

УДК 631.362.3

О.В. Нестеренко, канд. техн. наук, Д.І. Петренко, доц., канд. техн. наук, І.І. Павленко, проф., д-р техн. наук, С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, С.Я. Гончарова, доц., канд. фіз-мат. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна, E-mail: nov_78@ukr.net

Аналітичні дослідження контактного руху легких домішок у пневмосепаруючому каналі

Враховуючи складність та випадковість пневмосепараційного процесу, на який впливає значна кількість факторів, є необхідним вирішення наукового завдання щодо встановлення закономірностей контактної взаємодії легких домішок з зерном в зоні пневмосепарації. В статті розглянуто контактний рух легких домішок через багатошаровий зерновий потік в вертикальному пневмосепаруючому каналі (ПСК) при їх багаторівневому одношаровому введенні. Отримані теоретичні залежності, які дозволяють встановити закономірності впливу основних конструктивно-технологічних параметрів ПСК на якість процесу сепарації.

пневмосепарація, повітряний потік, багаторівневе введення, зерновий матеріал, пневмосепаруючий канал (ПСК), введення зерна, контактний рух легких домішок.

А.В. Нестеренко, канд. техн. наук, Д.И. Петренко, доц., канд. техн. наук, І.І. Павленко, проф., д-р техн. наук, С.Н. Лещенко, доц., канд. техн. наук, С.Я. Гончарова, доц., канд. физ-мат. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

Аналитическое исследование контактного движения легких примесей в пневмосепарирующем канале

Учитывая сложность и случайность пневмосепарационного процесса на который влияет значительное количество факторов, существует необходимость решения научной задачи для определения закономірностей контактної взаємодії легких примесей с зерном в зоне пневмосепарации. В статье рассмотрено контактное движение легких примесей через многошаровый поток зерна в вертикальном ПСК при их многоуровневом однослойном введении. Получены теоретические зависимости, которые позволяют найти закономірности влияния основных конструктивно-технологических параметров ПСК на качество сепарации.

пневмосепарація, воздушный поток, многоуровневое введение, зерновой материал, пневмосепарирующий канал (ПСК), введение зерна, контактное движение легких частиц

Постановка проблеми. Розділення зернових матеріалів в пневмосепаруючому каналі відбувається за досить складних умов, оскільки легким домішкам, які перебувають в нижніх зернових шарах для виділення в осадову камеру необхідно з мінімальною зміною траєкторії перетнути всі вище розміщені насінини, що рухаються в низхідному напрямку. В результаті такого руху можлива контактна взаємодія легких домішок з зерном, що суттєво впливає на якість очищення.

Тому дуже важливою задачею є аналітичні дослідження, спрямовані на дослідження контактної взаємодії легких домішок з основним зерном в пневмосепаруючому каналі та її вплив на якість розділення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах багатьох вчених при теоретичних дослідженнях пневмосепарації розглядається, як правило, взаємодія окремо взятої зернини з повітряним потоком [1-5], що суттєво відрізняється від

реальних умов сепарації, особливо при збільшених питомих навантаженнях. З підвищенням питомого навантаження спостерігається перерозподіл частинок зерноsumіші в зоні сепарації, внаслідок нерівномірного розподілу повітряного потоку в поперечному перерізі каналу, тому збільшується кількість їх вірогідних зіткнень [6, 7].

В роботах [8, 9] на основі теорії вірогідностей автором було запропоновано статистичну математичну модель очищення двокомпонентної зернової суміші в вертикальному ПСК як при одношаровому, так і багатшаровому потоці зернового матеріалу з урахуванням взаємодії легких домішок з зерном. Але складність використання такої моделі на практиці обмежується через те, що внаслідок зміни нерівномірності поля швидкостей повітряного потоку суттєво збільшується кількість та хаотичність зіштовхувань частинок зернової суміші, що важко врахувати.

Постановка завдання. З урахуванням багаторівневого введення матеріалу в ПСК є необхідним визначення його впливу на якісні показники процесу сепарації та встановлення основних закономірностей взаємодії легких домішок із зерновим матеріалом в робочій зоні ПСК.

Виклад основного матеріалу. При багаторівневому введенні зернового матеріалу домішки, які виділяються з нижніх зернових шарів, повинні пройти через усі верхні шари щоб потрапити в осадову камеру. При цьому вони мають пройти останній шар до того, як досягнуть задньої стінки каналу. Тому за критерій якості роботи (відносно кількості шарів зернового матеріалу) пневмосепаратора вибрана наступна умова:

$$T_{\text{гор}} > T_{\text{вер}} = \sum_{i=n}^{i=2n} T_i, \quad (1)$$

де $T_{\text{гор}}$ – час, за який домішка з самого нижнього шару проходить до задньої стінки каналу;

$T_{\text{вер}}$ – час, за який вказана домішка пройде через усі верхні шари;

$T_i, /i = \overline{2, n} /$ – час, за який вказані домішки проходить через i – тий шар;

n – кількість шарів зернового матеріалу.

Оскільки контактний рух домішок в багатшаровому потоці зерна є ступінчастим, кожна ступінь – проходження наступного шару і рух між шарами (рис.1,а). Відповідно, траєкторія руху і час руху домішок між зерновими шарами залежить від початкового горизонтального зміщення $\xi_i, /i = \overline{1, n} /$ центрів мас домішок і зерна, тобто точок A_i і D_i . Це зміщення є випадковою величиною і може прийняти будь-яке значення з області $[0; 2R]$.

Проведемо усереднення по величині $\xi_i \in [0; 2R], /i = \overline{1, n} /$. На i -тому ступені ($i = \overline{1, n}$) рух центра мас O_{ξ_i} домішок складається з трьох послідовних етапів (рис. 1,б):

- безконтактний рух домішок між шарами – ланка $A_i B_i$;
- зіткнення домішок з зерном в точці B_{li} ;
- рух домішок по зерну, при цьому точка дотику описує траєкторію $B_{li} C_{li}$, а центр мас окремої частинки домішок – $B_i C_i$.

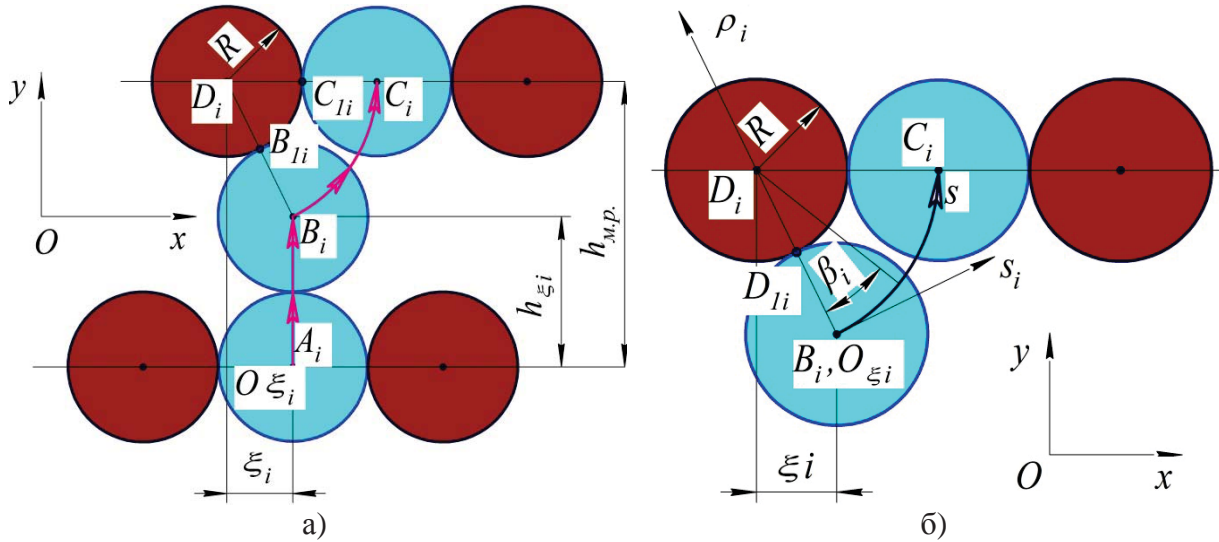


Рисунок 1 – Схема руху домішки при проходженні через зернові шари (а) та під час контакту з зерном (б).

Рух на кожному з ступенів описується аналогічними рівняннями. Відмінність полягає тільки в початкових умовах, які змінюються від одного шару до іншого, тобто кінцеві умови на попередньому зерновому шарі є початковими умовами для наступного.

При заданому зміщенні ξ_i , $/i = \overline{2, n}/$ знаходимо кінцеві параметри безконтактного руху:

- шлях безконтактного вертикального польоту $A_i B_i = h_{\xi_i}$, (рис. 1,а):

$$h_{\xi_i} = h_{m.p.} - \sqrt{4R^2 - \xi_i^2}; \quad (2)$$

- час безконтактного польоту $t_{\xi_i}^{(1)}$:

$$h_{\xi_i} = (V_n - V_{e.d.}) t_{\xi_i}^{(1)} - \frac{1}{k_d} \left(\ln \left| 1 - \frac{V_n - \dot{y}_0 - V_{e.d.}}{V_n - \dot{y}_0 + V_{e.d.}} e^{-\sqrt{2} \sqrt{gk_d t_{\xi_i}^{(1)}}} \right| - \ln \frac{2V_{e.d.}}{V_n - \dot{y}_0 + V_{e.d.}} \right) + y_0, \quad (3)$$

- швидкість V_{ξ_i} домішок в момент зіткнення:

$$V_{\xi_i} = \frac{V_n - \dot{y}_0 + V_{e.d.} - e^{-\sqrt{2} \sqrt{gk_d t_{\xi_i}^{(1)}}}}{V_n - \dot{y}_0 - V_{e.d.} + e^{-\sqrt{2} \sqrt{gk_d t_{\xi_i}^{(1)}}}} V_{e.d.} + V_n, \quad (4)$$

- кут контакту домішок по зерну при зіткненні, β_{ξ_i} :

$$\beta_{\xi_i} = \arcsin \frac{\xi_i}{2R}. \quad (5)$$

Знаходимо швидкість домішок $V_{\xi_i}^{(1)}$, $/i = \overline{2, n}/$, після зіткнення з зерном (при умові еластичного удару)

$$V_{\xi_i}^{(1)} = -V_{e.d.} \cdot \left(\frac{\xi_i}{2R} - f \sqrt{1 - \frac{\xi_i^2}{4R^2}} \right) \cdot \frac{\frac{V_n - \dot{y}_0 + V_{e.d.}}{V_n - \dot{y}_0 - V_{e.d.}} + e^{-\sqrt[2]{gk_\rho t_{\xi_i}^{(1)}}}}{\frac{V_n - \dot{y}_0 + V_{e.d.}}{V_n - \dot{y}_0 - V_{e.d.}} - e^{-\sqrt[2]{gk_\rho t_{\xi_i}^{(1)}}}}. \quad (6)$$

Для визначення закону руху домішок по зерну зробимо наступні припущення:
 - після контакту коефіцієнт тертя домішок по зерну рівний нулю (при обтіканні зерна повітря притискається до нього і створює повітряну подушку, яка нівелює сили тертя);

- потік повітря, який спонукає рух домішок, направлений по дотичній до поверхні зернової частинки.

Відповідно до прийнятих припущень, рівняння руху домішок по зерну в рухомій системі координат $O_{\xi_i} s \rho, / i = 2, n /$ (рис. 1, б) має вигляд:

$$m\ddot{s} = mk_\rho (V_n - \dot{s})^2 - mg \sin \beta, \quad (7)$$

де β - кут контакту домішок по зерну.

Оскільки

$$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\beta}{dt}, \quad \ddot{s} = \frac{d^2s}{dt^2} = R \frac{d^2\beta}{dt^2},$$

то останнє рівняння приймає вигляд:

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} = \left[k_\rho R \left(\frac{d\beta}{dt} - \frac{V_n}{R} \right)^2 - \frac{g}{R} \right] \sin \beta. \quad (8)$$

Зробивши заміни

$$\frac{d\beta}{dt} - \frac{V_n}{R} = u(\beta), \quad \frac{d^2\beta}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{d\beta}{dt} = \frac{du(\beta)}{dt} = \frac{du(\beta)}{d\beta} \frac{d\beta}{dt} = \frac{du(\beta)}{d\beta} \left(u(\beta) + \frac{V_n}{R} \right),$$

понижаємо порядок диференціального рівняння (8):

$$(Ru + V_n) \frac{du}{d\beta} = k_\rho (R^2 u^2 - V_{e.d.}^2) \sin \beta.$$

Розділяємо змінні

$$\frac{1}{k_\rho} \frac{(Ru + V_n) du}{R^2 u^2 - V_{e.d.}^2} = \sin \beta d\beta$$

і інтегруємо

$$\frac{1}{2k_\rho R} \left(\ln \left| R^2 u^2 - V_{e.d.}^2 \right| \frac{V_n}{V_{e.d.}} \ln \left| \frac{Ru - V_{e.d.}}{Ru + V_{e.d.}} \right| \right) = \cos \beta + C_{1i} \cdot / i = 2, n /,$$

де $C_{1i} / i = 2, n /$ - постійна інтегрування.

Після перетворень, отримаємо:

$$\ln \left| (R\dot{\beta} - V_n)^2 - V_{e.d.}^2 \right| + \frac{V_n}{V_{e.d.}} \ln \left| \frac{R\dot{\beta} + V_n + V_{e.d.}}{R\dot{\beta} + V_n - V_{e.d.}} \right| - \ln \left| (V_{\xi_i}^{(1)} - V_n)^2 - V_{e.d.}^2 \right| + \frac{V_n}{V_{e.d.}} \ln \left| \frac{V_{\xi_i}^{(1)} + V_n + V_{e.d.}}{V_{\xi_i}^{(1)} + V_n - V_{e.d.}} \right| - 2k_d R (\cos \beta - \cos \beta_{\xi_i}) = 0, /i = \overline{2, n} / . \quad (9)$$

Останнє рівняння не розв'язується аналітично, тому його розв'язок знаходимо наближеними числовими методами, враховуючи початкову умову:

$$\beta(t_{\xi_i}^{(1)}) = \beta_{\xi_i} = \arcsin \frac{\xi_i}{2R}, /i = \overline{2, n} / .$$

В момент сходження домішок з зерна ($t = t_{\xi_i}^{(2)}$, $/i = \overline{2, n} /$), згідно припущень:

$$\beta(t_{\xi_i}^{(2)}) = \frac{\pi}{2}, /i = \overline{2, n} / . \quad (10)$$

Тоді з умови (10) знаходимо час ($t_{\xi_i}^{(2)}$), $/i = \overline{2, n} /$ і швидкості сходження домішок з зерна – кутову $\dot{\beta}(t_{\xi_i}^{(2)})$, $/i = \overline{2, n} /$ та лінійну $V_{\xi_i}^{(2)} = \dot{\beta}(t_{\xi_i}^{(2)})R$, $/i = \overline{2, n} /$.

Відповідно, усереднені значення часу проходження домішок через i -тий шар T_i , $/i = \overline{2, n} /$ та лінійної швидкості V_i , $/i = \overline{2, n} /$ при виході з цього зернового шару:

$$T_i = \frac{1}{2R} \int_0^{2R} t_{\xi_i}^{(2)} d\xi_i, V_i = \frac{1}{2} \int_0^{2R} \dot{\beta}(t_{\xi_i}^{(2)}) d\xi_i, /i = \overline{2, n} / .$$

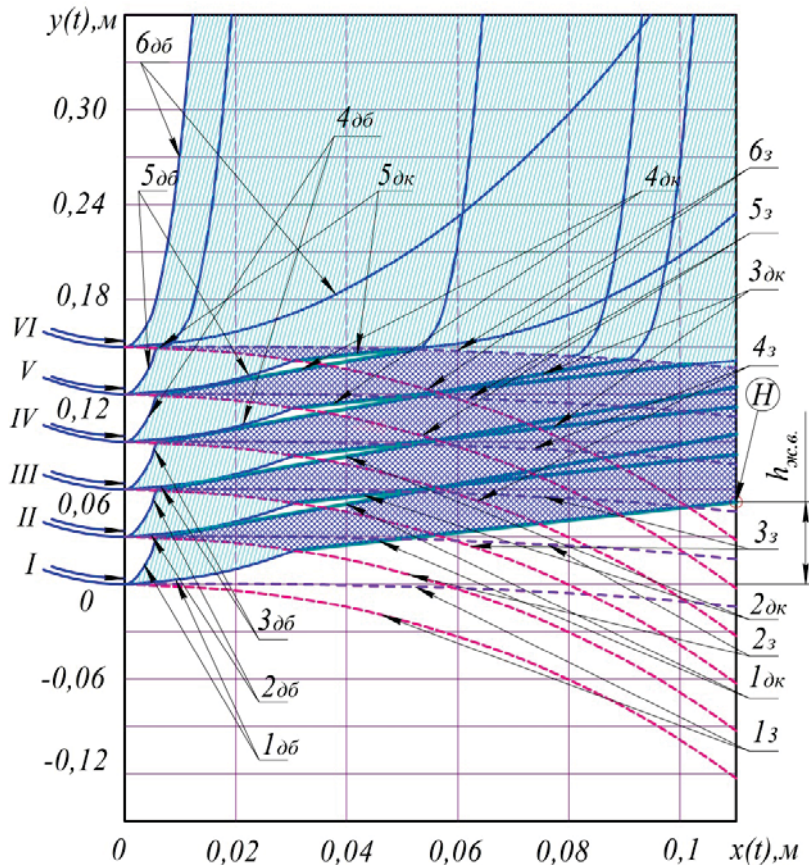
За формулою (1) знаходимо загальний час проходження домішок з нижнього шару через усі зернові шари $T_{вер}$.

За результатами аналітичних досліджень були отримані усереднені траєкторії польоту легких часток при контактному русі через вище розміщені зернові шари (рис. 2).

На основі графічних залежностей (рис. 2) можна стверджувати, що при глибині ПСК $C = 0,11$ м та означених умовах контактного руху легких домішок та зерна спостерігається повне виділення легкої фракції із IV по VI рівень. Відповідно, легкі домішки, які потрапляють в робочу зону ПСК з I по III рівень, досягають протилежної стінки каналу в зоні виведення очищеного зерна, тому можливість її повного виділення знижується.

З врахуванням зміни траєкторій руху важких та легких фракцій, при контактній взаємодії також можливо визначити місце встановлення жалюзійної стінки, за допомогою якої зернова фракція виводиться із зони дії повітряного потоку. Так, при шестирівневому введенні місце встановлення верхньої точки жалюзійної стінки, відносно I рівня введення $h_{ж.в.}$ (рис. 2), повинно знаходитись на висоті $h_{ж.в.} = 0,05 \dots 0,055$ м. При чотирьох- та п'ятирівневому введенні збільшується вірогідність повного виділення домішок, оскільки при $n = 4$ верхня точка жалюзійної стінки, відносно I рівня введення, буде розміщуватись на висоті $h_{ж.в.} = 0,11 \dots 0,12$ м, а для $n = 5$ – $h_{ж.в.} = 0,08 \dots 0,1$ м, при цьому траєкторії польоту легкої фракції, з врахуванням контактного зміщення, знаходяться вище означених траєкторій зернових фракцій.

Висновки. В результаті теоретичного аналізу встановлено закономірність контактної руху легких домішок при багаторівневому введенні зернового матеріалу в ПСК, яка дозволяє отримати усереднені траєкторії домішок після взаємодії з зерновими шарами під час аеродинамічного розділення.



$1з - 6з$ – траєкторії руху зернової фракції відповідно з 1 по 6 рівень введення; $1дбк - 6дбк$ – траєкторії безконтактного руху домішок з 1 по 6 рівень введення; $1дк - 5дк$ – траєкторії контактної руху домішок з 1 по 5 рівень введення

Рисунок 2 – Траєкторії руху легких домішок з врахуванням контактної взаємодії з зерновими шарами при багаторівневому введенні матеріалу

Визначено, що виділення легких домішок залежить від їх часу та швидкості проходження через зернові шари, що змінюються залежно від кута контакту домішок з зерном, а також від місця встановлення верхньої точки жалюзійної стінки $h_{ж.в.}$. При шестирівневому введенні матеріалу з розміщенням зернових часток в напрямку руху в ПСК з проміжком рівним їх розміру ($2R$) місце встановлення верхньої точки жалюзійної стінки $h_{ж.в.}$, повинно знаходитись на висоті $h_{ж.в.} = 0,05 \dots 0,055$ м відносно I рівня введення.

Метою подальших досліджень повинно бути визначення якісної характеристики пневмосепарації при контактній взаємодії зернового матеріалу з повітряним потоком при його багаторівневому введенні в ПСК.

Список літератури

1. Котов, Б.І. Аналітичні дослідження раціональної подачі зернової суміші в аспіраційний канал пневмовідцентрових сепараторів [Текст] / Б.І. Котов, С.П. Степаненко, В.О. Швидя // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2010. – Вип. 103. – С. 54-61

2. Тавтилов, И.Ш. Совершенствование процесса работы пневмосепаратора за счет рациональной подачи зерновой смеси в воздушный поток : автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.01 „Технологии и средства механизации сельского хозяйства” [Текст] / Ильфат Шайдуллоевич Тавтилов ; Челябинский государственный агроинженерный университет. – Челябинск, 2008. – 22 с.
3. Матвеев, А.С. Изучение процесса взвешивания и сепарирования зернистого материала вертикально-восходящим воздушным потоком [Текст] / А.С. Матвеев // Труды ВИМ. – Т.37. – М.: 1965. – С. 231-241.
4. Котов, Б. І. До теорії розділення зерна в повітряному потоці [Текст] / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя, [та ін.] // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2009. – Вип. 39. – С. 54–62.
5. Nesterenko, O.V. Analytical study of separation efficiency of grain in vertical pneumatic separating channel [Text] / O.V. Nesterenko S. Leschenko, D. Petrenko, S. Honcharova // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2015. – Вип. 45; Ч. 1. – С. 14 – 20.
6. Нестеренко, О.В. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введенні зерна [Текст] / О.В. Нестеренко, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко // Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка. Технічні науки. Харків, 2015. – Вип. 156. – С. 35–42.
7. Хамуев, В.Г. Интенсивность выделения легкой примеси в вертикально восходящем воздушном потоке [Текст] / В.Г. Хамуев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – №5. – С. 12-16.
8. Перцовский, Е.С. К теории очистки зерна в пневматическом сепараторе [Текст] / Е.С. Перцовский // Труды ВНИИЗ. – М., 1970. – Вып. 68. – С. 55-86.
9. Перцовский, Е.С. Основы теории очистки зерна в пневматическом сепараторе [Текст] / Е.С. Перцовский // Тр. ВНИИЗ. – М., 1974. – Вып. 78. – С. 105-118.

Oleksandr Nesterenko, PhD tech. sci., Dmytro Petrenko, Assos. Prof., PhD tech. sci., Ivan Pavlenko, Prof., DSc., Sergey Leschenko, Assos. Prof., PhD tech. sci., Svitlana Honcharova, Assos. Prof., PhD phys. &math.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analytical Research the Contact Interaction of Light Impurities in the Pneumatic Separating Channel

The separation of grain materials in the air separation channel occurs in rather difficult conditions, since light impurities, which are located in the lower cereal layers for the separation into the sediment chamber, require, with a minimum change in trajectory, to cross all above-placed seed moving in a downward direction. As a result of this movement there is a contact between light impurities and grain, which significantly affects the quality of cleaning.

Therefore, a very important task is the analytical research aimed at investigating the contact interaction of light impurities with grain in the air separation channel and its effect on the quality of separation.

Taking into account the multilevel feeding of the material in the PSC it is necessary to determine its influence on the qualitative parameters of the separation process and the establishment of the basic laws of the interaction of light impurities with grain material in the working area of the PSC.

As a result of the theoretical analysis, the regularity of the contact motion of light impurities is established at the multilevel feeding of grain material in the PSC, which allows to obtain the averaged trajectories of impurities after interaction with grain layers during aerodynamic separation.

It is determined that the allocation of light impurities depends on their time and velocity through the grain layers, which vary depending on the angle of contact of impurities with grain, as well as from the place of installation of the upper point of the output of grain $h_{ж.в.}$. With six-level introduction of the material with the placement of grain particles in the direction of movement in the PSC with an interval equal to their size ($2R$) the place of installation of the upper point of the output of grain $h_{ж.в.}$ must be at a height $h_{ж.в.} = 0,05 \dots 0,055$ m relative to the level I of the input.

The purpose of further researches should be to determine the qualitative characteristics of pneumatic separation in the contact interaction of grain material with air flow at its multilevel introduction into the PSC.

pneumatic separation, air velocity, multilevel feeding, grain material, pneumatic and separating channel (PSC), contact motion of light impurities

Одержано 27.12.17