}. \qquad (7)$$

Тоді рівняння (6) прийме вигляд:

$$\dot{k} + 2fk = 2\left(\cos\varphi - f\sin\varphi\right). \qquad (8)$$

Рівняння (8) є лінійним диференційним рівнянням першого

порядку відносно функції k. Розв'яжемо його при граничній умові:

$$k = \frac{\varphi_0^2 r}{g} \text{ при } \varphi = \varphi_0 . \tag{9}$$

Розв'язок рівняння (8) представимо у вигляді:

$$k = u\nu , \tag{10}$$

де $u = u\left(\varphi\right), \nu = \nu(\varphi)$ – невідомі функції аргумента φ, тоді

$$\frac{dk}{d\varphi} = \nu \frac{du}{d\varphi} + u \frac{d\nu}{d\varphi} . \tag{11}$$

Підставивши залежності (16) і (15) в рівняння (13), отримаємо:

$$\nu \frac{du}{d\varphi} + u\left(\frac{d\nu}{d\varphi} + 2f\nu\right) = 2\left(\cos\varphi - f\sin\varphi\right). \tag{12}$$

Функцію ν знаходимо з умови рівності нулю виразу в дужках лівої частини рівняння (12):

$$\frac{d\nu}{d\varphi} + 2f\nu = 0 \text{ або } \nu = e^{(-2f\varphi)}. \tag{13}$$

Підставивши вираз (13) у рівняння (12), отримаємо:

$$\frac{du}{d\varphi} = 2\left(\cos\varphi - f\sin\varphi\right)e^{2f\varphi} . \tag{14}$$

Інтегрування останнього рівняння дає

$$u = 2\frac{3f\cos\varphi + (1 - 2f^2)\sin\varphi}{1 + 4f^2} e^{2f\varphi} + C_3 , \tag{15}$$

де C_3 – стала інтегрування.

Підставивши залежності (13) і (15) в рівняння (10) отримаємо:

$$k = 2\frac{3f\cos\varphi + (1 - 2f^2)\sin\varphi}{1 + 4f^2} + C_3 e^{-2f\varphi} . \tag{16}$$

Сталу C_3 знаходимо, виходячи з граничної умови (9). Маємо:

$$C_3 = \left(\frac{\varphi_0^2 r}{g} - 2\frac{3f\cos\varphi_0 + (1-2f^2)\sin\varphi_0}{1+4f^2} \right) e^{2f\varphi_0}. \qquad (17)$$

Підставивши (17) в (16) та враховуючи (7), маємо:

$$\frac{\dot{\varphi}^2 r}{g} = 2\frac{3f\cos\varphi + (1-2f^2)\sin\varphi}{1+4f^2} +$$

$$+\left(\frac{\dot{\varphi}_0^2 r}{g} - 2\frac{3f\cos\varphi_0 + (1-2f^2)\sin\varphi_0}{1+4f^2} \right) e^{-2f(\varphi-\varphi_0)}. \qquad (18)$$

Зробивши зворотну заміну з врахуванням залежностей (6), рівняння (18) набуде вигляду:

$$v_2^2 = v_1^2 e^{-2f(\varphi-\varphi_0)} + \frac{2gr}{1+4f^2}(3f\cos\varphi + (1-2f^2)\sin\varphi -$$

$$-[3f\cos\varphi_0 + (1-2f^2)\sin\varphi_0]e^{-2f(\varphi-\varphi_0)}). \qquad (19)$$

З урахуванням того, що $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \alpha$ та враховуючи рівняння (4), швидкість введення зернової суміші в ПСК знаходиться за виразом:

$$v_2 = ([2gL_p(\sin\alpha - f\cos\alpha) + v_0^2] \cdot e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} +$$

$$+\frac{2gr}{1+4f^2}(3f\cos\varphi + (1-2f^2)\sin\varphi - .$$

$$-[3f\sin\alpha + (1-2f^2)\cos\alpha] \cdot e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)}))^{1/2} \qquad (20)$$

Графічна інтерпретація отриманого закону руху матеріалу по розгінній ділянці (рис. 3) дозволяє зробити наступні висновки.

При переміщенні матеріалу по прямолінійній ділянці його швидкість зростає по параболічному закону. І чим більші кут нахилу і довжина направляючої, тим динамічніше відбувається збільшення швидкості.

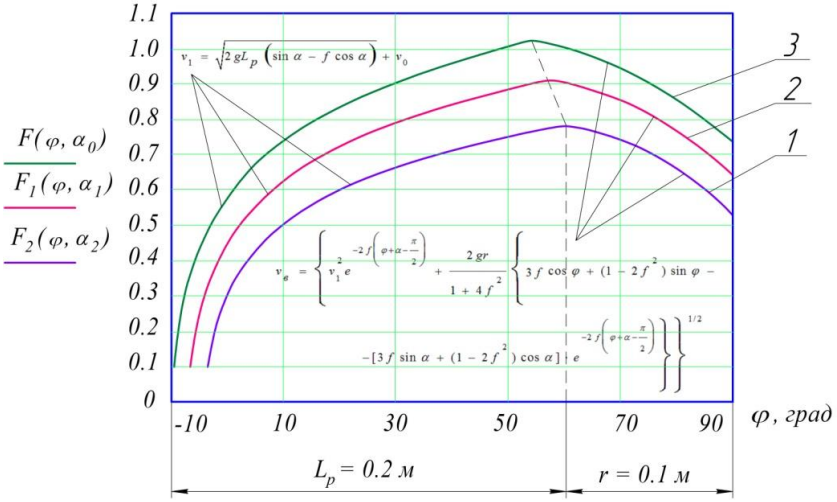
При потраплянні часток до дугоподібної ділянки на них починає діяти відцентрова сила інерції, що призводить до зростання сили тертя, і, відповідно, до зменшення (гальмування) лінійної швидкості руху.

Так, при куті нахилу прямолінійної частини лотка α =33°, довжині розгінної ділянки L_p =0,2 м та радіусі дуги криволінійної частини r = 0,2 м швидкість в кінці прямолінійної ділянки досягає 0,9 м/с, а при введенні до ПСК $v_в$ = 0,55…0,56 м/с.

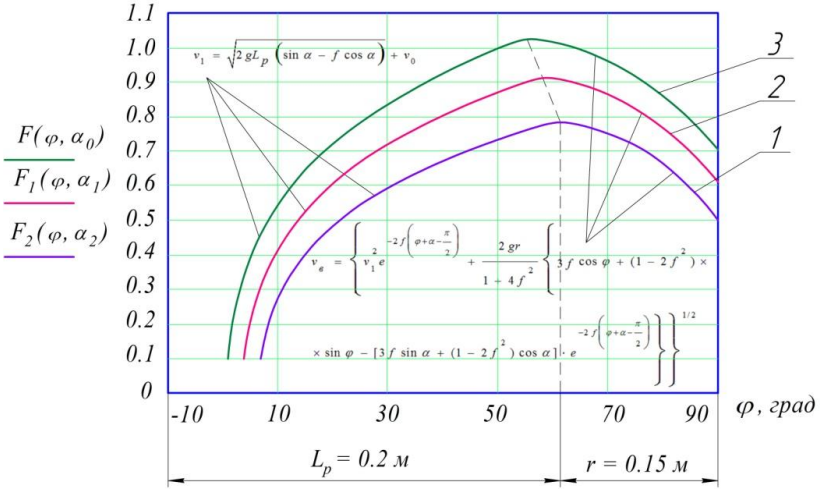
Збільшення радіусу дуги, як видно з графіків, призводить до зменшення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК $v_в$, що пов'язано зі збільшенням часу переміщення часток по дугоподібній ділянці.

Відповідно, чим менший радіус дуги, тим менше змінюється величина швидкості введення в ПСК $v_в$ по відношенню до тієї, яка отримується в кінці прямолінійної розгінної ділянки v_1. Але при цьому величина радіусу дугоподібної ділянки повинна забезпечувати формування стабільного напрямку подачі зернового матеріалу до ПСК.

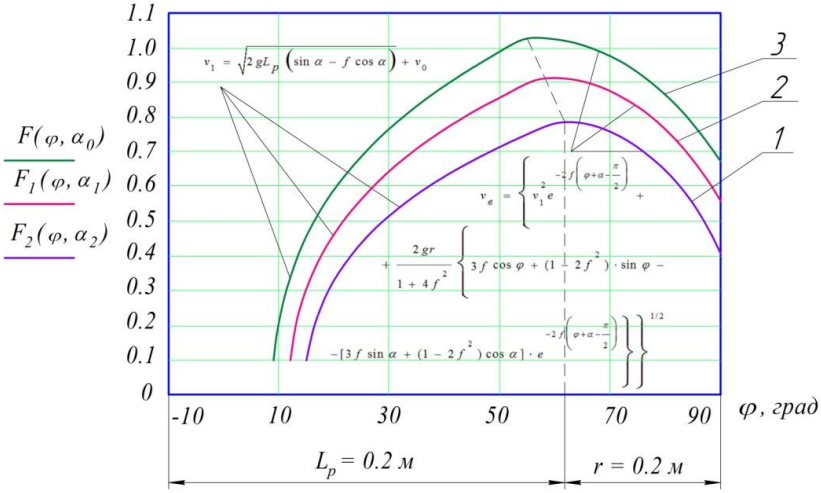
Так, наприклад, для забезпечення горизонтальної подачі матеріалу до ПСК із швидкістю введення $v_в$=0,5 м/с параметри направляючої гравітаційної кривої будуть наступними: довжина розгінної ділянки L_p = 0,2 м, кут її нахилу α = 30° , радіус дуги r =0,15 м.


1.1
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
$F(\varphi, \alpha_0)$
$F_1(\varphi, \alpha_1)$
$F_2(\varphi, \alpha_2)$
$v_1 = \sqrt{2gL_p\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right)} + v_0$
$v_e = \left\{ v_1^2 e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} + \frac{2gr}{1+4f^2}\left\{ 3f\cos\varphi + (1-2f^2)\sin\varphi - [3f\sin\alpha + (1-2f^2)\cos\alpha]\cdot e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} \right\} \right\}^{1/2}$
3
2
1
-10
10
30
50
70
90
φ, град
$L_p = 0.2$ м
$r = 0.1$ м

а)


1.1
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
$F(\varphi, \alpha_0)$
$F_1(\varphi, \alpha_1)$
$F_2(\varphi, \alpha_2)$
$v_1 = \sqrt{2gL_p\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right)} + v_0$
$v_e = \left\{ v_1^2 e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} + \frac{2gr}{1+4f^2}\left\{ 3f\cos\varphi + (1-2f^2)\times \sin\varphi - [3f\sin\alpha + (1-2f^2)\cos\alpha]\cdot e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} \right\} \right\}^{1/2}$
3
2
1
-10
10
30
50
70
90
φ, град
$L_p = 0.2$ м
$r = 0.15$ м

б)



в)

Рисунок 3 – Залежність швидкості руху зернового матеріалу по гравітаційній направляючій живильного пристрою при довжині розгінної ділянки L_p = 0,2 м:

а) r = 0,1 м; б) r = 0,15 м; в) r = 0,2 м;
1 – α = 30°; 2 – α = 33°; 3 – α = 36°.

Висновки:

1. Швидкість введення зернового матеріалу в ПСК з багаторівневим живильним пристроєм залежить від трьох основних параметрів: кута нахилу розгінної прямолінійної ділянки α, її довжини L_p та радіуса дуги направляючої r. При цьому, найбільш впливовим фактором є кут нахилу розгінної ділянки α.

2. Збільшення радіусу дуги направляючої поверхні r призводить до зменшення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК $v_в$, що спричинене збільшенням часу його переміщення по дузі. При однакових значеннях L_p та α збільшення r від 0,1 до 0,2 м призводить до зменшення швидкості введення на $v_в \approx$ 0,1 м/с.

3. Для забезпечення необхідної швидкості введення зернового матеріалу в ПСК ($v_в$=0,5 м/с) при якій досягається одношарова подача, параметри направляючої поверхні живильного пристрою будуть

мати наступні значення: довжина розгінної прямолінійної ділянки L_p = 0,2 м, кут її нахилу $\alpha = 30°$, радіус дуги направляючої поверхні r =0,15 м.

Література

1. Малис А. Я. Машины для очистки зерна воздушным потоком / А. Я. Малис, А. Р. Демидов. – М. : Машгиз, 1962. – 175 с.

2. Бурков А. И. Зерноочистительныемашины. Конструкция, исследование, расчет и испытание / А. И. Бурков, Н. П. Сычугов. – Киров: изд-во НИИСХ Северо-Восток, 2000. – 258 с.

3. Пат. (11) 9586 А Україна, МКИ В 02 В 1/00 (Україна). Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора / Васильковський М. І., Васильковський О. М., Мороз С. М., Лещенко С. М., Нестеренко О. В.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. – № а200500209; заявл. 10.01.05; опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10.

4. Нестеренко О. В. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введені зерна / О. В. Нестеренко, С. М. Лещенко, Д. І. Петренко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Механізація сільськогосподарського виробництва» Випуск 156, 2015 р. – С. 35-42.

5. Нестеренко О. В. Дослідження якісних показників пневмосепарації при багаторівневому введенні зерна / О. В. Нестеренко С. М. Лещенко, Д. І. Петренко // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 32. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – С. 157-162.

6. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизація процессов / За ред. З.Л. Тица. – М.: Машиностроение, 1967. – 447 с.

7. Гортинский В.В. Процессы сепарации на зернообрабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – С. 103-140.

Рецензент д.т.н., проф.В.Ф. Дідух