

В.І. Носуленко, проф., д-р техн. наук, С.М. Лещенко, інж., В.В. Гончаров, доц., канд. фіз.-мат. наук, М.І. Васильковський, доц., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Теоретичний аналіз розділення зернових сумішей багатоструменевим ділильником перед введенням матеріалу в зону пневмосепарації

В статті проведено аналіз роботи багатоструменевого ділильника пневмосепаруючої системи ЗОМ з метою досягнення необхідної швидкості потрапляння зернового матеріалу в зону очищення та виключення зупинки матеріалу в зоні розділення на окремі струмені.
зерноочисна машина (ЗОМ), пневмосепаруючі канали (ПСК), багатоструменевий ділильник, введення зернового матеріалу, зернові струмені

При проведенні операцій післязбиральної очистки зернових сумішей за рахунок повітряного потоку відбувається видалення легких домішок, щуплого та пошкодженого зерна основної культури та насіння бур'янів із зібраного матеріалу. Якість і своєчасність проведення післязбирального очищення зерна обумовлюється забезпеченням умов необхідних і достатніх для подальшого збереження матеріалу із заданими продовольчими та посівними кондиціями. Слід зауважити, що в більшості випадків домішки, які виділяються повітряним потоком мають значно вищу вологість, ніж зерно основної культури, а тому якісна і високоефективна робота пневмосепаруючих робочих органів ЗОМ дозволяє зберегти зібраний врожай і запобігти його передчасному псуванню.

Під час проведення аналізу існуючих пневмосистем ЗОМ [1, 2, 3] було встановлено, що більшість ПСК мають незадовільні показники роботи, а саме, якісні показники їх роботи не відповідають вимогам Держстандарту до очищення зернових сумішей [3]. Особливо проблемними зонами ПСК є місця введення матеріалу в зону дії повітряного потоку та виведення його з неї [4] незалежно від того, очищення відбувається вертикальним чи похилим повітряним потоком. Це можна пояснити тим, що матеріал, який потрапляє під дію повітряного потоку, створює додатковий опір повітрю, а зважаючи на високу дисперсність останнього, повітряний потік перерозподіляється по поперечному перерізі каналу, створюючи цим самим нерівномірне швидкісне поле в різних частинах ПСК. Значна нерівномірність поля швидкостей по перерізу ПСК має прямий зв'язок з якісними показниками пневмосепарації, а саме, ефектом очистки і чіткістю сепарації, оскільки різниця швидкостей в різних зонах каналу призводить до зниження ефекту очистки та збільшенню вмісту повноцінного зерна у відходах (чіткість сепарації).

З метою вирівнювання поля швидкостей по поперечному перерізі каналу, і цим самим підвищення ефективності пневмосепарації, було запропоновано встановлювати додатковий опір в центральній частині каналу (решітки із гофрованих пластин) [1], різноманітні активні пристрої введення матеріалу з частковим розподіленням частин зернової суміші в місці її введення в ПСК [1, 4] тощо. В своїй сукупності ці пристрої та засоби вирівнювання швидкості повітряного потоку по перерізу каналу значно ускладнюють конструкцію машини, а ефективність їх роботи залишається низькою, саме це і обмежило їх практичне застосування.

На наш погляд, більш ефективним напрямком інтенсифікації пневмосепаруючого процесу, який і призводить до значного вирівнювання швидкісного поля, є удосконалення способу введення зернового матеріалу в ПСК, замінивши традиційний пасивний спосіб введення зернового матеріалу по похилій площині на багатоструменевий [5], при якому зернова суміш в зону дії повітряного потоку вводиться не суцільним потоком, а окремими струменями [6].

На рис. 1 наведено технологічну схему вертикального ПСК з традиційним та багатоструменевим введенням оброблюваного матеріалу в повітряний потік. На рис. 2 наведено фото багатоструменевих ділильників, які використовувались на експериментальній установці при проведенні експериментальних досліджень.

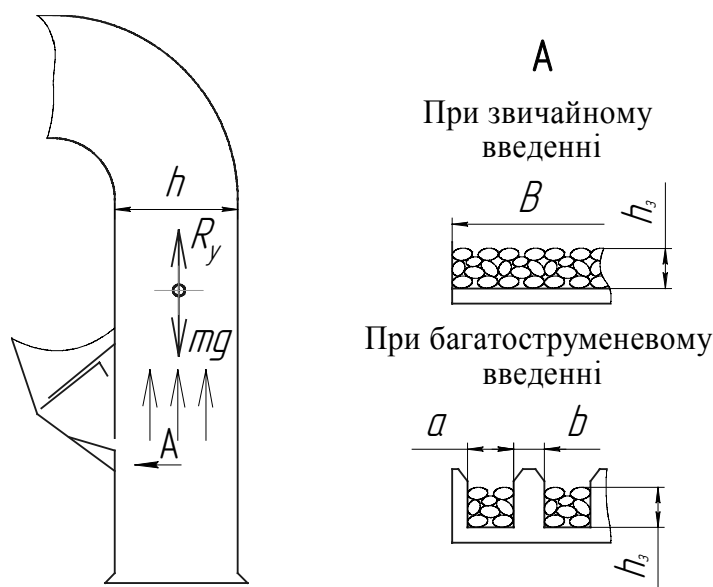


Рисунок 1 – Технологічна схема роботи ПСК з традиційним та багатоструменевим введенням зернового матеріалу в ПСК

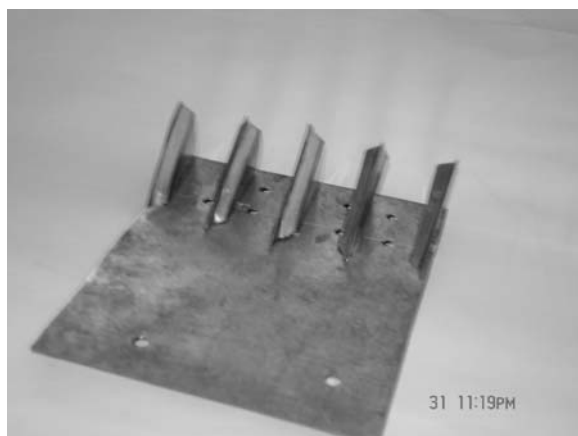


Рисунок 2 – Фото експериментальних пасивних багатоструменевих ділильників

Проведені попередні дослідження вдосконаленого способу введення матеріалу [6] дозволяють відмітити його високу ефективність та доводять, що при попередньому очищенні зернових сумішей багатоструменеве введення зернового матеріалу з шириною зернових струменів $a=15$ мм та шириною ділильника $b=8$ мм спостерігається підвищення продуктивності пневмосепарації в 1,6 рази, при цьому досягається зниження енергоємності системи на 15-20%.

З метою забезпечення заданої швидкості введення матеріалу в зону очистки повітряним потоком, а отже і необхідної продуктивності роботи ПСК, та виключення можливості зупинки зернового матеріалу під час його розділення пасивними багатоструменевими ділильниками слід провести аналітичний аналіз по дослідженню робочих параметрів ділильника.

Проведемо аналіз руху матеріалу після виходу з бункера до моменту попадання в зону дії повітряного потоку.

Розглянемо рух частини матеріалу, який знаходиться між двома вертикальними площинами перпендикулярними боковій поверхні лотка, що виходить з бункера, відстань між площинами рівна Δl

Весь рух розіб'ємо на три етапи

Перший етап – рух матеріалу до ділильників, другий – рух при вході до ділильників, третій – рух в ділильниках.

1) Рух до ділильників

Диференціальне рівняння руху при цьому має вигляд

$$m\bar{a} = \bar{P} - \bar{F}_{\text{дн}} - \bar{F}_{\text{бок}}, \quad (1)$$

де $\bar{P} = m\bar{g}$ – сила ваги матеріалу;

$\bar{F}_{\text{дн}} = f \bar{N}$ – сила тертя матеріалу при русі по днищу;

f – коефіцієнт тертя матеріалу по днищу;

$\bar{N}$ – сила реакції днища;

$\bar{F}_{\text{бок}} = f \bar{N}_{\text{бок}}$ – сила тертя від бокової поверхні лотка, по якому вводиться матеріал.

Опором повітря знехтуємо, так як швидкість на цьому етапі досить мала ($V \approx 0,5 \text{ м/с}$) і частинки матеріалу рухаються в загальній масі.

Розглянемо Декартову систему координат на площині OXY : початок координат O знаходиться в точці виходу матеріалу з бункера, напрям вісі OX співпадає з напрямом початкової швидкості матеріалу, вісь OY направлена вгору перпендикулярно днищу. В вибраній системі координат рівняння (1) в проекції на вісь OX прийме вигляд:

$$m\ddot{x} = mg \sin \alpha - f mg \cos \alpha - fmg \frac{h}{a}, \quad (2)$$

так як

$$N_{\text{бок}} = 2 \int_0^h \rho g y \Delta l dy = 2 \rho g \Delta l \frac{y^2}{2} \Big|_0^h = 2 \rho g \Delta l \frac{h^2}{2} = (\rho a \Delta l h) g \frac{h}{a} = mg \frac{h}{a}, \quad (3)$$

де $h = h_0 \frac{V_0}{\dot{x}}$ – висота потоку матеріалу в момент часу t ,

h_0 – початкова висота потоку.

Тут α – кут нахилу днища лотка до горизонту, V_0 , h_0 – відповідно, швидкість та висота потоку матеріалу при виході з бункери, a – ширина лотка.

Отже, рівняння (2) приймає вигляд:

$$\ddot{x} + fg \frac{h_0 V_0}{a \dot{x}} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (4)$$

Рівняння (4) є диференціальним рівнянням другого порядку, яке допускає пониження порядку. Зробимо заміну $\dot{x} = V$, тоді $\ddot{x} = \dot{V}$ і з (4) отримаємо:

$$\dot{V} + fg \frac{h_0 V_0}{aV} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (5)$$

Диференціальне рівняння (5) є диференціальним рівнянням першого порядку з розділювальними змінними. Розділивши змінні, отримаємо

$$\frac{dV}{g(\sin \alpha - f \cos \alpha) - fg \frac{h_0 V_0}{aV}} = dt,$$

або

$$A_1 \cdot \frac{V}{V - A_2} dV = dt, \quad (6)$$

$$\text{де} \quad A_1 = \frac{1}{g(\sin \alpha - f \cos \alpha)}, \quad A_2 = \frac{g}{a} A_1 f h_0 V_0. \quad (7)$$

Після інтегрування, маємо

$$A_1 \cdot (V + A_2 \ln |V - A_2|) = t + C, \quad (8)$$

де C – постійна інтегрування, яка знаходиться з початкової умови $V = V_0$ при $t = t_0$.

Маємо

$$C = A_1 \cdot (V_0 + A_2 \ln |V_0 - A_2|). \quad (9)$$

Підставивши (9) в (8) отримаємо:

$$A_1 \cdot (V + A_2 \ln |V - A_2|) = t + A_1 \cdot (V_0 + A_2 \ln |V_0 - A_2|)$$

або

$$A_1 \cdot \left(V - V_0 + A_2 \ln \left| \frac{V - A_2}{V_0 - A_2} \right| \right) = t. \quad (10)$$

Рівність (10) задає в неявному вигляді швидкість V як функцію часу t .

Отже для знаходження закону руху матеріалу до ділильника потрібно розв'язати рівняння

$$\dot{x} = V, \quad (11)$$

де швидкість V є розв'язком рівняння (10).

Так як рівняння (10) є нерозв'язним в аналітичному вигляді відносно V , то (11) потрібно розв'язувати наближено

$$x_{i+1} = x_i + V_i \cdot \Delta t,$$

де V_i є розв'язком рівняння

$$A_1 \cdot \left(V_i - V_0 + A_2 \ln \left| \frac{V_i - A_2}{V_0 - A_2} \right| \right) = t_i,$$

$$\text{а } t_i = t_{i-1} + \Delta t.$$

2) Взаємодія з ділильниками – потік розбивається на три частини: дві крайні полоси, що виходять на ділильники та центральна частина, що виходить на жолоб ділильника.

Для отримання закону руху матеріалу при вході в ділильники застосуємо закон збереження енергії.

Розглянемо рух частини матеріалу, що знаходиться між двома вертикальними площинами, які перпендикулярними боковій поверхні ділильника. Відстань між площинами рівна Δl . Тоді маса Δm даного матеріалу рівна $\Delta m = \rho a h \Delta l$, де ρ – густина

матеріалу, a – відстань між боковими поверхнями ділильника, h – висота шару матеріалу, що рухається.

Розглянемо Декартову систему координат на площині OXY : початок координат – точка O знаходиться на днищі лотка в точці, де починається ділильник, вісь OX направлена паралельно днищу в напрямку руху матеріалу, вісь OY – вгору перпендикулярно днищу.

Запишемо закон збереження енергії для вибраної частини матеріалу:

$$K_1 + \Pi_1 = K_2 + \Pi_2 + Q_{12}, \quad (12)$$

де K_1, Π_1, K_2, Π_2 – відповідно, кінетична і потенціальна енергії в деякий момент часу t (індекс „1”) та $t + \Delta t$ (індекс „2”);

Q_{12} – енергія затрачена на подолання сил тертя при русі матеріалу за час Δt .

Знайдемо усі складові рівності (12). Для кінетичної і потенціальної енергій маємо

$$K_1 = \frac{\Delta m V^2}{2}, \quad \Pi_1 = \Delta m g H, \quad K_2 = \frac{\Delta m (V + \Delta V)^2}{2}, \quad \Pi_2 = \Delta m g (H + \Delta H),$$

де $V, V + \Delta V, H, H + \Delta H$ – відповідно, швидкість та положення центра ваги матеріалу в моменти часу t та $t + \Delta t$;

g – прискорення земного тяжіння.

Нехай за час Δt матеріал пройшов шлях Δx , тоді

$$\Delta H = -\Delta x \sin \alpha + \frac{\Delta h}{2},$$

де α – кут, який утворює днище роздільника з горизонтальною площиною;

Δh – зміна висоти пласту матеріалу за час Δt .

Визначимо закон зміни висоти потоку матеріалу $h(x)$. З умови нерозривності потоку матеріалу за час Δt

$$h_1 a_1 V_1 \Delta t = h_2 a_2 V_2 \Delta t$$

маємо:

$$h a V = (h + \Delta h)(a - \Delta x \sin \beta)(V + \Delta V)$$

або спростивши

$$0 = h a \Delta V + V a \Delta h - h V \sin \beta \Delta x - h \sin \beta \Delta x \Delta V + a \Delta h \Delta V - V \sin \beta \Delta h \Delta x \sin \beta \quad (13)$$

з точністю до малих першого порядку отримаємо

$$\Delta h \approx \frac{h}{a} \sin \beta \Delta x - \frac{h}{V} \Delta V, \quad (14)$$

де β – кут розхилу ділильника.

Поділивши (13) на Δx і перейшовши до границі при $\Delta x \rightarrow 0$ отримаємо диференціальний зв'язок між висотою матеріалу та його швидкості:

$$h'_x = \frac{h}{a} \sin \beta - \frac{h}{V} V'_x. \quad (15)$$

Затрати Q_{12} на подолання сил тертя представимо у вигляді

$$Q_{12} = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

де $Q_1 = \Delta m g f \cos \alpha \Delta x$ – затрати енергії на подолання сили тертя об днище;

$$Q_2 = f \rho g \frac{h^2}{2} \Delta l \frac{\Delta x}{\cos \beta} = f \Delta m g \frac{h}{2a} \frac{\Delta x}{\cos \beta} \quad \text{– затрати енергії на подолання сили тертя}$$

по боковій стінці ділильника;

Q_3 – втрати кінетичної енергії при ударі матеріалу по боковій стінці ділильника.

Так як швидкість матеріалу до удару V і після удару V_{y0} зв'язані формулою $V_{y0} = V(\sin \beta - f \cos \beta)$, то енергію Q_3 знайдемо як різницю кінетичної енергії до ΔK_1 і після ΔK_2 удару матеріалу, який ударяється об бокову стінку ділильника

$$Q_3 = \Delta K_1 - \Delta K_2 = 2 \frac{\Delta m_{\Delta x} V^2}{2} - 2 \frac{\Delta m_{\Delta x} V^2 (\sin \beta - f \cos \beta)^2}{2} =$$

$$= \Delta m_{\Delta x} V^2 (1 - (\sin \beta - f \cos \beta)^2) = \Delta m \frac{\Delta x \operatorname{tg} \beta}{a} V^2 (1 - (\sin \beta - f \cos \beta)^2),$$

де $\Delta m_{\Delta x} = \Delta m \frac{\Delta x \operatorname{tg} \beta}{a}$ – маса матеріалу, який ударяється об бокову стінку.

Отже, підставивши знайдені вирази для енергій в (2.1), отримаємо з точністю до малих першого порядку

$$\frac{\Delta m V^2}{2} + \Delta m g H = \frac{\Delta m (V + \Delta V)^2}{2} + \Delta m g \left(H - \Delta x \sin \alpha + \frac{h}{2a} \sin \beta \Delta x - \frac{h}{2V} \Delta V \right) +$$

$$+ \Delta m g f \cos \alpha \Delta x + f \Delta m g \frac{h}{2a \cos \beta} \frac{\Delta x}{\cos \beta} + \Delta m \frac{\Delta x \operatorname{tg} \beta}{a} V^2 (1 - (\sin \beta - f \cos \beta)^2).$$

Після спрощення остання рівність дає

$$0 = V \frac{\Delta V}{\Delta x} + g \left(-\sin \alpha + \frac{h}{2a} \sin \beta - \frac{h}{2V} \frac{\Delta V}{\Delta x} \right) +$$

$$+ g f \cos \alpha + f g \frac{h}{2a \cos \beta} + \frac{\operatorname{tg} \beta}{a} V^2 (1 - (\sin \beta - f \cos \beta)^2). \quad (16)$$

Перейшовши в (16) до границі при $\Delta x \rightarrow 0$ отримаємо

$$\left(V - \frac{gh}{2V} \right) V'_x = g \left(\sin \alpha - f \cos \alpha - \frac{h}{2a} \left(\sin \beta + \frac{f}{\cos \beta} \right) \right) - \frac{V^2}{2a} \sin 2\beta (1 - f + 2f \operatorname{tg} \beta).$$

Отже, поставлена задача звелась до розв'язування системи рівнянь

$$\begin{cases} V'_x = \frac{Vg}{2V^2 - gh} \left[\left(2(\sin \alpha - f \cos \alpha) - \frac{h}{a} \left(\sin \beta + \frac{f}{\cos \beta} \right) \right) - \frac{V^2}{ag} \sin 2\beta (1 - f + 2f \operatorname{tg} \beta) \right] \\ h'_x = \frac{h}{a} \sin \beta - \frac{h}{V} V'_x, \end{cases}$$

де $a = a_0 - 2x \operatorname{tg} \beta$.

3) Рух в ділильнику.

Рух матеріалу на третьому етапі описується аналогічно першому. Різниця полягає тільки в тому, що:

1) сила реакції бокових стінок тепер рівна $N_{бок1}$:

$$N_{бок1} = N_{бок} \cdot n_c,$$

де $N_{бок}$ – сила реакції, яка визначена в (3);

n_c – кількість струменів, на які ділильник ділить потік матеріалу.

2) ширина лотка рівна a_1 :

$$a_1 = a_c \cdot n_c,$$

де a_c – ширина одного струменя ділильника.

Отже, в рівностях (7), (10) буде тільки одна відмінність: в виразі для A_2 потрібно a замінити на a_c .

Результати проведеного моделювання по аналітичному дослідженні швидкостей та переміщень частин зернової суміші при розділенні її багатоструменевим ділильником наведено на рис. 3.

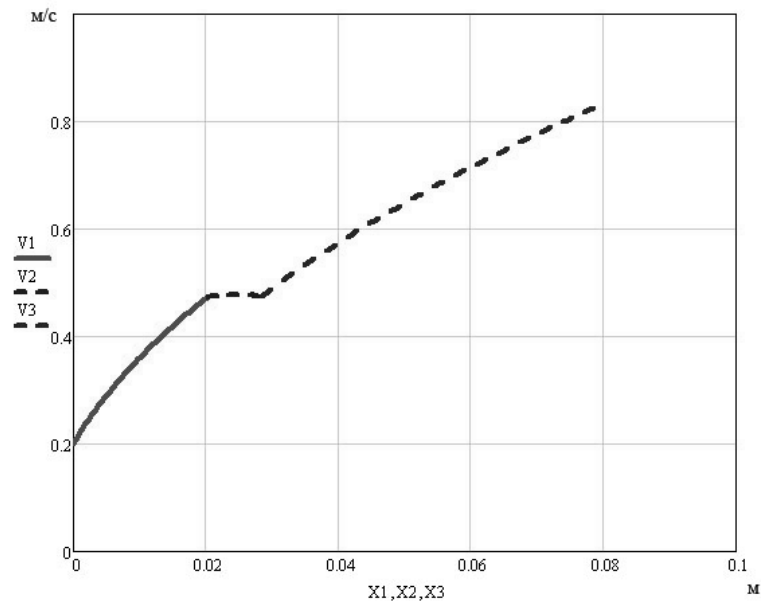


Рисунок 3 – Аналітичні графіки швидкості та переміщення частин зернової суміші при роботі багатоструменевого ділильника

Аналізуючи наведений графік видно, що гальмування частин відбувається на другому етапі – етапі входження частин суміші в багатоструменевий ділильник, а тому приведені теоретичні дослідження дозволяють визначитися з розмірами кожної з ділянок багатоструменевого ділильника і забезпечити його працездатність без зупинок частин суміші під час розділення. Так при умові, що рух зернової суміші починається зі швидкості 0,2 м/с та з розмірами ділянок I – 2 см; II – 1 см; III – 5 см забезпечується швидкість введення зернового матеріалу на рівні 0,82 м/с

Висновки

1. Ефективність роботи пневмосистем ЗОМ залишається низькою, що обумовлюється значним перерозподілом поля швидкостей по поперечному перерізу каналу, а існуючі технічні засоби усунення цього недоліку значно ускладнюють конструкцію машини, що унеможливорює їх практичне застосування.

2. Найбільш ефективним способом підвищення питомої продуктивності пневмосистем існуючих ЗОМ без значної зміни їх конструкції є застосування багатоструменевих ділильників, що дає змогу зменшити опір повітряному потоку в зоні введення матеріалу.

3. Для визначення показників працездатності пасивного багатоструменевого ділильника проведено теоретичні дослідження, в ході яких одержані залежності для визначення розмірів кожної з ділянок і швидкості, які досягаються при цьому.

4. Отримано зв'язок між висотою матеріалу та його швидкістю при розділенні багатоструменевим ділильником з врахуванням закону збереження енергії.

Список літератури

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

2. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Косінов М.М. та ін. Підвищення ефективності очищення зерна повітряним потоком. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 24. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – С. 84-88.
3. Васильковський М.І., Гончарова С.Я., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. Аналіз сучасного стану повітряної сепарації зерна. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 36. – Кіровоград: КНТУ, 2006. – С. 111-114.
4. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. Огляд і напрямки вдосконалення пневмосепаруючих робочих органів ЗОМ // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 37. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – С. 99-104/
5. Спосіб введення зернового матеріалу в аспіраційний канал повітряного сепаратора: Патент України № 65067 МКВ В 02В1/00 // М.І. Васильковський, О.М. Васильковський, Р.В. Кісільов, С.М. Лещенко, С.М. Мороз. – 4 с.
6. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. Інтенсифікація процесу повітряної сепарації зерна. // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 24. – Мелітополь, 2006. - С. 161-165.

В статті проведено аналіз роботи многоструйного делителя пневмосепарирующей системы зерноочистительной машины с целью достижения необходимой скорости попадания зернового материала в зону очистки и исключения останковки материала в зоне разделения на отдельные струи.

The analysis of work of multi-jet divizor of the air system of grain cleaner machine is conducted in the article. It is done for achievement of necessary speed of hit of corn material in the area of cleaning and exception of stop of material in the area of dividing into separate streams.