

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

НЕСТЕРЕНКО ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 631.362.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПНЕВМОСЕПАРУЮЧОГО КАНАЛУ
З БАГАТОРІВНЕВИМ ВВЕДЕННЯМ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ**

Спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського
виробництва

Галузь знань 05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.В. Нестеренко

Науковий керівник:
Лещенко Сергій Миколайович,
кандидат технічних наук, доцент

Кропивницький – 2017

АНОТАЦІЯ

Нестеренко О.В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». – Центральноукраїнський національний технічний університет МОН України, Кропивницький, 2017.

У роботі запропоновано новий напрямок інтенсифікації пневмосепарації та вирішено наукове завдання підвищення якості очищення зерна шляхом розробки і обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу (ПСК) з багаторівневим введенням зернового матеріалу.

В першому розділі проведений аналіз основних результатів досліджень, огляд технічних засобів та їх живильних пристроїв для пневмосепарації зернового матеріалу, означені основні фактори, які впливають на ефективність очищення зерна та визначені напрямки інтенсифікації процесу аеродинамічного розділення зернового матеріалу.

В результаті аналізу визначено, що основною причиною погіршення ефективності пневмосепарації є нерівномірність поля швидкостей повітряного потоку, в результаті незадовільного розподілу зернового матеріалу в зоні сепарації, що суттєво впливає на якість очищення зерна.

Для вирішення цієї проблеми в роботі запропоновано конструкцію пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу, яка дозволяє забезпечити його рівномірне розміщення в ПСК, суттєво зменшити опір та вирівняти поле швидкостей повітряного потоку в зоні введення та виведення очищеного зерна.

У другому розділі проведений аналіз руху зернового матеріалу по напрямним поверхням живильного пристрою та в робочій зоні сепарації.

Виходячи з умови забезпечення горизонтального напрямку та однакової швидкості введення зернових частинок в ПСК по всім напрямним поверхням живильного пристрою, отримано закономірність швидкості руху матеріалу по гравітаційній кривій в залежності від її основних параметрів, кута нахилу α , довжини розгінної ділянки L_p , радіуса дуги r та визначено їх раціональні значення. Встановлено, що для забезпечення заданої швидкості введення зернового матеріалу $v_g = 0,5 \dots 0,6$ м/с довжина розгінної ділянки повинна бути $L_p = 0,2$ м, кут її нахилу $\alpha = 33^\circ$, радіус дуги направляючої $r = 0,15$ м.

В результаті теоретичного аналізу визначено закономірність руху легких домішок з урахуванням їх контактної взаємодії з зерном при багаторівневому введенні матеріалу, на основі якої отримані усереднені значення швидкості і часу проходження домішок через i -ий зерновий шар.

Проведений кількісний розподіл легких домішок залежно від точки контакту домішки з зерном, в результаті якого в програмі MATCAD отримано статистичну оцінку якості процесу пневмосепарації з багаторівневим введенням зернового матеріалу. Побудовані варіаційні криві розподілу легких домішок та визначено їх відсотковий вміст в очищеному зерні для кожного рівня введення, та загальна кількість легкої фракції, яка виділилась в осадову камеру.

З врахуванням коефіцієнту розрідження зернового потоку, який характеризує щільність розміщення зернових частинок в горизонтальному напрямку, отримано залежність повноти розділення легких домішок від питомого навантаження на одиницю ширини пневмосепаруючого каналу при різних кількості задіяних рівнів введення.

В третьому розділі розроблена програма і методика експериментальних досліджень, яка дозволила дослідити основні параметри пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення матеріалу. Запропонована оригінальна методика визначення швидкості введення, основана на вимірюванні реальних координат зернової частинки в каналі.

В четвертому розділі експериментально підтверджено аналітичні дослідження та визначено основні параметри та режими роботи

запропонованого пневмосепаратора, які дозволяють отримати найвищу ступінь очищення з мінімальними втратами повноцінного зерна в відходах.

У роботі проведено оцінку впливу щільності розміщення компонентів зернового матеріалу в робочій зоні ПСК на їх опір повітряному потоку, в результаті якої визначено, що при вертикальному розміщенні зернових шарів в ПСК, за умови одношарового введення, мінімальна відстань між ними повинна бути не менше 5...6 мм, що сприятиме забезпеченню мінімально стабільного опору повітряному потоку.

Досліджено вплив способу введення зернового матеріалу на рівномірність поля швидкостей повітряного потоку в робочій зоні ПСК. Встановлено, що найбільш рівномірне поле швидкостей повітряного потоку для питомих навантажень на рівень живильного пристрою $q_{bi} = 250...350$ кг/дм·год, при якому забезпечується одношарове введення зернового матеріалу, спостерігається при міжрівневій відстані $h_{m.p.} = 30$ мм.

В результаті проведення статистичного математичного моделювання отримані раціональні значення основних параметрів і режимів роботи пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу. Визначено, що застосування багаторівневого введення зернового матеріалу дозволяє суттєво вирівняти поле швидкостей в робочій зоні ПСК та наблизити середню швидкість повітряного потоку V_n до швидкості витання основного зерна $V_{в.з.}$, раціональних значеннях якої становить $V_n = 7,5...8$ м/с. При цьому для забезпечення мінімальних втрат зерна в відходах $z \leq 2\%$, значення глибини каналу повинно бути в межах $C = 100...110$ мм.

В роботі проведена оцінка роботи пневмосепаруючого каналу для різного призначення очищення зерна. Встановлено, що кількість рівнів n і питома подача на рівень живильного пристрою q_{bi} є взаємозалежними факторами. Для їх раціонального вибору необхідно виходити з умови: $q_B \rightarrow \max$ при $\varepsilon \rightarrow \text{opt}$, $n \rightarrow \text{opt}$. При цьому, для досягнення повноти розділення зернового матеріалу $\varepsilon = 70...75\%$ та мінімальних втратах зерна в відходах $z \leq 2\%$, область

раціональних значень кількості задіяних рівнів живильника знаходиться в межах $n = 4 \dots 6$ шт. при питомому навантаженні $q_{bi} = 250 \dots 350$ кг/дм·год.

Проведена порівняльна оцінка роботи пневмосепаратора для традиційного та вдосконаленого способу введення зернового матеріалу, в результаті якого визначено, що використання живильного пристрою для багаторівневого введення зерна дозволяє підвищити повноту розділення домішок на 12...25%.

У п'ятому розділі розроблено методику інженерного розрахунку основних параметрів запропонованого пневмосепаратора для його практичного застосування, приведені результати виробничих випробувань.

Розрахунки економічної ефективності від впровадження запропонованого пневмосепаратора у виробництво підтвердили доцільність внесених змін в його конструкцію. Економічний ефект для споживача при застосуванні вдосконаленого пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу станом на 07.03.2017 р. складає 20477 грн. на одну машину в рік.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- вперше обґрунтовано можливість підвищення якості роботи вертикальних ПСК шляхом забезпечення багаторівневого введення зернового матеріалу та виведення очищеного зерна;
- дістав подальшого розвитку математичний аналіз процесу пневмосепарації, що враховує контактну взаємодію домішок з зерном при багаторівневому введенні зернового матеріалу та дозволяє оцінити її вплив на якість очищення;
- розроблена математична модель, яка дозволяє аналітично визначити і кількісно оцінити вплив переміщення домішок на переміщення зерна та встановити залежність повноти розділення домішок від питомого навантаження ПСК;
- вперше отримані експериментальним шляхом закономірності впливу основних конструктивних параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу на якісні показники його роботи.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено технічну документацію на виготовлення дослідного зразка пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна і передано на виробництво до ПП «Савицький М.І.» (м. Кропивницький). Також розроблені та виготовлені дослідні зразки ПСК з живильними пристроями для багаторівневого введення зернового матеріалу, які встановлені на серійні зерноочисні машини: А1-БМС-6, ЗСМ-20 та «РЕТКУС К 531 GIGANT». Ці машини випробувано в умовах ТОВ «Тіньки» Чигиринського району, Черкаської області, ФГ «ЛПК» с. Нова Прага Олександрійського району, Кіровоградської області та ДП «ДГ «Ставидлянське» Кіровоградської державної дослідної станції НААН України». Дослідні зразки ПСК використовуються в означених сепараторах й після проведених порівняльних випробувань.

За результатами випробувань визначено, що застосування живильного пристрою для багаторівневого введення зерна в дослідних сепараторах дозволяє підвищити якість на 14...22%.

Експериментальна установка «Пневмосепаратор з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу» використовується в навчальному процесі на кафедрі сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ під час виконання студентами практичних і лабораторних робіт.

Ключові слова: багаторівневе введення, пневмосепарація, повітряний сепаратор, пневмосепаруючий канал, живильний пристрій, зерновий матеріал.

НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Васильковський М.І. Дослідження роботи пневмосепаруючого каналу на фізичній моделі / М.І. Васильковський О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, О.В. Нестеренко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград, 2006. Вип.17. С. 44–48. *(Особистий внесок здобувача: досліджено оцінку впливу щільності*

розташування матеріалу в робочій зоні сепарації на опір повітряному потоку, виконано порівняльну оцінку енергоємності змодельованого процесу з реальним зерновим матеріалом).

2. Нестеренко О.В. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / О.В Нестеренко, О.М Васильковський, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко, Д.В. Богатирьов // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград: КНТУ, 2012. Вип. 25; Ч.1. С.49-53. *(Особистий внесок здобувача: проведено огляд та аналіз сучасного стану досліджень пневмосепаруючих засобів та їх живильних пристроїв, запропоновано напрямок інтенсифікації пневмосепарації та конструкцію ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна).*

3. Нестеренко А. Теоретическое обоснование качественных показателей процесса пневмосепарации для многоуровневого введения зерна / А. Нестеренко, С. Лещенко, Д. Петренко, Д. Богатырёв, О. Кислун. // MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture. 2013. Vol.15. No.2. S. 93 – 98. *(Особистий внесок здобувача: проведено аналітичне обґрунтування процесу розділення при багаторівневому введенні зернового матеріалу та отримані залежності, що визначають вплив продуктивності на повноту розділення домішок).*

4. Нестеренко О.В. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введенні зерна / 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. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтовано умови введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал сепаратора для зменшення опору повітряному потоку і підвищення рівномірності поля його швидкостей в робочій зоні експериментально; проведено експериментальні дослідження із використанням методики планування багатofакторного експерименту).*

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. : ред.-вид. відділ ЛНТУ. Луцьк, 2015. Вип. 32. С. 143–151. *(Особистий внесок здобувача: експериментально досліджено вплив основних параметрів пневмосепаратора на якісні показники розділення матеріалу та умов його введення в пневмосепаруючий канал із використанням методики планування багатofакторного експерименту).*

6. Nesterenko O.V. Analytical study of separation efficiency of grain in vertical pneumatic separating channel / 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. *(Особистий внесок здобувача: проведено аналітичний аналіз руху зерна за умови його одношарового введення в пневмосепаруючий канал, визначено параметри при яких відбувається чітке розділення зернового матеріалу).*

7. Нестеренко О.В. Обґрунтування параметрів живильного пристрою для багаторівневого введення зернового матеріалу у вертикальний пневмосепаруючий канал / О.В. Нестеренко, Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.Я. Гончарова // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. Луцьк: ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2016. Вип. 34. С. 92–103. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтовані параметри прямої гравітаційної кривої в залежності від її основних параметрів).*

8. Нестеренко О.В. Дослідження безконтактного руху легких домішок у вертикальному пневмосепаруючому каналі / О. В. Нестеренко, Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.Я. Гончарова, Ю.В. Мельник // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 46. С. 271 – 279. *(Особистий внесок здобувача: проведено аналітичний аналіз*

безконтактного руху домішок та отримано залежність їх часу перебування в каналі від його основних параметрів; формулювання висновків).

НАУКОВІ ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Нестеренко О.В. Дослідження якісних показників роботи пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зерна // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2013. С. 135–137. *(Форма участі – очна).*

2. Нестеренко О.В. Аналіз руху зернової частки в повітряному потоці // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 108–110. *(Форма участі – очна).*

3. Нестеренко О.В. Дослідження якісних показників пневмосепарації при багаторівневому введенні зерна // Тези V всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційні технології в АПК». Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 84–86. *(Форма участі – очна).*

4. Нестеренко О.В. Дослідження основних параметрів направляючої поверхні живильного пристрою пневмосепаратора // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Крамаровські читання». К: НУБіП України, 2017. С. 129 – 131. *(Форма участі – очна).*

НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ДОДАТКОВО ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Пат. 8058А Україна, МПК В 02В1/00. Повітряний сепаратор. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна).- № u200500190; Заявл. 10.01.05; Опубл. 15.07.2005. Бюл. №7. *(Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка конструкції пневмосепаратора).*

2. Пат. 9042 Україна, МПК В 02 В 1/00. Повітряний сепаратор. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В., Косінов М.М. (Україна). № 20041008509; Заявл. 19.10.2004; Опубл. 15.09.2005. Бюл. №9. *(Особистий внесок здобувача: патентний пошук, розробка конструкції пневмосепаратора).*

3. Пат. 9586А Україна, МПК В 02 В 1/00. Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна). № а200500209; Заявл. 10.01.05; Опубл. 17.10.2005. Бюл. №10. *(Особистий внесок здобувача: патентний пошук, технічне рішення для забезпечення способу введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора).*

ANNOTATION

Nesterenko O.V. Substantiation of the parameters of pneumatic and separating channel with a multi-level inlet of grain material. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.05.11 «Machines and methods of mechanization of agricultural production». – Central Ukrainian National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kropyvnytskyi, 2017.

The thesis suggests a new direction of the intensification of pneumatic separation. The scientific task of improving the quality of grain cleaning by developing and substantiating parameters of the pneumatic separating channel with multi-level input of grain material was solved.

The first section presents the analysis of the main research results, the review of technical means and their feeding devices for the pneumatic separation of grain material. The main factors that influence the efficiency of grain cleaning and the directions of intensification of the process of aerodynamic separation of grain material have been identified.

As a result of the analysis it was determined that the main reason for the decrease of the effectiveness of pneumatic separation is the unevenness of the velocity field of the airflow as a result of unsatisfactory distribution of grain material in the separation zone. That significantly influences the quality of grain cleaning.

In order to solve this problem, the design of a pneumatic separator with a feeding device for multilevel inlet of grain material is suggested in order to ensure its uniform distribution in the pneumatic separation channel. In this way the resistance in the zone of input and output of the purified grain is substantially reduced and the field velocities of air flow is levelled.

The second section presents the analysis of the movement of grain material along the guiding surfaces of the feeding device and in the working zone of separation.

Taking into account the condition of ensuring the horizontal direction and equal velocity of inletting grain particles into the air separation channel along all guiding surfaces of the feeding device, we got the regularity of the velocity of the material along the gravitational curve depending on its basic parameters, the angle of inclination α , the length of the acceleration section L_p , the radius of the arc r , and their rational values. It has been established that in order to provide the given velocity of introduction of grain material $v_g = 0,5... 0,6$ m/s, the length of the acceleration section should be $L_p = 0,2$ m, its angle of inclination is $\alpha = 33^\circ$, the radius of the guiding arc is $r = 0,15$ m.

As a result of the theoretical analysis, the regularity of the motion of light impurities is determined taking into account their contact interaction with the grain at the multilevel inletting of the material. On this basis the average values of the velocity and time of the passage of impurities through the i -th grain layer were obtained.

The quantitative distribution of light impurities depending on the contact point of the impurity with grain was carried out. As a result the MATCAD programme presented a statistical evaluation of the quality of the process of pneumatic separation with multi-level input of grain material. The variation curves for the distribution of light impurities were designed and their percentage content in purified grains for each level of inletting was determined. The total amount of light fraction isolated in the settling chamber was defined.

Taking into account the coefficient of grain fluctuation which characterizes the density of the position of grain particles in a horizontal direction, we got the dependence of the completeness of the separation of light impurities on the specific load per a unit of width of the pneumatic and separating channel with a different number of the involved levels of inletting.

In the third section, the programme and experimental research methodology were developed which allowed studying basic parameters of the pneumatic separator with a feeding device for multilevel input of the material. An original method for determining the velocity of input is suggested. It is based on measuring the actual coordinates of a grain particle in the channel and the laboratory equipment was developed.

In the fourth section, the analytical studies have been experimentally confirmed and the main parameters and operating modes of the proposed pneumatic separator have been determined. They allow obtaining the highest degree of purification with minimal losses of grain in the waste.

The work also presents the estimation of the influence of the density of the distribution of components of grain material in the working area of the air-separating channel on their resistance of the air flow. As a result it was determined that in the vertical distribution of grain layers in the air separation channel, under the condition of single-layer inlet, the minimum distance between them should be not less than 5...6 mm, which will ensure a minimum stable resistance of the air flow.

The influence of the method of inletting grain material on the uniformity of the field of velocities of the air flow in the working zone of the separating channel was investigated. It is established that the most uniform field of velocity of the air flow for specific loads on the level of the feeding device is $q_{bi} = 250...350 \text{ kg/dm}\cdot\text{hour}$ at which a one-layer inlet of grain material is provided. The inter-equilibrium distance is $h_{m,p} = 30 \text{ mm}$.

As a result of the statistical mathematical modelling, rational values of the main parameters and operating modes of the pneumatic and separating channel with multilevel input of grain material are obtained. It is determined that application of the multilevel inlet of grain material allows substantially equalizing the field of velocities

in the working zone of the separating channel and to bring the average speed of the air flow V_n closer to the speed of the acceleration of the main grain $V_{6.3}$, with its rational values $V_n = 7.5...8$ m/s. In order to ensure minimum losses of grain in waste $z \leq 2\%$, the value of the channel depth should be within the limits of $C = 100...110$ mm.

The work presents the evaluation of the operation of the air separation channel for different purposes of grain cleaning. It is established that the number of levels n and specific feeding on the level of the feeding device q_{bi} are interrelated factors. For their rational choice it is necessary to proceed from the assumption: $q_B \rightarrow \max$ if $\varepsilon \rightarrow \text{opt}$, $n \rightarrow \text{opt}$. In this case, to achieve the completeness of the separation of grain material $\varepsilon = 70...75\%$ and the minimum grain losses in waste $z \leq 2\%$, the rational values of the number of the operating levels of the feeder is within the range of $n = 4...6$ pcs. at a specific load $q_{bi} = 250...350$ kg/dm·hour.

The comparative estimation of the work of the pneumatic separator for a traditional and improved method of inlet of grain material has been carried out. As a result it has been determined that the use of a feeding device for multilevel grain inlet allows increasing the completeness of the separation of impurities by 12...25%.

In the fifth section the method of engineering calculation of the main parameters of the proposed pneumatic separator for its practical application is developed. The results of production tests were given.

Calculations of economic efficiency of the introduction of the proposed pneumatic separator into production confirmed the feasibility of the changes made in its design. The economic effect for the consumer while using the improved pneumatic separator with a feeding device for multi-level input of grain material on 07.03.2017 is 20477 UAH per one unit per year.

The scientific novelty of the results is as follows:

- for the first time, the possibility of improving the quality of the vertical pneumatic separating channel with the multilevel input of grain material and the removal of purified grains has been substantiated;
- mathematical analysis of the process of pneumatic separation which takes into account the contact interaction of impurities with grain under multilevel input of

grain material was further developed and that allows evaluating its impact on the quality of cleaning;

- a mathematical model has been developed that allows analytically determining and quantifying the effect of impurity transfer on the movement of grain and establishing the dependence of the completeness of separation of impurities on the specific load of the pneumatic and separating channel;
- for the first time, experimental patterns of the influence of the main structural parameters of the pneumatic and separating channel with the multilevel input of grain material on the qualitative indices of its work were obtained.

The practical value of the results. The technical documentation for the production of a prototype of a pneumatic separator with a feeding device for multilevel grain input was developed and put into production at the private company "Savitskyi M.I." (Kropyvnytskyi city). Also we developed and manufactured a prototype separating channel with feeding devices for multi-level input of grain material which were installed on serial grain cleaning machines: A1-BMS-6, ZSM-20 and "PETKUS K 531 GIGANT". These machines are tested in the conditions of "Tinki" Ltd of Chyhyryn district of Cherkasy region, farm "LIK" in New Praha village of Olexandria district, Kirovohrad region and state enterprise "Stavydlyanske" of Kirovograd State Research Station of Ukraine". The experimental samples of the air separation channels are used in the indicated separators and after the comparative tests conducted.

According to the results of the tests it was determined that the use of the feeding device for multilevel grain input in experimental separators can improve the quality by 14...22%.

Experimental installation "Pneumatic separator with the feeding device for multilevel input of grain material" is used in the educational process at the Department of Agricultural Engineering at CUNTU during students' practical and laboratory work.

Keywords: pneumatic separation, air separator, pneumatic and separating channel, feeding device, multilevel feeding of grain.

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ.....	24
1.1. Основні результати досліджень пневмосепарації.....	24
1.1.1. Фактори, які впливають на ефективність пневмосепарації	24
1.1.2. Огляд досліджень по визначення якості пневмосепарації.....	33
1.2. Технічні засоби для пневмосепарації зерна	35
1.2.1. Аналіз роботи пневмосепаруючих каналів.....	35
1.2.2. Живильні пристрої в пневмосистемах ЗОМ.....	39
1.3. Обґрунтування на пряму досліджень.....	45
Висновки, мета і задачі досліджень.....	46
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПНЕВМОСЕПАРАЦІЇ З БАГАТОРІВНЕВИМ ВВЕДЕННЯМ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ	48
2.1. Аналіз об'єкту досліджень	48
2.1.1. Обґрунтування основних параметрів живильного пристрою	50
2.2. Аналіз руху зернового матеріалу в умовах багаторівневого введення.....	54
2.2.1. Рух зерна в ПСК при одношаровому введенні.....	54
2.2.2. Рух домішок в ПСК при безконтактному польоті	60
2.2.3. Дослідження контактного руху легких домішок при багаторівневій подачі зернового матеріалу в ПСК.....	67
2.3. Визначення якісних показників процесу сепарації з багаторівневим введенням зернового матеріалу по висоті ПСК	74
Висновки по розділу.....	81
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	83
3.1. Програма експериментальних досліджень	83
3.2. Визначення основних характеристик зернового матеріалу.....	84

3.2.1. Визначення аеродинамічних властивостей та засміченості зернового матеріалу.....	84
3.2.2. Визначення вологості та об'ємної маси зернового матеріалу.....	86
3.3. Дослідження впливу параметрів прямої гравітаційної кривої живильного пристрою на режими руху зернового потоку в ПСК.....	86
3.3.1. Визначення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК.....	86
3.3.2. Визначення питомого навантаження за умови одношарового введення зернового матеріалу в ПСК	88
3.4. Дослідження впливу щільності розташування матеріалу на опір ПСК в умовах його багаторівневого введення.....	89
3.5. Дослідження аеродинамічної характеристики ПСК та закономірностей руху зернового матеріалу в залежності від умов його введення.....	91
3.6. Оцінка рівномірності розподілу зернового матеріалу та визначення якісних показників пневмосепарації по висоті ПСК.....	96
3.7. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів і режимів роботи пневмосепаратора з багаторівневим введенням матеріалу в ПСК...	98
3.8. Дослідження впливу засміченості та вологості зернового матеріалу на технологічну ефективність процесу пневмосепарації.....	102
3.9. Визначення технологічної характеристики пневмосепарації зернового матеріалу в ПСК	102
Висновки по розділу.....	104
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
ПРОЦЕСУ ПНЕВМОСЕПАРАЦІЇ З БАГАТОРІВНЕВИМ ВВЕДЕННЯМ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ.....	105
4.1. Визначення основних характеристик зернового матеріалу.....	105
4.1.1. Аеродинамічні властивості компонентів зернового матеріалу.....	105
4.1.2. Вологість зернового матеріалу.....	106
4.1.3. Об'ємна вага вихідного зернового матеріалу	106
4.2. Основні параметри прямої гравітаційної кривої живильного пристрою ПСК та режими руху вхідного зернового потоку	106

4.3. Вплив щільності розташування матеріалу на опір ПСК в умовах його багаторівневого введення.....	109
4.4. Аеродинамічна характеристика ПСК залежно від умов введення зернового матеріалу та виведення очищеного зерна	111
4.5. Раціональні параметри та режими роботи пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу.....	115
4.6. Оцінка рівномірності розподілу зернового матеріалу та ступеня засміченості очищеного зерна по висоті ПСК.....	130
4.7. Вплив засміченості та вологості зернового матеріалу на ефективність пневмосепарації.....	131
4.8. Оцінка технологічної характеристики ПСК з багаторівневим введенням зернового матеріалу.....	133
Висновки по розділу.....	136
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	139
5.1. Методика інженерного розрахунку пневмосепаратора з багаторівневим введенням зернового матеріалу.....	139
5.2. Виробничі випробування пневмосепаратора та визначення економічного ефекту від його застосування	143
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	147
ДОДАТКИ	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗОМ – зерноочисна машина;

ПСК – пневмосепаруючий канал;

q_B – питоме зернове навантаження на одиницю ширини ПСК, кг/дм·год;

q_{bi} – питоме зернове навантаження на одиницю ширини ПСК на i – тий рівень живильного пристрою, кг/дм·год;

ε – повнота розділення (ефект очистки), %;

z – кількість повноцінного зерна в відходах (чіткість сепарації), %;

B – ширина ПСК, м;

C – глибина ПСК, м;

v_n – початкова швидкість руху зернового матеріалу при витіканні з бункеру, м/с;

α – кут нахилу розгінної прямолінійної ділянки живильника, град;

v_{θ} – швидкість введення зернового матеріалу в ПСК, м/с;

α_{θ} – кут введення зернового матеріалу в ПСК, град;

r – радіус дуги напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою, м;

V_n – середня швидкість повітряного потоку, м/с;

$V_{\theta.z.}$ – швидкість витання зерна (критична швидкість), м/с;

$V_{\theta.d.}$ – швидкість витання домішок (критична швидкість), м/с;

$F_{\theta.z.}$ – сила опору повітря зерновій частці, кг·м/с²;

$F_{\theta.d.}$ – сила опору повітря домішкам, кг·м/с²;

ρ – густина повітря, кг/м³;

m_z – маса усередненої зернини, кг;

m_d – усереднена маса домішок, кг;

n – кількість рівнів, шт;

$k_{n.z.}$ – коефіцієнт парусності зерна, м⁻¹;

$k_{n.d.}$ – коефіцієнт парусності домішок, м⁻¹;

R – радіус зернової частинки (домішок), м.

$G_{\text{заг}}$ – маса легкого компонента в вихідному зерновому матеріалі, кг;

$G_{\text{вид}}$ – маса виділених повітряним потоком легких домішок, кг;

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день Україна є одним з найбільших виробників зерна [1] і входить в трійку світових експортерів зернових культур [2], що суттєво впливає на економічний стан держави та її продовольчу безпеку. Проте, незважаючи на збільшення обсягів вирощування зернових, забезпечення необхідної якості продовольчого зерна неможливо без впровадження інтенсивних технологій його виробництва.

Проблемним етапом доведення зерна до необхідних кондицій за чистотою є його післязбиральне очищення. Повітряним потоком виділяють легкі домішки практично на всіх етапах очищення зерна, а тому від ефективності пневмосепарації залежить якість готового продукту. Незважаючи на універсальність пневмосепарації, якісні показники її роботи у виробничих умовах залишаються низькими, а сепаратори, які використовуються для вказаних цілей в більшості господарствах є застарілими та енергоємними [3].

Аналіз роботи існуючих пневмосистем показав, що вагомим фактором, який впливає на якість пневмосепарації, є нерівномірність епюри поля швидкостей повітряного потоку, що виникає внаслідок збільшення аеродинамічного опору в зонах введення та виведення зерна. Вирішення означеної проблеми можливо шляхом застосування живильних пристроїв, які дозволять зменшити опір повітряного потоку шляхом рівномірної подачі зернового матеріалу в робочу зону пневмосепарації.

Отже, дослідження, спрямовані на підвищення якості роботи пневмосепаруючих каналів (ПСК) зерноочисних машин (ЗОМ) шляхом застосування нових живильних пристроїв, що дозволяють покращити рівномірність розподілу зернового матеріалу в зоні сепарації, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до «Державної цільової програми реалізації технічної політики в агропромисловому комплексі на період до 2015 року» (затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 7 серпня 2013 р. №863).

Тема роботи пов'язана з тематичним планом НДКР Центральноукраїнського національного технічного університету №24.Д108 «Підвищення ефективності роботи пневмосистем зерноочисних машин» (Державний реєстраційний номер 0108U010432) на 2010-2017 рр., з «Концепцією Державної цільової економічної програми впровадження в агропромисловому комплексі новітніх технологій виробництва сільськогосподарської продукції на період до 2016 року», а також відповідно до «Державної цільової програми розвитку українського села на період до 2015 року», затвердженої Кабінетом Міністрів України (Постанова №875 від 4.12.2013 р.).

Дослідження виконувалися згідно держбюджетної тематики з Міністерством освіти і науки України і комплексом робіт, які проводились в ЦНТУ за держбюджетною темою «Науково-технологічні основи та технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання» на 2012-2014 рр. (Державний реєстраційний номер 0112U001105).

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення якості пневмосепарації шляхом обґрунтування параметрів ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- обґрунтувати конструкцію робочого органа з багаторівневим введенням, яка забезпечить рівномірний розподіл зернового матеріалу та підвищить рівномірність поля швидкостей повітряного потоку в робочій зоні ПСК;
- дослідити взаємодію компонентів зернового матеріалу з повітряним потоком за умов однорівневого та багаторівневого введення;
- встановити закономірності впливу основних конструктивно-технологічних параметрів ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу на якісні показники процесу сепарації;
- визначити раціональні значення основних параметрів і режимів роботи запропонованої конструкції пневмосепаратора;

- встановити закономірності впливу фізико-механічних властивостей зернового матеріалу та величини питомого навантаження ПСК на основні технологічні показники його роботи;
- розробити методику інженерного розрахунку запропонованого ПСК та провести техніко-економічну оцінку ефективності його використання.

Об'єкт дослідження – процес повітряної сепарації у вертикальному ПСК з багаторівневим введенням зернового матеріалу.

Предмет дослідження – вплив конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи ПСК з багаторівневим введення зернового матеріалу на якість пневмосепарації.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводились з використанням основних положень теоретичної механіки, диференціального та інтегрального числення, елементів теорії ймовірності, математичного аналізу і моделювання. Експериментальні дослідження виконувалися у лабораторних умовах з використанням математичного планування багатофакторних експериментів на розробленій експериментальній установці за стандартними та оригінальними методиками з використанням виготовлених моделей та натурних зразків робочих органів і приладів. Обробка результатів експериментальних досліджень проводилися з застосуванням математичної статистики за допомогою пакетів прикладних програм «MathCAD 15», «Microsoft Office 2010», «STATISTICA 10».

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна результатів полягає у наступному:

- вперше обґрунтовано можливість підвищення якості роботи вертикальних ПСК шляхом забезпечення багаторівневого введення зернового матеріалу та виведення очищеного зерна;
- дістав подальшого розвитку математичний аналіз процесу пневмосепарації, що враховує контактну взаємодію домішок з зерном при багаторівневому введенні зернового матеріалу та дозволяє оцінити її вплив на якість очищення;

- розроблена математична модель, яка дозволяє аналітично визначити і кількісно оцінити вплив переміщення домішок на переміщення зерна та встановити залежність повноти розділення домішок від питомого навантаження ПСК;
- вперше отримані експериментальним шляхом закономірності впливу основних конструктивних параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу на якісні показники його роботи.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами досліджень розроблені та виготовлені дослідні зразки живильних пристроїв, які встановлені на серійні зерноочисні машини: А1-БМС-6, ЗСМ-20 та «РЕТКУС К 531 GIGANT». Ці машини пройшли виробничі випробування та працюють в ТОВ «Тіньки» Чигиринського району Черкаської області, ФГ «ЛПК», с. Нова Прага Олександрійського району Кіровоградської області та ДП «ДГ «Ставидлянське» Кіровоградської державної дослідної станції Національної академії аграрних наук України.

За результатами випробувань визначено, що застосування живильного пристрою для багаторівневого введення зерна в дослідних сепараторах дозволяє підвищити якість очищення зерна в ПСК на 14...22%.

Новизна запропонованих технічних рішень підтверджена трьома патентами на корисні моделі. Запропонована розробка може бути використана як для створення нових, так і для ефективного вдосконалення існуючих пневмосистем ЗОМ з вертикальними ПСК.

Експериментальна установка «Пневмосепаратор з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу» використовується в навчальному процесі на кафедрі сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ під час виконання студентами практичних і лабораторних робіт.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи здобувачем одержані самостійно. В роботах, написаних у співавторстві, авторові належить наступне: аналіз перспективних напрямків вдосконалення

повітряних сепараторів [4]; обґрунтування раціональних умов введення зернового матеріалу в ПСК для досягнення максимального технологічного ефекту [5, 6]; аналітичне визначення закономірності процесу розділення зернового матеріалу в ПСК, що пов'язує його основні параметри з технологічними показниками роботи [7, 8, 9]; експериментальні дослідження, обробка результатів за допомогою ПК [10, 11].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи були заслухані й обговорені на IX-X Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (Кіровоградський національний технічний університет, 2013, 2015 рр.) [12, 13], на XIII, XX Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес в сільськогосподарському виробництві» (ІНЦ «ІМЕСГ»), на V Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (Луцький національний технічний університет, 2015 р.) [14], на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Крамаровські читання» (Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2017 р.) [15], на щорічних наукових конференціях професорсько-викладацького складу Кіровоградського національного технічного університету (2004-2017 рр.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному науковому семінарі кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету МОН України.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені в 7 наукових статтях, опублікованих у наукових фахових виданнях України, 1 статті в закордонному виданні та в 4 тезах наукових доповідей. Отримано 3 патенти України на корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, додатків та списку використаних джерел. Роботу викладено на 201 сторінці, з них 146 сторінок основного тексту, на яких розміщені 60 рисунків, 8 таблиць та 9 додатків. Список використаних джерел складається із 125 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ

1.1. Основні результати досліджень пневмосепарації

1.1.1. Фактори, які впливають на ефективність пневмосепарації

Розділення зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями відбувається в ПСК, від ефективності роботи якого залежать якісні показники пневмосепараційного процесу та ЗОМ вцілому.

Дослідженнями І.П. Безручкіна [16], В.В. Боцманова [17], С.С. Шклярова [18, 19], А.Г. Демського [20-22], А.Я. Маліса, А.Р. Демідова [23, 24], А.І. Нелюбова, Є.Ф. Вєтрова [25], В.Ф. Ведєньєва [26], С.С. Ямпілова [27-29] А.С. Матвєєва [30-33], В.Л. Злочевського [34-36], З.Л. Тіца [37], М.П. Сичугова, А.І. Буркова [38, 39], В.Е.Саїтова [40], М.М. Петренка [41], П.М. Заїки [42], Л.М. Тищенко [43], В.В. Бредихіна [44], М.В. Бакума [45, 46], Б.І. Котова [47-49], А.К.Турова [50, 51], С.В. Корнєєва [52], В.П. Єрмака [53, 54], І.Т. Коврікова [55, 56], І.Ш. Тавтілова [57], М.І. Васильковського [58, 59], О.М. Васильковського [60], С.П. Степаненка [61], Д.І. Петренка [62], С.М. Лещенка [63], В. О. Швиді [64] та ін. визначені фактори, які найбільше впливають на якісні показники процесу пневмосепарації. До них можна віднести наступні: питоме зернове навантаження; рівномірність поля швидкостей повітряного потоку; рівномірність подачі матеріалу; концентрація зернового матеріалу в ПСК; швидкість введення; час взаємодії матеріалу з повітряним потоком; швидкість повітряного потоку.

Основним же критерієм можливості розділення зернового матеріалу повітряним потоком є відмінність швидкостей витання основного зерна та сторонніх домішок, від якого залежить ефективність процесу сепарації. Вірогідність повного розділення зернового матеріалу можлива при різних

інтервалах значень швидкості витання компонентів, тому низька їх вирівняність погіршує ефект очистки та чіткість сепарації.

Швидкість витання зерна визначається з виразу [37]:

$$V_{\text{в.з.}} = \sqrt{\frac{2m_z}{kF\rho}} \quad (1.1)$$

де m_z – вага насінини в шарі зерна, кг;

F – міделевий переріз зернової частки, м²;

k – коефіцієнт аеродинамічного опору;

ρ – щільність повітряного середовища, кг/м³.

На швидкість витання зерна $V_{\text{в.з.}}$ суттєво впливає ступінь концентрації зернового матеріалу в ПСК, і від чого, в значній мірі, залежать якісні показники процесу пневмосепарації – ефект очистки ε та чіткість сепарації z [30]. При збільшенні концентрації матеріалу в ПСК відбувається також і підвищення швидкості повітряного потоку в міжзерновому просторі [18].

Дослідженнями [24, 65, 66] визначено, що швидкість повітряного потоку в міжзерновому просторі завжди більша за швидкість повітря у вільному від зернового матеріалу перерізі ПСК.

Середня швидкість повітряного потоку в міжзерновому просторі визначається рівнянням Дюпюї [67]:

$$V_{\text{м.з.}} = \frac{V_n}{\mu_z}, \quad (1.2)$$

де $V_{\text{м.з.}}$ – дійсна середня швидкість потоку в міжзерновому просторі, м/с;

V_n – середня швидкість потоку в вільному від матеріалу каналі, м/с;

μ_z – коефіцієнт пористості.

$$\mu_z = \frac{V - V_q}{V}, \quad (1.3)$$

де V – об'єм всього шару зернового матеріалу, м³;

V_q – об'єм всіх часток шару зернового матеріалу, м³.

Н.І. Сиромятніков [68], на основі досліджень пневмосепарації визначив експоненціальний закон розподілення часток по висоті ПСК:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-A \cdot h}, \quad (1.4)$$

де μ – пористість матеріалу на висоті ПСК;

μ_0 – пористість матеріалу на сітці;

h – висота шару зернового матеріалу, який досліджувався, м;

A – коефіцієнт, пропорційний кінетичній енергії частинки.

В роботі В.О. Швиді визначено критичне значення пористості $\mu_{кр}$ при одношаровій подачі зерна відцентровим робочим органом в ПСК [64]. Автором отримана залежність швидкості повітряного потоку в міжзерновому просторі, яка виражена через пористість зернового шару μ (рис.1.1).

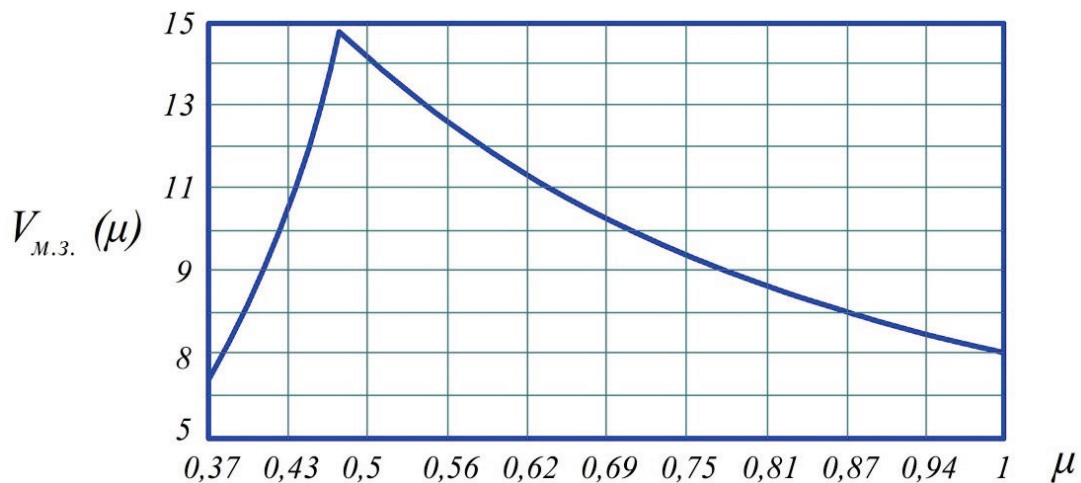


Рис. 1.1. Залежність швидкості повітряного потоку в міжзерновому просторі $V_{м.з.}(\mu)$ від пористості μ зернового шару матеріалу пшениці

Зменшення пористості зернового шару призводить до збільшення швидкості повітряного потоку в міжзерновому просторі, але до певного значення $\mu_{кр}$; при подальшому зменшенні пористості швидкість повітряного потоку падає, зазначає автор [64].

На ступінь концентрації і, відповідно, на пористість зернового матеріалу в ПСК суттєво впливає величина питомого навантаження q_B . Як відзначається в роботі [18], збільшення питомого навантаження призводить до стиснення повітряного потоку, внаслідок зміни концентрації зернової маси.

Дослідження А.В. Демського [20, 21], А.Я. Маліса [69], А.Р. Демідова [23], В.А. Кубишева [70, 71], А.С. Матвєєва [31, 32], М.П. Сичугова, А.І. Буркова [38, 39], С.С. Ямпілова [27, 28] та ін. підтверджують, що питоме навантаження на одиницю ширини ПСК q_B суттєво впливає на ефективність пневмосепарації.

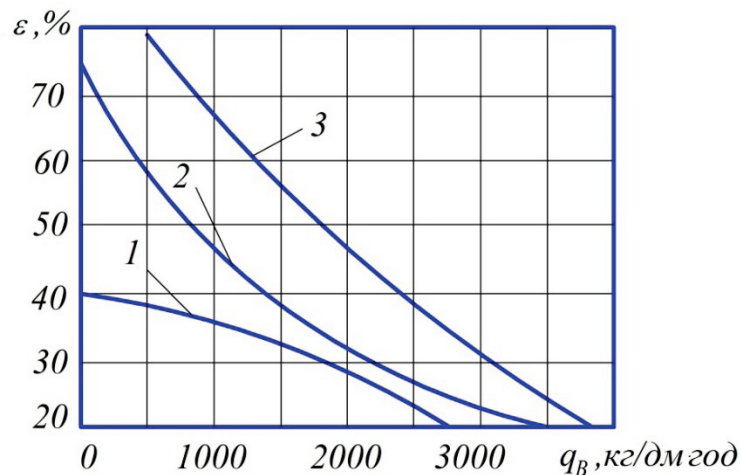


Рис. 1.2. Залежність ефекту очистки ε від питомого навантаження q_B :
1 – ЗСМ-50, 2 – ЗС-50; 3 – за результатами досліджень А.Я. Маліса [23]

Зменшення ефекту очистки при підвищенні питомого навантаження q_B (рис. 1.2), пояснюється збільшенням товщини і опору шару зернового матеріалу, що призводить до зростання взаємодії компонентів та негативно впливає на рівномірність поля швидкостей повітряного потоку, внаслідок чого погіршуються умови виділення легких домішок, які знаходяться в нижніх шарах зернового матеріалу [23, 69]. Ще більший вплив на якість очищення питома навантаження на ПСК має в виробничих умовах (рис. 1.2, криві 1, 2).

Товщина шару зернового матеріалу, який вводиться в ПСК, залежить не тільки від питомого навантаження, а також від його швидкості введення v_e і об'ємної ваги γ . Якщо прийняти початкову швидкість і об'ємну вагу матеріалу постійними, то величина питомого навантаження буде повністю визначати товщину шару зернового матеріалу.

Деякі дослідники [37] вважають, що швидкість введення матеріалу повинна бути мінімальною, інші [23] стверджують, що ефект очистки буде максимальний при швидкості введення $v_e = 0,3$ м/с, і що її можна вважати оптимальною, відмічаючи при цьому, що напрямок не суттєво впливає на

ефективність сепарації. За таких умов, від швидкості введення матеріалу залежить продуктивність ПСК, яка визначається за формулою:

$$Q_{\text{ПСК}} = v_{\text{в}} \cdot h_0 \cdot b_0 \cdot \gamma, \quad (1.5)$$

де h_0, b_0 – товщина та ширина шару матеріалу, який вводиться, м;

γ – об'ємна вага зернового матеріалу, кг/м^3 .

Таким чином, зменшення швидкості введення призводить до мінімізації продуктивності ПСК, при цьому погіршуються умови виділення домішок внаслідок збільшення товщини шару матеріалу.

Більшість дослідників [20, 21, 31] вважають, що для отримання максимальної ефективності розділення зернового матеріалу раціональне значення швидкості введення в ПСК повинно знаходитись в межах 0,4...0,6 м/с.

Дослідженнями [37] встановлено, що виділення легких домішок з шару зернової маси, яка знаходиться в ПСК відбувається за експоненційним законом:

$$G = G_0(1 - e^{kt}), \quad (1.6)$$

де G – маса легкої фракції, кг;

t – час, за який виділяється частка, с;

G_0 – кількість легкого компоненту в вихідному матеріалі, кг;

k – коефіцієнт сепарації, с^{-1} .

З рівняння (1.6) видно, що збільшення виділення легкого компоненту залежить від часу сапарації, який в свою чергу, визначається рухом частинки від передньої до задньої стінки, що відповідає глибині ПСК C , а також залежить від швидкості введення зернового матеріалу $v_{\text{в}}$.

В роботі [23] встановлено, що зі збільшенням глибини каналу ефективність сепарації зростає (рис. 1.3) і, досягаючи максимуму при певних значеннях C , починає зменшуватись. Визначено, що максимально ефективне розділення зернового матеріалу можливе в вертикальних ПСК з глибиною 80...100 мм., при цьому величина питомого навантаження знаходиться в межах $q_B = 200...500 \text{ кг/дм} \cdot \text{год}$.

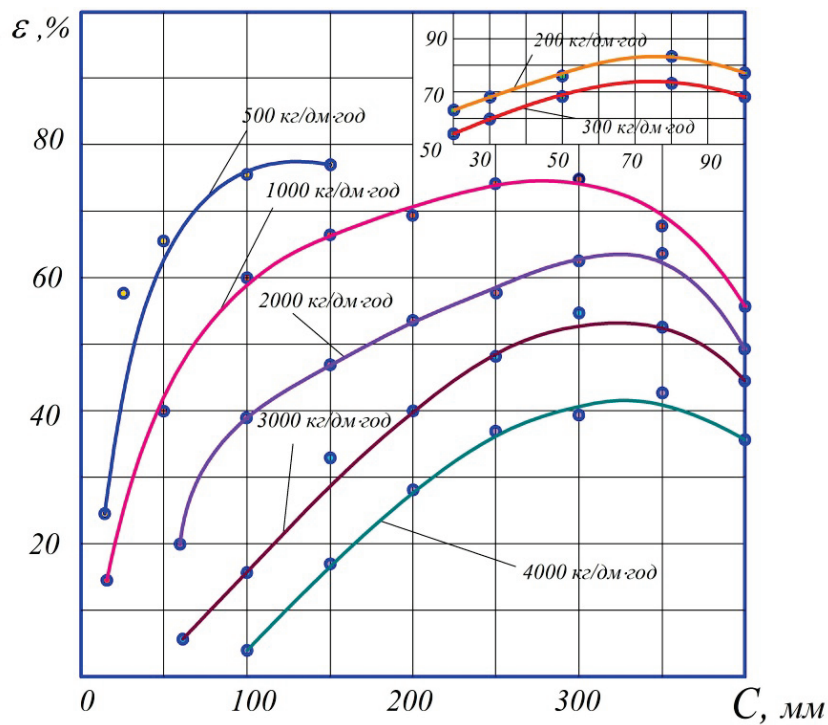


Рис. 1.3. Графік залежності ефекту очистки ε зерна від глибини каналу C , при $H_l = 800$ мм, $v_g = 0,3$ м/с

Ще одним фактором, який впливає на час взаємодії зернового матеріалу з повітряним потоком, є кут введення в ПСК α_g , при цьому, ступінь його впливу на якісні показники очищення є неоднозначним. Наприклад, якщо зерновий матеріал спрямувати в ПСК під гострим кутом донизу, то всі частинки будуть рухатись по спадаючій траєкторії. І для того, щоб легкі домішки могли потрапити в осадову камеру, вони мають змінити напрямок руху на зростаючий, що ускладнює їх виділення. Тобто, з одного боку, при введенні під гострим кутом збільшується час взаємодії з повітряним потоком, а з іншого, зменшується ймовірність виділення легких домішок.

Дослідження [21] показують, що при горизонтальному напрямку введення матеріалу ($\alpha_g = 0$), ефективність сепарації підвищується на 15-18%. Пояснюється це тим, що за таких умов зерновий потік швидше розшаровується, щільність його зменшується, і взаємодія часток слабшає, умови руху потоку наближуються до умов незалежного руху поодиноких часток. І навпаки, для кутів $\alpha_g > 0$ щільність зернового потоку збільшується, і лише ближче до протилежної стінки каналу він розрихлюється.

Авторами [21] рекомендується вводити зерновий матеріал в ПСК під кутом $\alpha_g = 0 \dots 10^\circ$, зі швидкістю $v_g \approx 0,5$ м/с, що сприяє виділенню домішок.

Одним з факторів, який впливає на процес пневмосепарації та його якісні показники, як підтверджують дослідження А.Я. Маліса [23], А.С. Матвєєва [30, 32, 33], А.Б. Демського [22], В.Л. Злочевського [34], С.С. Шклярова [18, 19] та ін., є середня швидкість V_n та структура повітряного потоку.

Максимальне значення середньої швидкості повітряного потоку залежить від конструкції ПСК, його розмірів, питомого навантаження та умов введення зернового матеріалу [18, 33, 120-123]. Встановлено [34], що збільшення значення V_n сприяє підвищенню ефекту очистки на 8...10%, але при цьому використання режимів з підвищеними швидкостями повітряного потоку призводить до збільшення в відходах маси «важких класів». Відповідно, запас діапазону збільшення швидкості повітряного потоку достатній для ефективного виділення домішок, але при цьому потрібно забезпечити задовільну рівномірність поля швидкостей повітряного потоку по всій площі робочої зони пневмосепаруючого каналу.

Дослідження А.С. Матвєєва [31 – 33], А.Б. Демського [20 – 22], І.П. Безручкіна [16, 72, 73], А.Я. Маліса [69], А.Р. Демідова [23], С.С. Шклярова [18, 19], В.Л. Злочевського [34 – 36], З.Л. Тіца [37], М.М. Петренка [41], А.І. Нелюбова, Є.Ф. Вєтрова В.Ф. [25], В.Ф. Вєдєньєва [26], М.П. Сичугова [74], А.І. Буркова [75], С. С. Ямпілова [29], А.К.Турова [51], С.В.Корнєєва [52], В.Е.Саїтова [40], Б. І. Котова [47], С.П. Степаненка [61], С.М. Лещенка [63, 76], Д.І. Петренка [62], В.О. Швиді [64] та ін. дозволили встановити, що важливою умовою отримання якісного розділення зернового матеріалу є отримання рівномірного поля швидкостей повітряного потоку.

Рівномірність поля швидкостей повітряного потоку характеризується ступенем наближення величини швидкості потоку в окремих точках поперечного перерізу ПСК до деякої середньої величини.

Ступінь нерівномірності повітряного потоку прийнято оцінювати коефіцієнтом варіації δ :

$$\delta = \frac{\sigma}{V_n} \cdot 100\%, \quad (1.7)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення швидкостей в окремих точках поперечного перерізу ПСК від середньої швидкості повітряного потоку, м/с;

V_n – середня швидкість повітряного потоку, м/с.

На рівномірність повітряного потоку впливають декілька факторів, одним з яких є режим повітряного потоку, який залежить від в'язкості повітря, його швидкості, розмірів ПСК та способу і величини завантаження каналу зерновим матеріалом. Як видно з графіка (рис. 1.4), надходження зернового матеріалу в ПСК та збільшення питомого навантаження суттєво погіршує поле швидкостей, особливо в зоні введення, а також в зоні виведення, біля зовнішньої стінки [23].

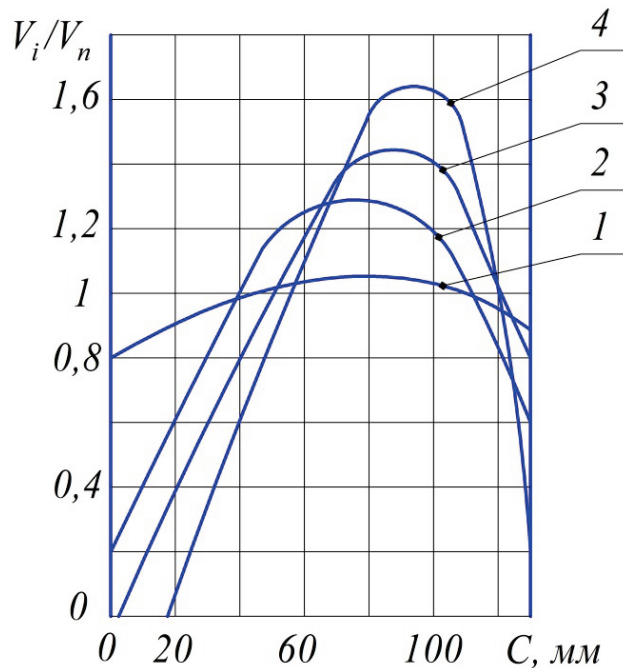


Рис. 1.4. Поле швидкостей повітряного потоку в ПСК при різному питомому зерновому навантаженні: 1 – $q_B = 0$; 2 – $q_B = 500$ кг/дм·год; 3 – $q_B = 1000$ кг/дм·год; 4 – $q_B = 2000$ кг/дм·год

Суттєво впливає на рівномірність поля швидкостей повітряного потоку також і спосіб завантаження зернового матеріалу ПСК. Експериментальні дослідження [20, 30, 69] доводять, що при рівномірній подачі зернової суміші збільшення питомого навантаження на ПСК навпаки, сприяє вирівнюванню

поля швидкостей повітряного потоку, а при нерівномірній подачі – спостерігається їх негативний перерозподіл.

Таким чином, нерівномірність швидкостей повітряного потоку погіршує ефективність сепарації, при цьому рівномірність подачі і спосіб подачі зернового матеріалу в ПСК відіграють значну роль.

Оцінку рівномірності розподілу зернового матеріалу в ПСК здійснюють за допомогою коефіцієнта нерівномірності, для чого застосовують пробовідбірники [20], які дозволяють брати пробу по всьому периметру:

$$\Delta = \frac{G_{\min}}{G_{\max}}, \quad (1.8)$$

де $G_{\max}$, $G_{\min}$, – маса зерна, відповідно, в найбільше і найменше завантаженій секції пробовідбірника, кг.

Дослідження рівномірного розподілу зернової суміші по периметру ПСК виражаються у вигляді цільової функції, розробленої Ковриковим І.Т. [55, 77], та зводяться до визначення раціональних методів виконання вимог:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n U_{ij} \cdot K_{ij} \rightarrow \max, \quad (1.9)$$

де U_{ij} – додатковий ефект від покращення рівномірності розподілу значень дальності польоту елементів зернового матеріалу, що подається i -тим елементом робочого органу на j -тій ділянці;

K_{ij} – коефіцієнт ефективності впливу кожного i -того елементу на кожній j -тій ділянці перетину ПСК.

З рівняння видно, що збільшити ефективність роботи ПСК можливо шляхом покращення рівномірності розподілу елементів зернового матеріалу по всьому периметру ПСК.

Підвищення коефіцієнта сепарації (1.6), який представляє собою ймовірність виділення легкої фракції з зернового матеріалу, також призводить до зростання повноти розділення, але оскільки він залежить від значної кількості факторів, то, як правило, визначається експериментально.

1.1.2 Огляд досліджень по визначенню якості пневмосепарації

Один із способів теоретичного оцінювання якості процесу пневмосепарації реалізовано С.М. Лещенком [63]. Запропонована автором методика передбачає проведення статистичного моделювання з застосуванням методу Монте-Карло для дослідження процесу динаміки руху частинок. Моделюванням при багаторазовому обчисленні траєкторії, згідно знайденого закону руху часток, будуються криві розподілу $\varphi_i(x)$ випадкових величин (рис. 1.5).

Кількісна оцінка якості сепарації автором представлена як відношення площі ділянок нерозділених фракцій до загальної площі тієї чи іншої фракції.

Оскільки в загальному випадку фракції мають сусідні перетини з лівого і правого боку (рис. 1.5), та з урахуванням того що кожна з площин перетину фракцій складається з двох частин, отримано:

$$k_{\varphi_i} = \frac{S_{n_i} + S_{n_{(i+1)}} + S_{n_{(i-1)}} + S_{n_i}}{S_i}. \quad (1.10)$$

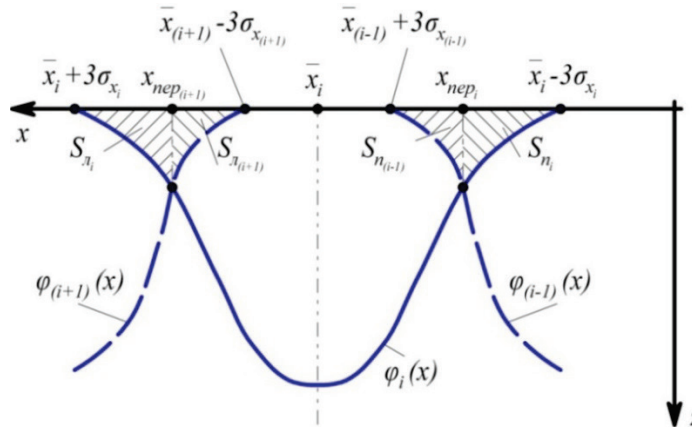


Рис. 1.5. Схема для визначення коефіцієнта сепарації зернової суміші

На основі методу Монте-Карло вдалося оцінити якісні показники виділення домішок з врахуванням закону руху часток зернової суміші.

В роботі [64] запропоновано визначення теоретичної ефективності сепарації враховуючи ймовірність виділення легких домішок як сукупність незалежних подій співвідношення об'єму легких домішок до об'єму простору, необхідного для їх виділення з зернового матеріалу (пористості):

$$E = [E_0 - e^{-kt}] \cdot 100\%, \quad (1.11)$$

де k – коефіцієнт пневмосепарації, c^{-1} ;

t – час сепарації, c ;

E_0 – кількість легких домішок в вихідному матеріалі, $кг$.

$$k = P_{пор} \cdot P_{вит} \cdot P_{рівном}, \quad (1.12)$$

де $P_{пор}$ – ймовірність виділення легкої фракції за пористістю;

$P_{вит}$ – ймовірність виділення легкої фракції за швидкістю витання;

$P_{рівном}$ – ймовірність виділення легкої фракції за рівномірністю.

На основі отриманих графічних залежностей автор [64] стверджує, що збільшення пористості зернового матеріалу, який подається у повітряний потік, сприяє підвищенню технологічної ефективності пневмосепарації.

Перцовський Е.С., використовуючи теорію ймовірностей запропонував статистичну математичну модель очищення двокомпонентної зернової суміші в вертикальному ПСК [78, 79]. Розділивши легкі домішки на дві групи, визначив кількість частинок легких домішок, що залишилась в очищеному зерні, до їх вихідної кількості в зерновому воросі, як:

$$K = 1 - \eta, \quad (1.13)$$

де η – ефект очистки;

$$K = K_1 + K_2, \quad (1.14)$$

де K_1 – частинки легких домішок, які прилипли до зерна;

K_2 – вільні частинки легких домішок;

Автором розглянуто взаємодію часток як при одношаровому, так і багатошаровому введенні зернового матеріалу та визначені теоретичні залежності впливу щільності часток, питомого навантаження, рівномірності повітряного потоку на ефективність сепарації. При введенні зерна в ПСК багатошаровим потоком величина K_2 залежить від початкових умов розміщення її в зерновій масі, а також від відстані між сусідніми шарами зерна. При цьому, зменшення відстані між сусідніми зерновими частинками нижче критичного

значення призводить до погіршення якості пневмосепарації [79]. Але складність використання такої моделі на практиці обмежується через те, що внаслідок зміни нерівномірності поля швидкостей повітряного потоку суттєво збільшується кількість зіштовхувань частинок зернової суміші, що важко врахувати.

З вищесказаного можна зробити висновок, що задача визначення якісних показників сепарації не вирішена повністю, оскільки досить складно врахувати дію всіх факторів, особливо при збільшенні питомого навантаження на ПСК. Це призводить до погіршення нерівномірності повітряного потоку, збільшення кількості вірогідних зіткнень частинок в зоні сепарації та потрапляння домішок в очищене зерно.

1.2. Технічні засоби для пневмосепарації зерна

1.2.1. Аналіз роботи пневмосепаруючих каналів

Основним робочим органом, де відбувається аеродинамічне розділення зернового матеріалу є пневмосепаруючі канали, ефективність роботи яких залежить від форми, співвідношення їх конструктивних розмірів, способу завантаження, режиму роботи та ін.

В пневмосепарації використовуються як вертикальні так і горизонтальні ПСК. Порівняльна оцінка роботи цих типів каналів показує, що якість сепарації, насамперед, залежить від концентрації матеріалу в повітряному потоці [32, 35, 37, 80, 124]. Визначено, що вертикальні ПСК забезпечують високу якість сепарації при невеликих подачах [37, 124] (рис. 1.6). Це пояснюється тим, що «ширина повітряного потоку» дорівнює глибині ПСК, в результаті чого створюється більш тривала дія повітря на частинки зернового матеріалу [30, 69].

При розробці сепаратора ЗС-50 були проведені дослідження ПСК з вертикально-направленим повітряним потоком щодо вибору форм та конструкції (рис. 1.7), які дозволили зробити їх порівняльну оцінку [20].

Визначено, що всі три типи клиноподібних ПСК, в порівнянні з прямокутним, менш ефективні, в тому числі при значній витраті повітря, а

найбільший ефект очистки забезпечується в вертикальному прямокутному каналі постійного перетину і конічному каналі (рис. 1.7, а, г) [81].

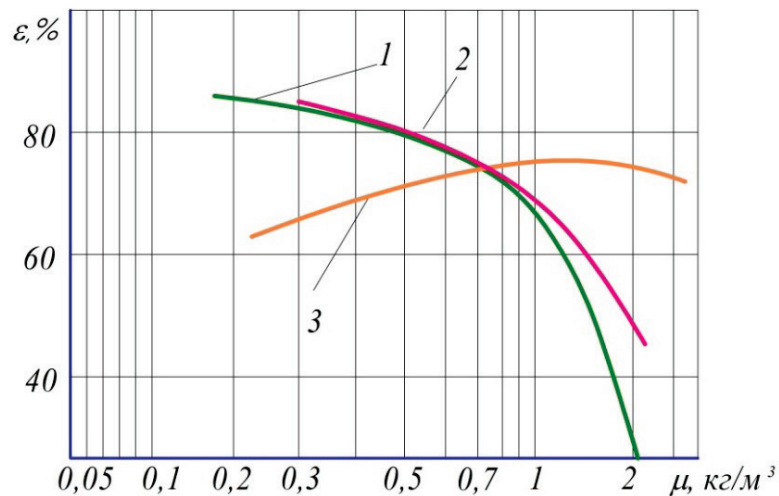


Рис. 1.6. Залежність виділення легких домішок від коефіцієнта концентрації μ в ПСК з різним направленням повітряного потоку
1 – вертикальний; 2 – горизонтальний; 3 – похилий

Найбільш різносторонньо до питання порівняння ефективності ПСК підійшов А.С. Матвеєв [82], дослідження якого проводились на каналах з прямокутною, квадратною, круглою та кільцевою формою поперечного перетину.

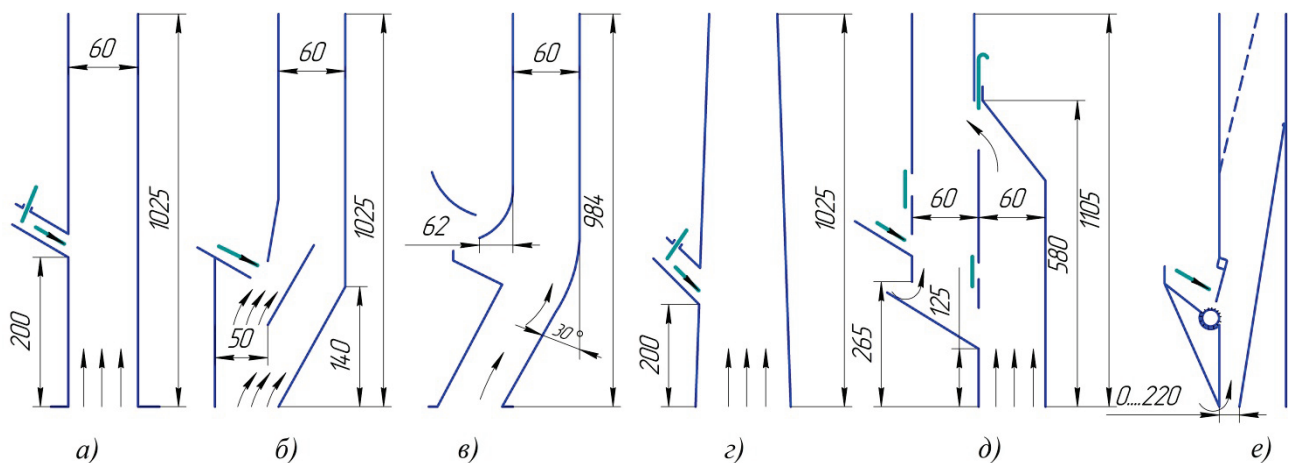


Рис. 1.7. Схеми експериментальних ПСК:
а – прямокутний; б, в – похилі з подвійною продувкою і поворотним клапаном; г – конічний, звужений догори; д – подвійний;
е – клиноподібний, розширений догори

Отримані результати досить логічно пояснюють причини неоднакової ефективності роботи різних типів каналів, основними з яких є: структура

зернового потоку, який надходить в ПСК (товщина, ширина, форма та ін.) та умови взаємодії оброблюємого матеріалу з повітрям в робочій зоні. Але визначальним показником для ПСК різної форми є ширина впускного вікна, яка обумовлюється їх формою поперечного перетину [82].

При рівнозначній продуктивності ПСК з кільцеподібним та колоподібним перетином мають значно менше питоме навантаження на одиницю ширини фронту зернового потоку в порівнянні з каналами з квадратною та прямокутною формою перетину, але внаслідок їх незручності компанування з найбільш поширеними на практиці площинно-коливальними решітними сепараторами, вони не знайшли належного застосування в існуючих ЗОМ.

Головним недоліком найбільш поширених вертикальних ПСК прямокутного перетину є те, що з підвищенням питомого навантаження суттєво збільшується нерівномірність повітряного потоку в зоні введення та виведення матеріалу, що значно зменшує ефект сепарації.

Відомі деякі технічні рішення, які сприяють вирівнюванню поля швидкостей по глибині ПСК, наприклад використання сіток та решіток із гофрованих пластин. При застосуванні сіток в місцях вводу зернового матеріалу в ПСК і виводу з нього, утворюються важкоущільнюючі місця, крім того, в процесі роботи сітка засмічується, що підвищує її опір та викликає деформацію епюри швидкісного поля потоку та зниження його середньої швидкості [23]. Решітки, які складаються з гофрованих пластин, встановлюють в центрі робочої зони ПСК, в результаті чого досягається відносне вирівнювання швидкості повітря по його перетину і покращення якості очищення [19].

Але їх використання є ефективним лише при невеликих питомих навантаженнях ПСК, також вони значно ускладнюють конструкцію каналу, збільшують його металоємність та енергоємність пневмосепарації.

Відомі схеми ПСК ЗОМ, в яких застосовані конструктивні елементи, що сприяють покращенню рівномірності повітряного потоку. Так, в повітряній схемі машини АКН-200 (рис. 1.8, а) встановлені направляючі лопатки 5, які

створюючи струменеву структуру повітряного потоку, додатково розрихлюють зерновий матеріал та розділюють його на фракції [27].

В пневмосепараторі Petkus K-523 в зоні вводу матеріалу в канал встановлені горизонтальні стержні, які створюють передумови для його розрихлення, що сприяє зменшенню опору повітря в зоні введення [31].

Сичугов Н.П., Бурков А.І. та Одінцов Н.І [83] запропонували схему для вирівнювання повітряного потоку біля зовнішньої стінки ПСК за допомогою зустрічного повітряного потоку, що протікає через жалюзі, яка реалізована в конструкції ЗОМ МПО-100 (рис. 1.8, б). При введенні зернового матеріалу в ПСК в ньому встановлений живильний валець 2, а напроти місця введення жалюзійна решітка 6, і частина зустрічного повітряного потоку потрапляє в зону виведення зернового матеріалу та сприяє його розрихленню. Але при цьому зменшується ефективна глибина ПСК в результаті утворення вихривої зони при зустрічних напрямках основного та допоміжного потоків.

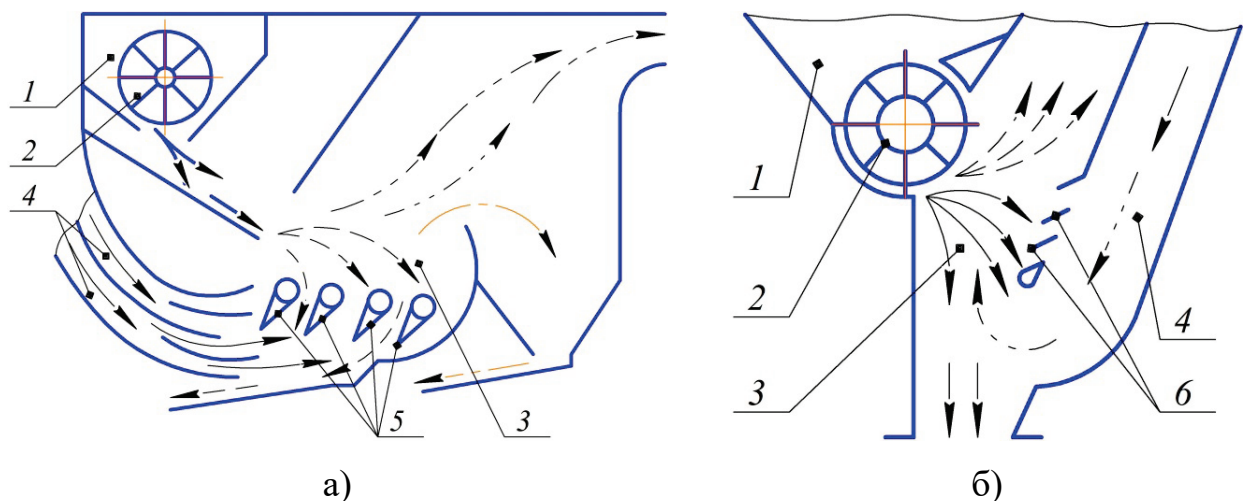


Рис. 1.8. Схеми ПСК: а – ЗОМ АKN – 200; б – ЗОМ МПО-100.

1 – бункер; 2 – живильний валець; 3 – ПСК; 4 – повітряний канал;
5 – направляючі лопатки; 6 – жалюзійна решітка

Безумовно, конструктивні елементи, які встановлюються в пневмосистемах ЗОМ, сприяють покращенню структури поля швидкостей повітряного потоку та підвищують якість очищення, але при цьому, збільшується опір і енергоємність ПСК, що призводить до зменшення загальної технологічної ефективності пневмосепарації.

1.2.2. Живильні пристрої в пневмосистемах ЗОМ

Одним із способів, які сприяють вирівнюванню поля швидкостей повітряного потоку є використання живильних пристроїв ПСК. Вони повинні забезпечувати умови, при яких відбувається направлена тонкошарова подача зерна в повітряний потік. Це дозволяє покращити взаємодію компонентів зернового матеріалу з повітряним потоком, посилюючи тим самим ознаку розділення, а також звести до мінімуму їх контактування, що суттєво підвищує ефективність роботи повітряного потоку [84, 50, 26]. Тому, досягнувши рівномірної подачі зернового матеріалу, можна отримати більш вирівняне поле швидкостей повітряного потоку, підвищити якість сепарації і, відповідно, ефективність роботи ПСК [20].

Основні вимоги, які пред'являються до живильних пристроїв, що забезпечують рівномірну подачу зернового матеріалу в ПСК, наступні [84, 86]:

- конструктивне виконання і швидкісний режим їх роботи повинні забезпечувати рівномірну подачу зернового матеріалу по ширині і глибині ПСК;
- швидкісний режим живильного пристрою вибирається з урахуванням сил, діючих на зерно в зоні контакту з елементами живильника, що забезпечують мінімальне травмування зерна і раціональну траєкторію польоту з мінімальними витратами енергії;
- конструкція і режим роботи живильника повинні бути такими, щоб забезпечити необхідні якісні і кількісні показники роботи пневмосепаратора;
- потужність приводу живильника повинна бути по можливості мінімальною.

На практиці використовуються вальцеві, лопатеві, стрічкові, аераційні дискові, гравітаційні та вібраційні живильні пристрої (рис. 1.9).

При дослідженні процесу пневмосепарації продуктів лущення проса В.Ф. Веденьєв [26], запропонував аеролоток, який виконаний у вигляді пористої перегородки. В результаті його застосування відбуваються попереднє

розшарування суміші перед введенням в ПСК, в результаті чого легкі компоненти потрапляють в канал над основним зерном та з більшою швидкістю.

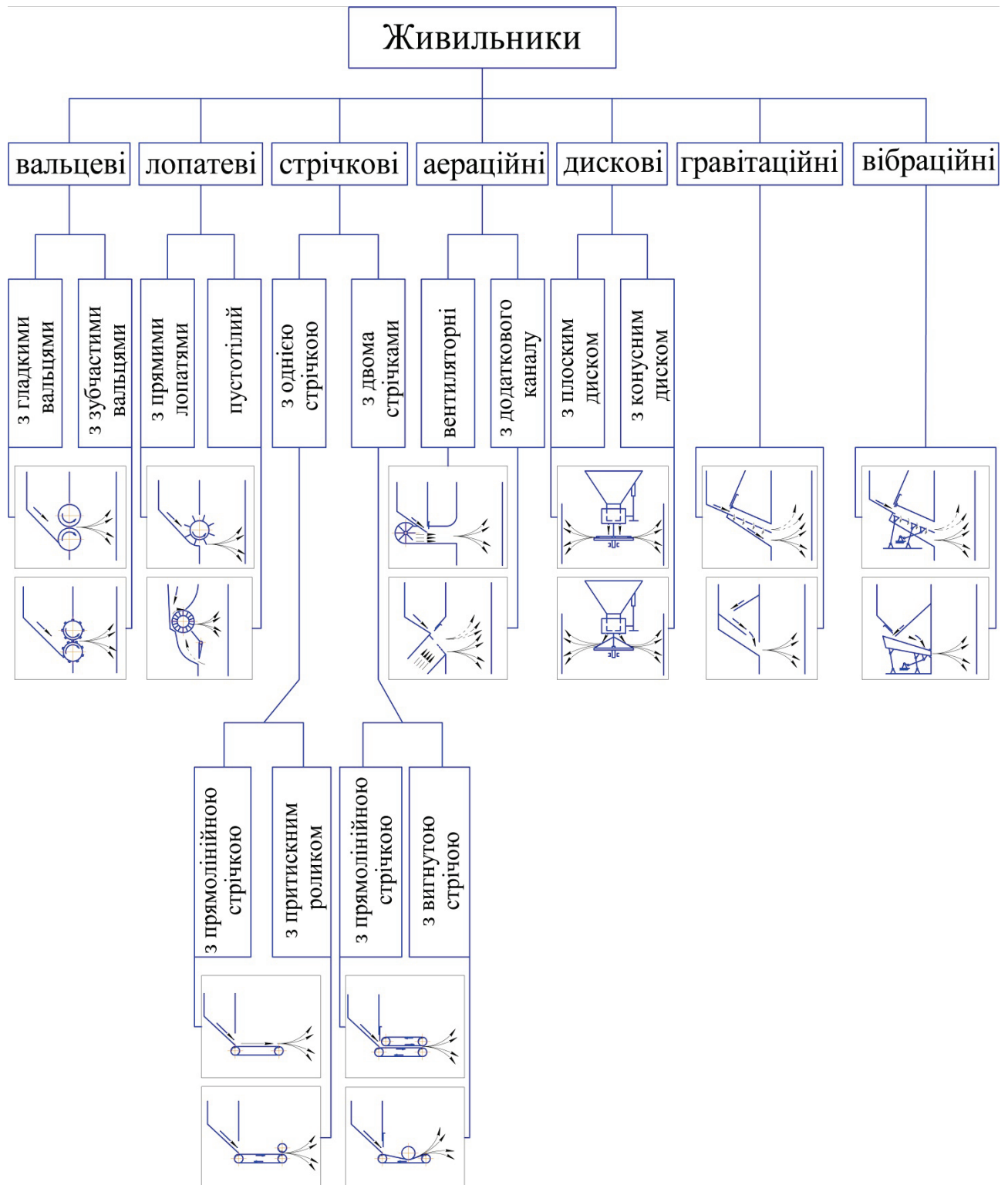


Рис. 1.9. Класифікація живильних пристроїв пневмосепараторів

Більш рівномірного розподілу зернового матеріалу не тільки по ширині, а й по глибині ПСК дозволяє досягти конструкція лопатевого живильника [87],

робочий орган якого виконаний у вигляді набору різних по діаметру циліндричних втулок з лопатями (рис. 1.10, а).

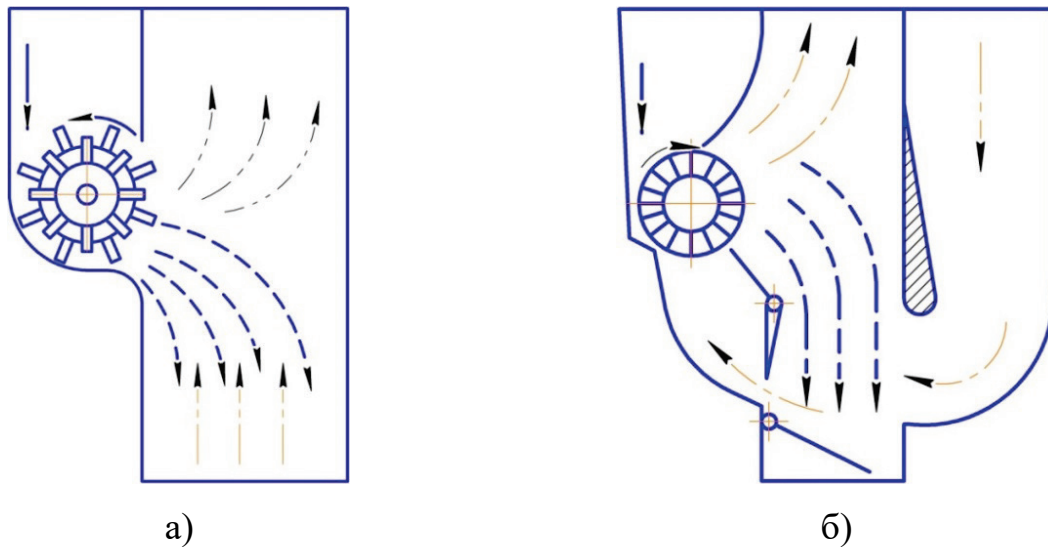


Рис. 1.10. Лопатеві живильники ПСК:
а – з циліндричними втулками; б – пустотілий

Авторами [88] запропонований лопатевий живильник (рис. 1.10, б), центральна частина якого виконана пустотілою, і з'єднана з додатковим повітряним каналом, чим забезпечується активніше розшарування зернового матеріалу перед введенням в ПСК.

В якості живильників можливо також використання комбінованих робочих органів. Так автори [89] представили пневмосепаратор, що має бункер 1, ПСК 3, живильник 2, поверхня якого виконана у вигляді решета 5 однополосного гіперболоїда обертання (рис. 1.11), причому центральна частина живильника пустотіла. Встановлені всередині на валу активатори 4 сприяють більш рівномірному розподілу зернового матеріалу по поверхні живильника, що дозволяє вводити його в розшарованому вигляді в ПСК.

Недолік даного винаходу полягає в тому, що при великій завантаженості живильника відбувається забивання решета, що призводить до зниження ефективності сепарації або навіть до поломки.

При введенні зернової суміші в ПСК використовуються також вібраційні живильники, робочі органи яких виконують коливальні рухи.

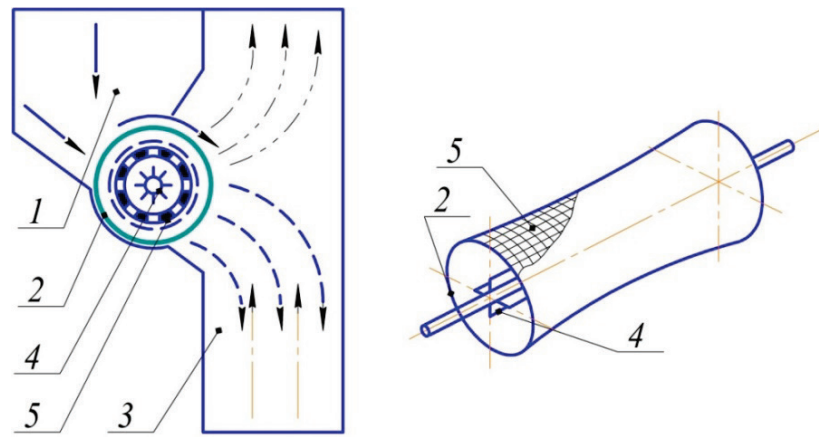


Рис. 1.11. Живильник в вигляді однополосного гіперболоїда обертання

Застосування таких живильників дає можливість більш рівномірно вводити зерновий матеріал не тільки по ширині, а й по висоті. Як вказано авторами в роботі [22] подача матеріалу за допомогою вібрлотків при певних умовах сприяє самосортуванню зернового матеріалу і введенні в ПСК в вигляді багатошарового потоку.

Але основним недоліком всіх активних живильників, в тому числі аераційних, є необхідність додаткового енергоживлення, використання вентиляторів, електродвигунів, внаслідок чого підвищується енергоємність очищення та складність їх конструкції.

Найбільш широкого застосування набули гравітаційні живильники завдяки їх простоті та надійності конструкції. Одним із самих поширених прикладів такого живильника є введення зернового матеріалу по похилому лотку.

В пневмосистемі ЗОМ Petkus K-560 [90] в якості гравітаційного живильника застосовується регульований клапан (рис. 1.12, а). Перед введенням в ПСК зерновий матеріал вільно падає поблизу отвору і, відбиваючись від клапана, зернові частинки, маючи різні пружні властивості, потрапляють в канал з різними траєкторіями та швидкостями, створюючи меншу щільність та збільшуючи взаємодію частинок з повітряним потоком.

В ПСК ЗОМ МПО-50 застосований гравітаційний живильник решітного типу (рис. 1.12, б), завдяки якому важка фракція просипається крізь решето, тому крупні домішки вводяться в ПСК над основним зерном [112].

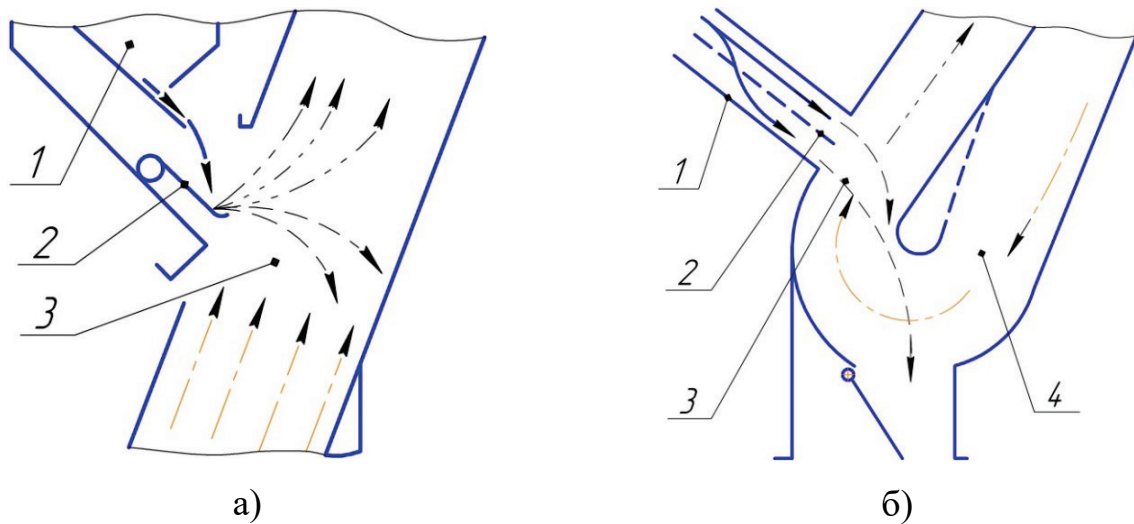


Рис. 1.12. Гравітаційні живильники ЗОМ: а – Petkus K-560; б – МПО-50.
1 – бункер; 2 – живильний пристрій; 3 – ПСК; 4 – повітряний канал

Авторами [91] запропонований дворівневий гравітаційний живильник (рис. 1.13, а), лотки якого виконані ступінчасто, в шахматному порядку, тому зерновий матеріал, крім того, що розподілений на окремі потоки, потрапляє в ПСК на різній висоті і з різною швидкістю введення, що обумовлює більш рівномірне заповнення ПСК та сприяє вирівнюванню поля швидкостей.

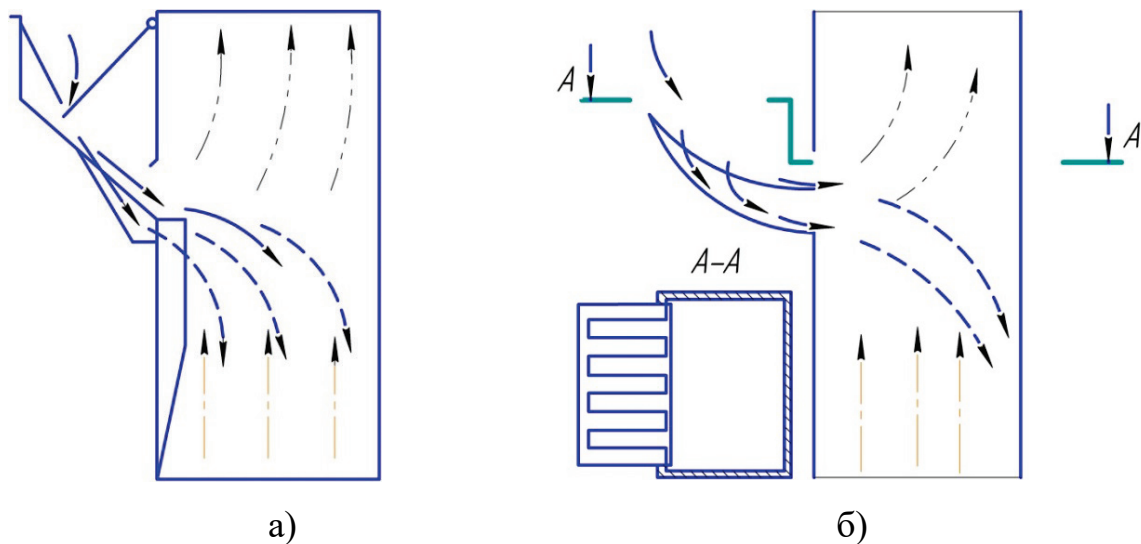


Рис. 1.13. Дворівневі гравітаційні живильні пристрої

А в конструкції пневмосепаратора [92] (рис. 1.13, б) в якості живильника використовуються лотки з приймальними і сходовими поверхнями, розташовані один над одним. Приймальні краї лотків з'єднані одна до одної, а в лотках виконані щілини, спрямовані вздовж руху зернового матеріалу, причому щілини

верхнього лотка зміщені відносно щілин нижнього лотка. Але в процесі роботи існує велика вірогідність забивання щілин лотків соломистими частинками.

Тавтілов І.Ш. [57], запропонував багатоярусний живильник, лотки якого розташовані один над одним та під різними кутами відносно напрямку повітряного потоку, що дало змогу рівномірно заповнити робочу зону по глибині ПСК та вирівняти поле швидкостей повітряного потоку. Недоліком такого пневмосепаратора є обмеження продуктивності кожного ярусу, оскільки при збільшенні загального питомого навантаження буде погіршуватись епіюра швидкостей повітряного потоку та порушуватись умови розділення зернового матеріалу, що суттєво зменшить його ефективність.

Багато дослідників пропонують інтенсифікувати процес розділення шляхом вдосконалення способу введення зернового матеріалу в ПСК.

Так в роботі [50] А.К. Туров рекомендує проводити попереднє розшарування зернової суміші перед її вводом в ПСК поперечно-зустрічним повітряним потоком з допоміжного повітряного каналу. При цьому, швидкість виходу струменів повітря із паралельно встановлених пластин в 1,5 рази вища швидкості витання компонентів вихідного матеріалу, що дозволяє більш інтенсивно винести в верхній шар легкі домішки.

С.В. Корнєєв та В.Е. Саитов [52, 40] також пропонують проводити попередню підготовку зернового матеріалу перед вводом в ПСК за допомогою повітряного потоку з подальшим її фракціонуванням.

В.А. Сабашкін [93] вказує, що зерновий матеріал перед подачею в ПСК доцільно не тільки розрихляти і розшарувувати на легкі і важкі частки, але й вводити їх під різними кутами і різними швидкостями.

В.Н. Мякін та С.Г.Урюпін [94] розробили пневматичний сепаратор для сортування зерна з багатоярусним аспіраційним каналом. За рахунок розвитку нижньої частини ПСК і установки всередині ярусів, забезпечується багаторазова і довготривала обробка зернового матеріалу повітряним потоком.

З проведеного огляду можна зробити висновок, що підвищення інтенсифікації пневмосепарації в значній мірі можливе шляхом створення

оптимальних умов введення та розподілу зернового матеріалу в робочій зоні ПСК, які сприяють зменшенню вірогідності зіштовхувань частинок зернового матеріалу при розділенні та опору повітряному потоку в зоні введення, внаслідок чого вирівнюється епіюра поля швидкостей та підвищується ймовірність виділення легких домішок.

1.3. Обґрунтування напряму досліджень

Враховуючи проведений аналіз, з метою інтенсифікації процесу пневмосепарації пропонується нова конструкція пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення, яка дозволяє забезпечити рівномірне розміщення зернового матеріалу в ПСК та вирівняти поле швидкостей повітряного потоку в зоні введення та виведення [95-97].

Запропонований повітряний сепаратор (рис. 1.14) складається із приймального бункера 1 з заслінками 2, живильника 3, пневмосепаруючого каналу 4 з жалюзійною задньою стінкою 7 та вивідного герметичного каналу 5.

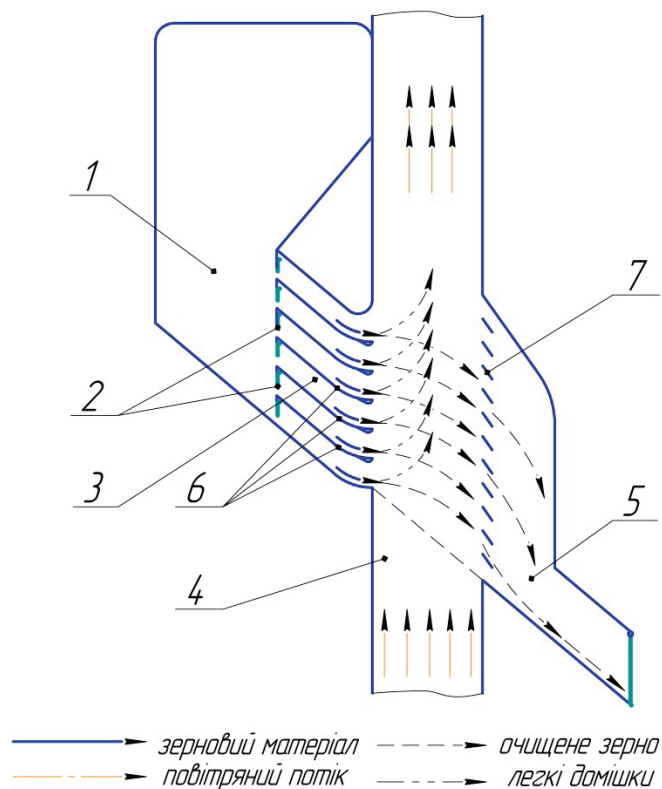


Рис. 1.14. Схема пневмосепаруючого каналу з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу

Живильник 3 виконано у вигляді похилого каналу з декількома направляючими поверхнями 6, нижні кінці яких з'єднані з передньою стінкою ПСК, а верхні з боковою стінкою бункера 1.

Використання запропонованого живильного пристрою забезпечує розділення зернового матеріалу на декілька обмежених за продуктивністю потоків, які надходять в різні по висоті робочі зони ПСК. Виведення очищеного зерна з ПСК відбувається через жалюзійну решітку в задній стінці.

Запропонована конструкція сприятиме зменшенню опору повітряного потоку при введенні та виведенні з ПСК, збільшенню рівномірності епюри поля швидкостей та покращення умов для видалення легких домішок, що дозволить суттєво підвищити ефективність та якість повітряної сепарації [5, 10, 11].

Висновки, мета і задачі досліджень

За результатами проведеного огляду та аналізу сучасного стану наукових досліджень повітряної сепарації зерна можна зробити наступні висновки:

1. Форма і конструктивне виконання ПСК безпосередньо впливає на ефективність його роботи і, в першу чергу, визначає геометрію зернового потоку, який потрапляє в канал. При цьому, одним з найпоширеніших та зручних в компануванні з площинно-коливальними решетами є вертикальний, який при невеликих питомих навантаженнях забезпечує високу якість очищення.

2. Однією з основних причин низької ефективності роботи вертикальних ПСК є збільшення опору повітряному потоку в зоні введення та виведення матеріалу внаслідок нерівномірного розподілу зернової суміші і, як наслідок, погіршення структури поля швидкостей повітряного потоку, особливо при підвищених питомих навантаженнях.

3. Використання живильних пристроїв дозволяє покращити рівномірність подачі зернового матеріалу в робочу зону ПСК та вирівняти поле швидкостей повітряного потоку. Найбільш прості за конструкцією та енергоефективні є гравітаційні живильники.

4. Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення інтенсифікації процесу пневмосепарації є створення рівномірної структури повітряного потоку в робочій зоні ПСК протягом всього його часу взаємодії з компонентами зернової суміші в результаті розвантаження тих робочих зон, де опір найбільший, а саме, в зонах введення та виведення зернового матеріалу.

5. Взаємодія повітряного потоку з компонентами зернової суміші розглядалась у вигляді частинних розв'язків процесу, які не дозволяють отримати аналітичне визначення якості пневмосепарації, тому потребує подальшого дослідження.

На підставі проведеного аналізу сформована **мета досліджень**: підвищення якості пневмосепарації шляхом обґрунтування параметрів ПСК з живильним пристрем для багаторівневого введення зернового матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі досліджень**:

- обґрунтувати принципову схему робочого органа з багаторівневим введенням, яка забезпечить рівномірний розподіл зернового матеріалу та підвищить рівномірність епюри поля швидкостей повітряного потоку в робочій зоні ПСК;
- дослідити взаємодію компонентів зернового матеріалу з повітряним потоком за умов однорівневого та багаторівневого введення;
- встановити закономірності впливу основних конструктивно-технологічних параметрів ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу на якісні показники процесу сепарації;
- визначити раціональні значення основних параметрів і режимів роботи запропонованої конструкції пневмосепаратора;
- встановити закономірності впливу фізико-механічних властивостей зернового матеріалу та величини питомого навантаження ПСК на основні технологічні показники його роботи;
- розробити методику інженерного розрахунку запропонованого ПСК та провести техніко-економічну оцінку ефективності його використання.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПНЕВМОСЕПАРАЦІЇ З БАГАТОРІВНЕВИМ ВВЕДЕННЯМ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ

2.1. Аналіз об'єкту досліджень

Однією з основних задач, яка спрямована на забезпечення високої ефективності роботи сепаратора, є обґрунтування основних параметрів живильного пристрою ПСК.

Для запропонованого технічного рішення, яке представляє ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу, дана задача полягає у визначенні параметрів напрямних поверхонь живильника, які б забезпечили рівномірне розміщення матеріалу в ПСК та аналітичній оцінці якості розділення в робочій зоні сепарації.

Для створення найбільш сприятливих умов сепарації в ПСК запропонована в даній роботі конструкція живильного пристрою повинна забезпечити однакові режими введення зернового матеріалу по всіх напрямних поверхнях.

Рух матеріалу в пневмосепараторі з живильним пристроєм для багаторівневого введення можна умовно поділити на декілька етапів (рис. 2.1).

1. По прямолінійній розгінній ділянці напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою;
2. По дугоподібній ділянці напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою;
3. Від передньої до жалюзійної стінки в ПСК.

Для створення найбільш раціональних умов розділення при багаторівневому введенні зернового матеріалу в ПСК, параметри напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою (довжина L_p , кут нахилу α розгінної та радіус r дугоподібної ділянки) повинні забезпечити подачу матеріалу горизонтально та з необхідною швидкістю введення.

На першому етапі рух зернового матеріалу після витікання з бункера, при якому він має початкову швидкість v_n , його рух по прямолінійній ділянці довжиною L_p під кутом нахилу α повинен забезпечувати швидкість v_1 , з якою матеріал потрапляє на дугоподібну ділянку радіусом r . Після її проходження він набуває швидкості v_2 або v_6 , яка необхідна для введення зернового матеріалу в ПСК та забезпечення відповідного питомого навантаження q_{bi} .

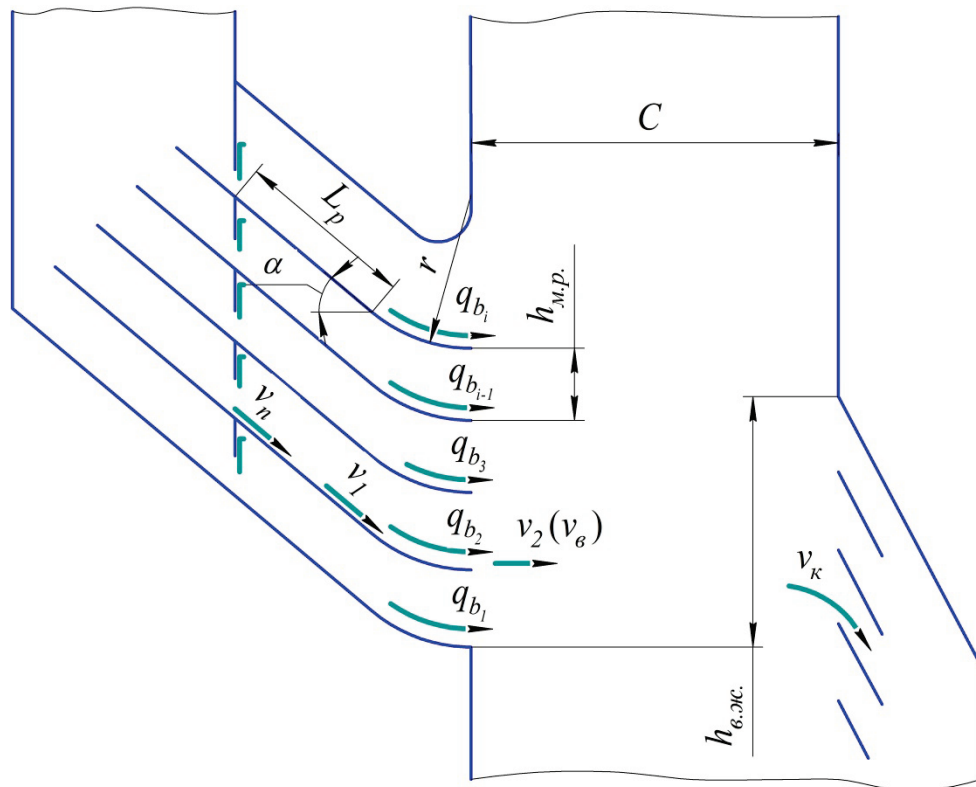


Рис. 2.1. Схема до визначення основних параметрів ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу

Після проходження відстані, що відповідає глибині каналу C , зерновий матеріал набуває швидкості v_k , з якою проходить через жалюзійну стінку і потрапляє в герметичний вивідний канал, а легкі домішки, під дією повітряного потоку, виділяються в осадову камеру.

З метою забезпечення необхідних параметрів введення та якісного розподілу зернового матеріалу в ПСК необхідно обґрунтувати параметри напрямних поверхонь живильного пристрою.

2.1.1. Обґрунтування основних параметрів живильного пристрою

Забезпечення величини необхідної швидкості на першому етапі руху відбувається в результаті вибору раціональних параметрів прямолінійної ділянки напямної кривої (рис. 2.2), а саме: кута нахилу до горизонту α і його довжини L_p . Відомо [37], що кут нахилу до горизонту α повинен бути більшим за кут тертя зернового матеріалу по поверхні живильного пристрою $\alpha \geq \varphi_{\text{тер}}$.

Під час руху по похилій поверхні на частинку зернового матеріалу діє сила ваги $G = mg$, нормальна сила реакції опори N та сила тертя $F = fN$ [98].

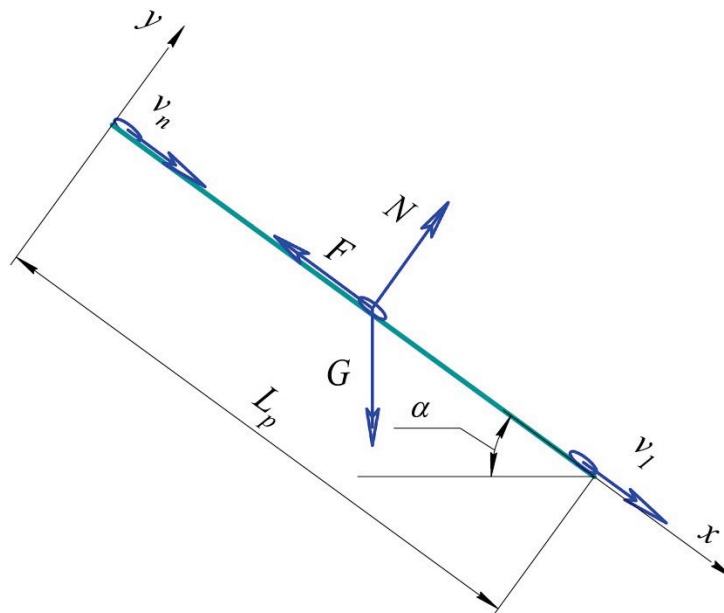


Рис. 2.2. Схема до визначення початкових умов руху частинки по прямолінійній розгінній ділянці напямної кривої живильного пристрою

Диференціальне рівняння руху частинки зернового матеріалу по похилій поверхні живильного лотка запишеться у вигляді [98]:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha - fmg \cos \alpha, \quad (2.1)$$

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

f – коефіцієнт тертя;

m – маса частинки, кг

або

$$d\dot{x} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha) dt \quad (2.2)$$

Після проведення стандартних перетворень та спрощень, аналогічно [98], отримаємо довжину розгінної прямолінійної ділянки:

$$L_p = \frac{v_1^2 - v_n^2}{2g(\sin \alpha - f \cos \alpha)} \quad (2.3)$$

Швидкість руху зернового матеріалу в кінці розгінної прямолінійної ділянки буде визначатись рівнянням:

$$v_1 = \sqrt{2gL_p(\sin \alpha - f \cos \alpha)} + v_n \quad (2.4)$$

Наступним етапом руху зернового матеріалу є його рух по дугоподібній ділянці напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою (рис. 2.3).

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

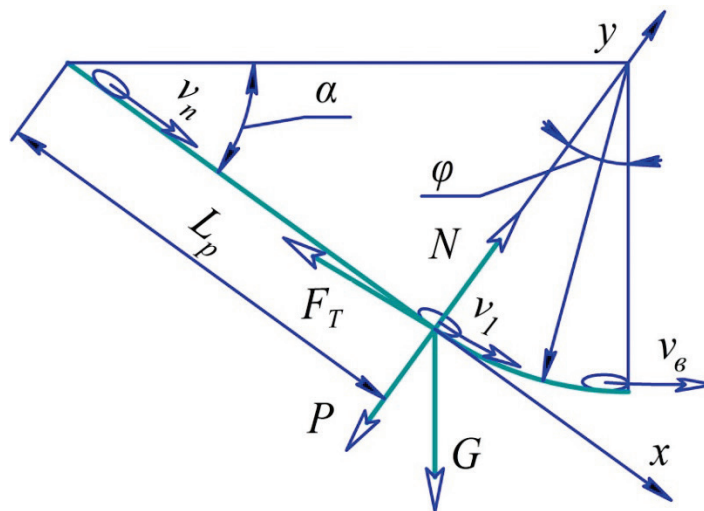


Рис. 2.3. Рух частинки по дугоподібній ділянці напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою

Диференційне рівняння руху частинки зернового матеріалу по дугоподібній ділянці напрямної кривої живильного пристрою в проекціях на осі рухомої системи координат OXY прийме вигляд [98]:

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = mg \cos \varphi - F_r \\ m \frac{v^2}{r} = N - mg \sin \varphi \end{cases} \quad (2.5)$$

де v – швидкість руху частинки на дугоподібній ділянці живильника, м/с;

φ – кут, що визначає положення частинки на кривій радіусом r , град.

Виключаючи з системи (2.5) реакцію N , отримаємо рівняння руху частинки зернового матеріалу на дугоподібній ділянці:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \cos \varphi - fm \frac{v^2}{r} - fmg \sin \varphi, \quad (2.6)$$

або

$$\frac{dv}{dt} = g(\cos \varphi - f \sin \varphi) - f \frac{v^2}{r}. \quad (2.7)$$

Після вирішення системи рівнянь, відповідних спрощень та перетворень, швидкість введення зернового матеріалу в ПСК буде дорівнювати:

$$v_s = \left\{ v_1^2 e^{-2f\left(\varphi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)} + \frac{2gr}{1 + 4f^2} \left\{ 3f \cos \varphi + (1 - 2f^2) \sin \varphi - \right. \right. \\ \left. \left. - [3f \sin \alpha + (1 - 2f^2) \cos \alpha] e^{-2f\left(\varphi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)} \right\} \right\}^{1/2}. \quad (2.8)$$

або враховуючи (2.4)

$$v_s = \left\{ [2gL_p(\sin \alpha - f \cos \alpha) + v_n^2] e^{-2f\left(\varphi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)} + \frac{2gr}{1 + 4f^2} \left\{ 3f \cos \varphi + (1 - 2f^2) \sin \varphi - \right. \right. \\ \left. \left. - [3f \sin \alpha + (1 - 2f^2) \cos \alpha] \cdot e^{-2f\left(\varphi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)} \right\} \right\}^{1/2}. \quad (2.9)$$

За отриманим рівнянням (2.9) побудовані графічні залежності зміни швидкості руху зернового матеріалу по гравітаційній напрямній кривій від її параметрів (рис. 2.4).

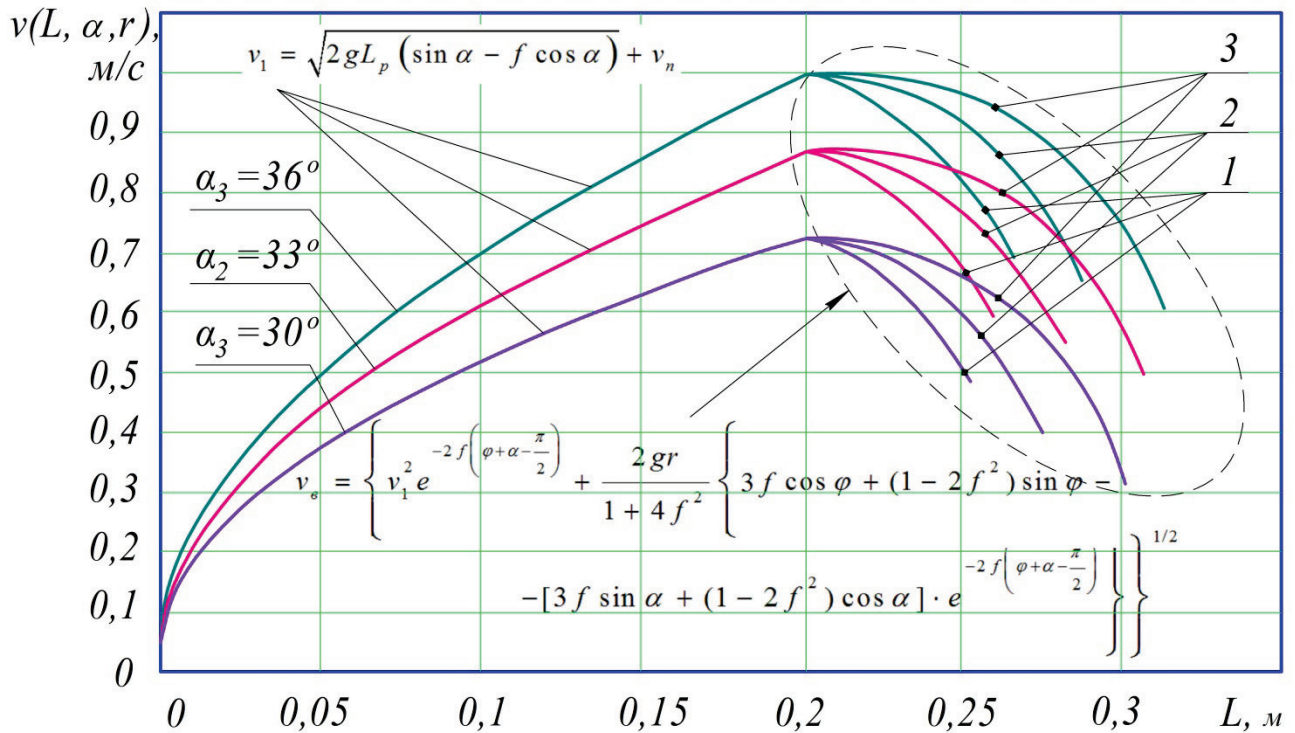


Рис. 2.4. Залежність швидкості руху зернового матеріалу від його положення на гравітаційній напрямній кривій, кута нахилу розгінної ділянки та радіуса дугоподібної ділянки, при ($L_p = 0,2$ м): 1 – $r = 0,1$ м; 2 – $r = 0,15$ м; 3 – $r = 0,2$ м.

З отриманих залежностей (рис.2.4) видно, що під час руху по прямолінійній ділянці швидкість руху зернового матеріалу зростає по параболічному закону, і чим більший кут нахилу α та довжина розгінної ділянки L_p , тим динамічніше відбувається збільшення швидкості.

При потраплянні частинок на дугоподібну ділянку, внаслідок дії відцентрової сили, збільшується сила тертя, що призводить до зменшення їх лінійної швидкості руху. Так, при куті нахилу $\alpha = 33^\circ$ та $L_p = 0,2$ м швидкість в кінці розгінної ділянки v_1 досягає $0,87$ м/с, а при введенні в ПСК $v_g = 0,55$ м/с.

Збільшення радіусу дуги напрямної кривої призводить до зменшення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК v_g . З одного боку збільшення радіусу сприяє зменшенню величини сили інерції ($P = mv^2/r$), що призводить до зменшення сили тертя F_T , але при цьому збільшується час руху частинки, тому величина швидкості введення матеріалу в ПСК v_g зменшується.

Відповідно, чим менший радіус r , тим менше змінюється величина швидкості введення в ПСК v_e по відношенню до тієї, яка отримується в кінці розгінної ділянки v_l . Так, при довжині розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, куті її нахилу $\alpha = 30^\circ$ та радіусі дуги $r = 0,1$ м швидкість введення зернового матеріалу буде $v_e = 0,48$ м/с, тобто зміна по відношенню до v_l становить 0,24 м/с. Але при такому радіусі, як показують попередні дослідження, вказаної довжини дуги недостатньо для отримання стабільного горизонтального напрямку подачі матеріалу в ПСК, оскільки частина зернового потоку спрямовується лише на її крайню частину.

Отже, для забезпечення вищезначених умов одношарового руху зернового матеріалу зі швидкістю введення ПСК $v_e = 0,5 \dots 0,6$ м/с, раціональними параметрами прямої гравітаційної кривої для зернових культур з коефіцієнтом внутрішнього тертя $\varphi_{тер} = 0,47 \dots 0,73$ [37] є : довжина розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, кут її нахилу $\alpha = 33^\circ$ та радіус дугоподібної ділянки $r = 0,15$ м.

2.2 Аналіз руху зернового матеріалу в умовах багаторівневого введення

2.2.1 Рух зерна в ПСК при одношаровому введенні

Для аналізу об'єкту досліджень приймаємо наступні припущення:

- шари зернового матеріалу в ПСК не перемішуються;
- усереднені зернова частка і домішка мають форму кулі і є близькими за розмірами;
- маса окремо взятої усередненої зернини значно більша маси усередненої домішки;
- об'ємний вміст домішок не перевищує 10%;
- зернові частинки та домішки рівномірно розташовані в кожному шарі.

Введемо прямокутну декартову систему координат OXY (рис. 2.5), в якій вісь OY – направлена в сторону руху повітряного потоку, вісь OX направлена так, що система OXY має правосторонній напрямок.

Швидкість повітряного потоку V_n вибирається такою, щоб при проходженні через ПСК (рис. 2.5, а):

- зерно практично не відхилялося від своєї траєкторії, тобто швидкість повітряного потоку V_n менша за швидкість витання зерна $V_{в.з.}$;
- домішки суттєво відхиляються від траєкторії зерна, тобто швидкість повітряного потоку V_n є більшою за швидкість витання домішок $V_{в.д.}$.

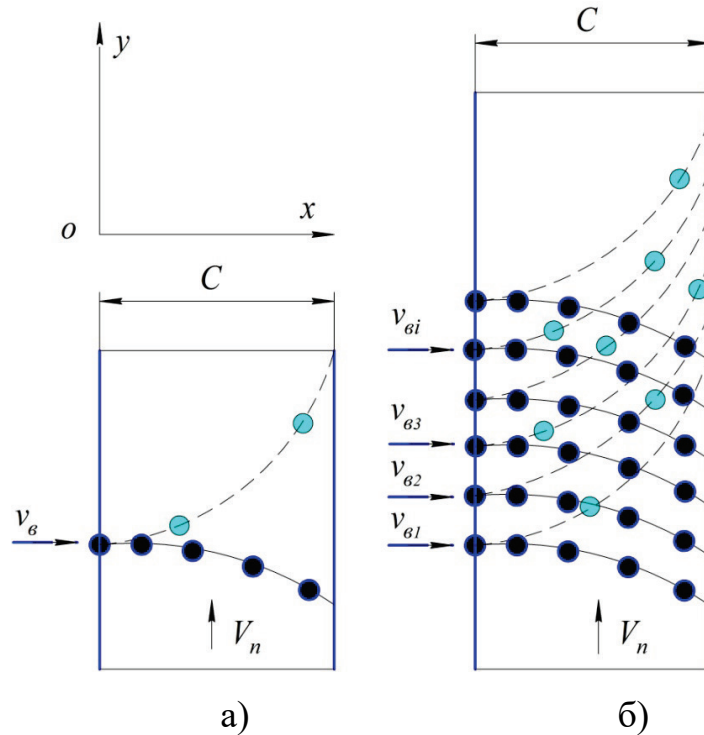


Рис. 2.5. Схема руху зерна і домішок: а – при однорівневій подачі зернового матеріалу; б – при багаторівневому введенні зернового матеріалу

За таких припущень швидкість повітряного потоку задовольняє умову:

$$V_{в.д.} < V_n < V_{в.з.} \quad (2.10)$$

Спочатку розглянемо одношаровий рух зернового матеріалу в ПСК при його введенні на один рівень живильного пристрою (рис. 2.5, а).

За прийнятих припущень відбуватиметься чітке розділення зернового матеріалу, зерно і домішки будуть рухатись в протилежних напрямках, при цьому їх взаємодія практично виключена.

Опишемо рух зерна і домішок при їх розділенні в ПСК з однорівневим введенням зернового матеріалу.

При потраплянні зерна в повітряний потік на нього будуть діяти сила ваги $P = m_3 g$, сила інерції $m_3 a$ і сила опору повітря $F_{оп.з}$:

$$m_3 a + P + F_{оп.з} = 0, \quad (2.11)$$

де m_3 - маса усередненої зернини, кг;

g - прискорення земного тяжіння, м/с²;

a - прискорення частинки, м/с²;

Швидкість повітряного потоку V_n досить велика ($V_n \geq 8$ м/с), тому сила опору повітря $F_{оп.з}$ пропорційна квадрату відносної швидкості зерна [99] (швидкість зерна відносно повітряного потоку) і направлена протилежно її швидкості руху:

$$F_{оп.з} = -|V| V m_3 k_3, \quad (2.12)$$

де $V = (\dot{x}, \dot{y} - V_n)$ - вектор швидкості руху зерна відносно повітряного потоку;

k_3 - коефіцієнт, який враховує вплив засміченості повітряного потоку на швидкість витання зерна.

$$k_3 = k_{н.з} \cdot k_{в.д},$$

де $k_{н.з}$ - коефіцієнт парусності зерна;

$k_{в.д}$ - коефіцієнт, що враховує вплив домішок на опір переміщення в засміченому повітряному потоці, $k_{в.д} = 1,03 \dots 1,05$.

В проекціях на осі системи ОХУ рівняння (2.11) набуває вигляду, аналогічно [22, 7]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} \dot{x} k_3; \\ \ddot{y} = -g + \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} (\dot{y} - V_n) k_3. \end{cases} \quad (2.13)$$

Горизонтальна і вертикальна складові швидкості зерна змінюються в межах, відповідно, 0,5...0,6 м/с (розд.2.1.1) і - 0,1...0,1 м/с. Вони є набагато меншими швидкості повітряного потоку ($V_n \geq 7$ м/с), тому:

$$|V| = \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} \approx |V_n - \dot{y}| \approx V_n, \quad (2.14)$$

і з врахуванням чого рівняння (2.13) приймають вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -V_n \dot{x} k_3; \\ \ddot{y} = k_3 (V_n^2 - V_{\text{в.з.}}^2), \end{cases} \quad (2.15)$$

де $V_{\text{в.з.}} = \sqrt{\frac{g}{k_3}}$ – швидкість витання зерна, м/с.

Рівняння системи (2.15) є незалежними. Понизимо порядок рівнянь, замінюючи $\dot{x} = u$, $\dot{y} = v$

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

Та розділивши змінні:

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

проінтегруємо

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

де C_1, C_2 – постійні інтегрування.

Робимо зворотні заміни ($u = \dot{x}, v = \dot{y}$)

$$\begin{cases} \dot{x} = C_1 e^{-V_n k_3 t}; \\ \dot{y} = k_3 (V_n^2 - V_{\text{в.з.}}^2) t + C_2, \end{cases} \quad (2.16)$$

Інтегруючи систему рівнянь (2.16), маємо

$$\begin{cases} x = \frac{C_1}{-V_n k_3} e^{-V_n k_3 t} + C_3; \\ y = k_3 (V_n^2 - V_{\text{в.з.}}^2) \frac{t^2}{2} + C_2 t + C_4, \end{cases} \quad (2.17)$$

де C_3, C_4 - постійні інтегрування.

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

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0, \quad y(0) = 0, \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \quad (2.18)$$

З (2.16)-(2.18) отримуємо:

$$C_1 = \dot{x}_0, \quad C_2 = \dot{y}_0, \quad C_3 = \frac{\dot{x}_0}{V_n k_3}, \quad C_4 = 0. \quad (2.19)$$

Підставивши (2.19) в (2.17), отримаємо:

$$\begin{cases} x = \frac{\dot{x}_0}{V_n k_3} (1 - e^{-V_n k_3 t}) \\ y = k_3 \left(V_n^2 - V_{\text{в.з.}}^2 \right) \frac{t}{2} + \dot{y}_0 t. \end{cases} \quad (2.20)$$

Перше рівняння дозволяє визначити час t , за який зерно проходить відстань від передньої стінки ПСК до задньої, тобто час, протягом якого зерно знаходиться в зоні дії повітряного потоку.

При цьому, глибину ПСК можна визначити рівнянням:

$$C = \frac{\dot{x}_0}{V_n k_3} (1 - e^{-V_n k_3 t}) \quad (2.21)$$

З рівняння (2.21) отримуємо час перебування частинки в каналі:

$$t = -\frac{1}{V_n k_3} \ln \left(1 - \frac{C V_n k_3}{\dot{x}_0} \right). \quad (2.22)$$

Для означених початкових умов, при одношаровому введенні зернового матеріалу, змодельовані траєкторії руху часток зернових фракцій суміші під час потрапляння в ПСК (рис. 2.6) на прикладі зерна пшениці, відповідно до отриманих залежностей (2.20) – (2.22), які дозволяють визначити віяло розсіювання часток зернової фракції.

Згідно [101] значення коефіцієнтів парусності для зернових фракцій при розділенні в повітряному потоці знаходиться в межах: $0,075 \leq k_{\text{н.з.}} \leq 0,12$ – повноцінне зерно; $0,11 \leq k_{\text{н.з.}} \leq 0,14$ – щупле і бите зерно.

Аналіз залежностей (рис. 2.6) показує, що при збільшенні середньої швидкості повітряного потоку V_n , з 7,5 до 8,5 м/с, спостерігаються більш пологі траєкторії руху зерна та наближення до горизонталі тих фракцій, коефіцієнти парусності яких мають значення $k_{\text{н.з.}} = 0,11 \dots 0,14$, що відносяться до щуплого і битого зерна.

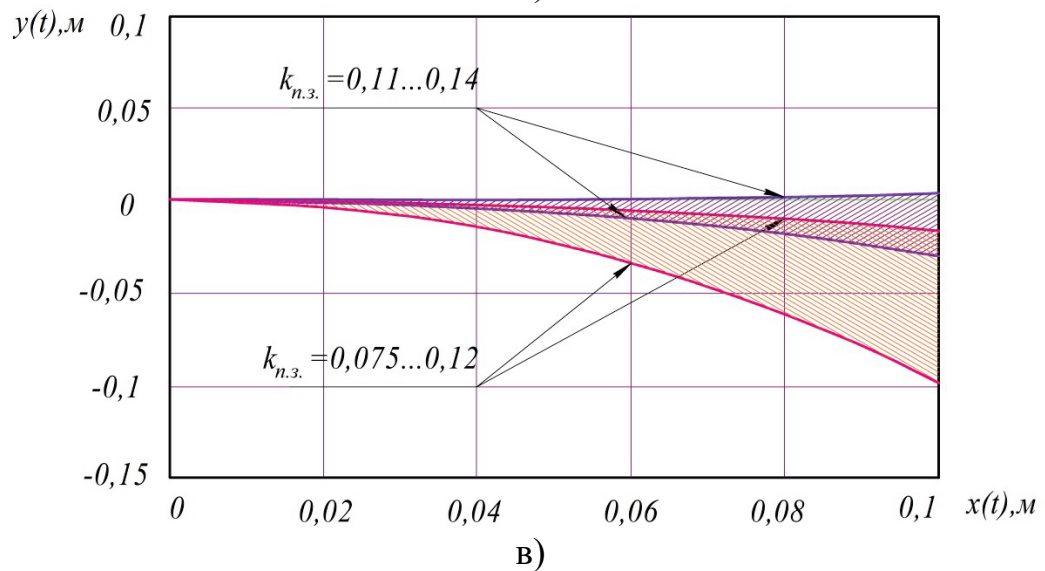
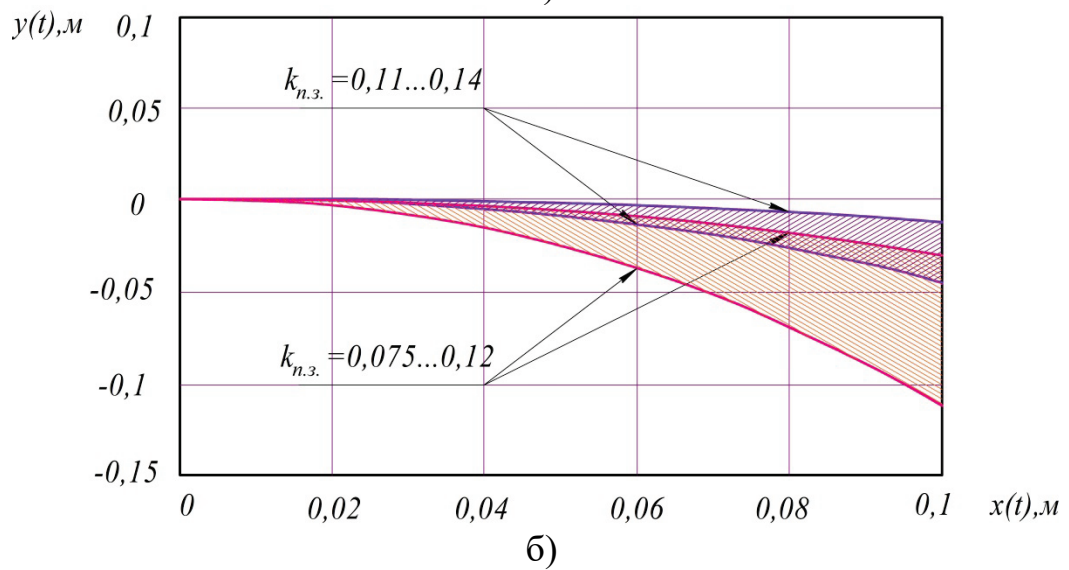
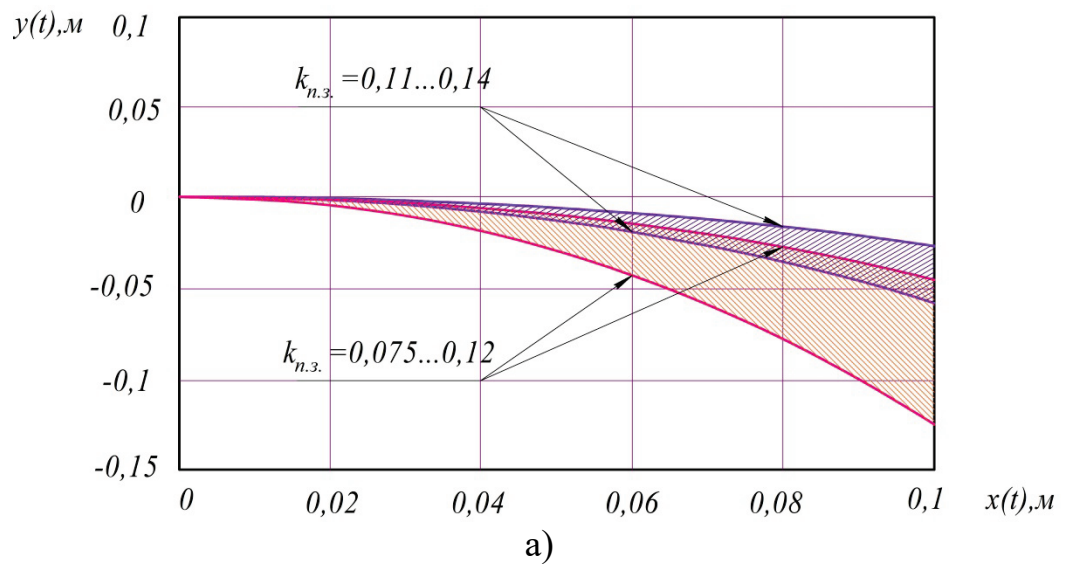


Рис. 2.6. Траєкторії польоту і розподіл зернових фракцій за умов швидкості введення зернового матеріалу в ПСК $v_g = 0,5$ м/с, кути подачі до ПСК $\alpha_g = 0^\circ$, середній швидкості повітряного потоку V_n :
 а) – $V_n = 7,5$ м/с; б) – $V_n = 8$ м/с; в) – $V_n = 8,5$ м/с

При цьому, траєкторії польоту повноцінного зерна, що мають найвищу швидкість витання ($k_{n.z.}=0,12$) на виході з ПСК змінюється в межах $0,045 \dots 0,025$ м.

Отримані залежності (рис.2.6) дозволяють зробити висновок, що за умови одношарового введення, збільшення середньої швидкості повітряного потоку до $V_n = 8,5$ м/с для зернової маси, що характеризується коефіцієнтом парусності $k_{n.z.} = 0,11 \dots 0,14$ – для щуплого та битого зерна, підвищує ймовірність виділення таких часток разом з легкими домішками.

2.2.2. Рух домішок в ПСК при безконтактному польоті

Аналогічно до умов руху зернових фракцій (2.11 – 2.12) в проекціях на осі системи OXY (рис. 2.5) запишемо умову переміщення домішок:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} \dot{x} k_o; \\ \ddot{y} = -g - \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} (\dot{y} - V_n) k_o. \end{cases} \quad (2.23)$$

де k_o – коефіцієнт парусності домішок з урахуванням засміченості повітряного потоку.

$$k_o = k_{n.o.} \cdot k_{e.o.},$$

де $k_{n.o.}$ – коефіцієнт парусності домішок;

Горизонтальна складова швидкості домішки змінюється в межах $0,5 \dots 0,6$ м/с, тому при великій швидкості повітряного потоку ($V_n \geq 8$ м/с), виходячи з умови (2.10), маємо:

$$|V| = \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - V_n)^2} \approx |V_n - \dot{y}| = V_n - \dot{y}, \quad (2.24)$$

і рівняння (2.23) приймають вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -(V_n - \dot{y}) \dot{x} k_o; \\ \ddot{y} = k_o \left[(\dot{y} - V_n)^2 - V_{e.o.}^2 \right], \end{cases} \quad (2.25)$$

де $V_{e.o.} = \sqrt{\frac{g}{k_o}}$ – швидкість витання домішок, м/с.

Понизимо порядок рівнянь, зробивши заміни $\dot{x} = u, \dot{y} - V_n = v$:

$$\begin{cases} \dot{u} = vuk_\partial; \\ \dot{v} = (v^2 - V_{\text{с.д.}}^2) \cdot k_\partial \end{cases} \quad (2.26)$$

Розв'яжемо спочатку друге рівняння системи (2.26), для чого розділяємо змінні

$$\frac{1}{k_\partial} \cdot \frac{dv}{V_{\text{с.д.}}^2 - v^2} = -dt, \quad (2.27)$$

та інтегруємо:

$$\frac{1}{2k_\partial V_{\text{с.д.}}} \ln \left| \frac{v + V_{\text{с.д.}}}{v - V_{\text{с.д.}}} \right| = -t + C_1^*, \quad (2.28)$$

де C_1^* – постійна інтегрування.

Нехай

$$C_1^* = \frac{\ln C_1}{2\sqrt{gk_\partial}}, \quad C_1 > 0, 1$$

Тоді з рівності (2.28) маємо (виражаємо змінну v):

$$v = \begin{cases} -\frac{(1 - C_1 e^{-\sqrt[2]{gk_\partial} t})}{1 + C_1 e^{-\sqrt[2]{gk_\partial} t}} V_{\text{с.д.}} & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} > 0; \\ -\frac{(1 + C_1 e^{-\sqrt[2]{gk_\partial} t})}{1 - C_1 e^{-\sqrt[2]{gk_\partial} t}} V_{\text{с.д.}} & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} \leq 0, \end{cases}$$

або

$$v = \frac{1 - C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\partial} t}}{1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\partial} t}} V_{\text{с.д.}}, \quad (2.29)$$

де

$$C_1^{(q)} = \begin{cases} C_1 & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} > 0; \\ -C_1 & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} \leq 0. \end{cases} \quad (2.29^*)$$

Робимо зворотню заміну $v = \dot{y} - V_n$:

$$\dot{y} = -\frac{1 - C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta} t}}{1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta} t}} V_{\text{с.д.}} + V_n \quad (2.30)$$

Інтегруючи останнє рівняння, отримаємо:

$$y = -V_{\text{с.д.}} \int \frac{1 - C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta} t}}{1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta} t}} dt + V_n t + C_2$$

де C_1 та C_2 – постійні інтегрування. Враховуючи те, що:

$$\int \frac{1 - ae^x}{1 + ae^x} dx = x - 2 \ln |1 + ae^x|, a \in R \quad (2.31)$$

маємо

$$y = \frac{V_{\text{с.д.}}}{2\sqrt{gk_\delta}} \left(-2\sqrt{gk_\delta} t - 2 \ln |1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta} t}| \right) + V_n t + C_2$$

або

$$y = (V_n - V_{\text{с.д.}}) t - \frac{1}{k_\delta} \ln |1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta} t}| + C_2 \quad (2.32)$$

Постійні інтегрування $C_1^{(q)}$, C_2 знаходимо з граничних умов

$$y(0) = y_0, \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0. \quad (2.33)$$

З (2.30), (2.32), (2.33) отримуємо:

$$y_0 = -\frac{1}{k_\delta} \ln |1 + C_1^{(q)}| + C_2, \quad \dot{y}_0 = -\frac{1 - C_1^{(q)}}{1 + C_1^{(q)}} V_{\text{с.д.}} + V_n$$

або

$$C_1^{(q)} = \frac{V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0}, \quad C_2 = y_0 + \frac{1}{k_\delta} \ln \frac{2V_{\text{с.д.}}}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0}. \quad (2.34)$$

Підставивши (2.34) в (2.30), (2.32), отримаємо

$$\dot{y} = \frac{\frac{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0}{V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y}_0} - e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}}}{\frac{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0}{V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y}_0} + e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}}} V_{\text{с.д.}} + V_n, \quad (2.34^*)$$

$$y_\delta = (V_n - V_{\text{с.д.}})t - \frac{1}{k_\delta} \left(\ln \left| 1 + \frac{V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}} \right| - \ln \frac{2V_{\text{с.д.}}}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0} \right) + y_0. \quad (2.35)$$

З виразу (2.35) можна знайти час підйому домішки на задану висоту. Так, наприклад, на висоту h , домішка підніметься за час T_h , який є розв'язком отриманого рівняння.

$$h = (V_n - V_{\text{с.д.}})T_h - \frac{1}{k_\delta} \left(\ln \left| 1 + \frac{V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}} \right| - \ln \frac{2V_{\text{с.д.}}}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0} \right) + y_0. \quad (2.35^*)$$

Розв'яжемо перше рівняння системи (2.26). Підставимо вираз (2.29) в перше рівняння системи (2.26)

$$\dot{u} = -k_\delta \frac{1 - C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}}}{1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}}} V_{\text{с.д.}} u. \quad (2.36)$$

Інтегруємо останнє рівняння

$$\ln u = -k_\delta V_{\text{с.д.}} \int \frac{1 - C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}}}{1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}}} dt + \ln C_3,$$

де $C_3 > 0$ – постійна інтегрування. Враховуючи (2.31), маємо:

$$\ln u = -\frac{k_\delta V_{\text{с.д.}}}{-2\sqrt{gk_\delta}} \left(-2\sqrt{gk_\delta t} - 2 \ln \left| 1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}} \right| \right) + \ln C_3,$$

або

$$u = C_3 \frac{e^{\sqrt[2]{gk_\delta t}}}{1 + C_1^{(q)} e^{-\sqrt[2]{gk_\delta t}}}. \quad (2.37)$$

Робимо зворотню заміну ($u = \dot{x}$) і розділяємо змінні

$$dx = C_3 \frac{e^{\sqrt{gk_\partial} t}}{\left| 1 + C_1^{(q)} e^{\sqrt{gk_\partial} t} \right|} dt.$$

Інтегруємо

$$x = \begin{cases} \frac{-C_3}{\sqrt{gk_\partial}} \frac{1}{2\sqrt{C_1}} \ln \left| \frac{1 + \sqrt{C_1} e^{\sqrt{gk_\partial} t}}{1 - \sqrt{C_1} e^{\sqrt{gk_\partial} t}} \right| + C_4 & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} > 0, \\ \frac{-C_3}{\sqrt{gk_\partial}} \frac{1}{\sqrt{C_1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{C_1} e^{\sqrt{gk_\partial} t} \right) + C_4 & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} \leq 0. \end{cases} \quad (2.38)$$

де C_4 – постійна інтегрування.

Постійні інтегрування C_3 , C_4 знаходимо з граничних умов:

$$x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0. \quad (2.39)$$

З виразів (2.37)-(2.39) маємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_0 = \frac{C_3}{\left| 1 + C_1^{(q)} \right|}, \\ x_0 = \begin{cases} \frac{-C_3}{\sqrt{gk_\partial}} \frac{1}{2\sqrt{C_1}} \ln \left| \frac{1 + \sqrt{C_1}}{1 - \sqrt{C_1}} \right| + C_4 & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} > 0, \\ \frac{-C_3}{\sqrt{gk_\partial}} \frac{1}{\sqrt{C_1}} \operatorname{arctg} \sqrt{C_1} + C_4 & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} \leq 0. \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.40)$$

З останньої системи з врахуванням (див. (2.29*), (2.34*)) маємо

$$C_1 = \begin{cases} \frac{V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0} & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} > 0; \\ -\frac{V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0} & \text{при } V_{\text{с.д.}} - V_n + \dot{y} \leq 0. \end{cases} \quad (2.40^*)$$

Отримуємо

$$C_3 = \frac{2V_{\text{с.д.}} \dot{x}_0}{V_{\text{с.д.}} + V_n - \dot{y}_0},$$

$$C_4 = \begin{cases} x_0 + \frac{\dot{x}_0}{k_\partial \sqrt{V_{\epsilon.\partial.}^2 - (V_n - \dot{y}_0)^2}} \ln \frac{V_{\epsilon.\partial.} + \sqrt{V_{\epsilon.\partial.}^2 - (V_n - \dot{y}_0)^2}}{V_n - \dot{y}_0} & \text{при } V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0 > 0, \\ x_0 + \frac{2\dot{x}_0}{k_\partial \sqrt{(V_n - \dot{y}_0)^2 - V_{\epsilon.\partial.}^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{V_n - \dot{y}_0 - V_{\epsilon.\partial.}}{V_n - \dot{y}_0 + V_{\epsilon.\partial.}}} & \text{при } V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0 \leq 0. \end{cases} \quad (2.41)$$

Підставивши (2.40*), (2.41) в (2.38) маємо

$$x = \begin{cases} x_0 - \left\{ \ln \frac{e^{\sqrt{gk_\partial t}} + \sqrt{\frac{V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\epsilon.\partial.} + V_n - \dot{y}_0}}}{e^{\sqrt{gk_\partial t}} - \sqrt{\frac{V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\epsilon.\partial.} + V_n - \dot{y}_0}}} - \frac{\dot{x}_0}{k_\partial \sqrt{V_{\epsilon.\partial.}^2 - (V_n - \dot{y}_0)^2}} \right\} & \text{при } V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0 > 0 \\ x_0 - \left\{ -\ln \frac{V_{\epsilon.\partial.} + \sqrt{V_{\epsilon.\partial.}^2 - (V_n - \dot{y}_0)^2}}{V_n - \dot{y}_0} \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{V_{\epsilon.\partial.} - V_n - \dot{y}_0}{V_{\epsilon.\partial.} - V_n - \dot{y}_0}} e^{\sqrt{gk_\partial t}} \right) - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{V_n - \dot{y}_0 - V_{\epsilon.\partial.}}{V_n - \dot{y}_0 + V_{\epsilon.\partial.}}} \frac{2\dot{x}_0}{k_\partial \sqrt{(V_n - \dot{y}_0)^2 - V_{\epsilon.\partial.}^2}} \right\} & \text{при } V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0 \leq 0. \end{cases} \quad (2.42)$$

З рівності (2.42) можна знайти час T_C , за який домішка пройде канал глибиною C . Цей час знаходиться через розв'язок рівняння:

$$C = \begin{cases} x_0 - \left\{ \ln \frac{e^{\sqrt{gk_\partial T_C}} + \sqrt{\frac{V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\epsilon.\partial.} + V_n - \dot{y}_0}}}{e^{\sqrt{gk_\partial T_C}} - \sqrt{\frac{V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0}{V_{\epsilon.\partial.} + V_n - \dot{y}_0}}} - \frac{\dot{x}_0}{k_\partial \sqrt{V_{\epsilon.\partial.}^2 - (V_n - \dot{y}_0)^2}} \right\} & \text{при } V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0 > 0 \\ x_0 - \left\{ -\ln \frac{V_{\epsilon.\partial.} + \sqrt{V_{\epsilon.\partial.}^2 - (V_n - \dot{y}_0)^2}}{V_n - \dot{y}_0} \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{V_{\epsilon.\partial.} - V_n - \dot{y}_0}{V_{\epsilon.\partial.} - V_n - \dot{y}_0}} e^{\sqrt{gk_\partial T_C}} \right) - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{V_n - \dot{y}_0 - V_{\epsilon.\partial.}}{V_n - \dot{y}_0 + V_{\epsilon.\partial.}}} \frac{2\dot{x}_0}{k_\partial \sqrt{(V_n - \dot{y}_0)^2 - V_{\epsilon.\partial.}^2}} \right\} & \text{при } V_{\epsilon.\partial.} - V_n + \dot{y}_0 \leq 0. \end{cases} \quad (2.43)$$

Аналіз графічних залежностей траєкторій зернівок та безконтактного руху легких часток (рис. 2.7) дозволяє відмітити, що при відсутності контакту легких фракцій із зерном виділення домішок відбувається по всій глибині ПСК.

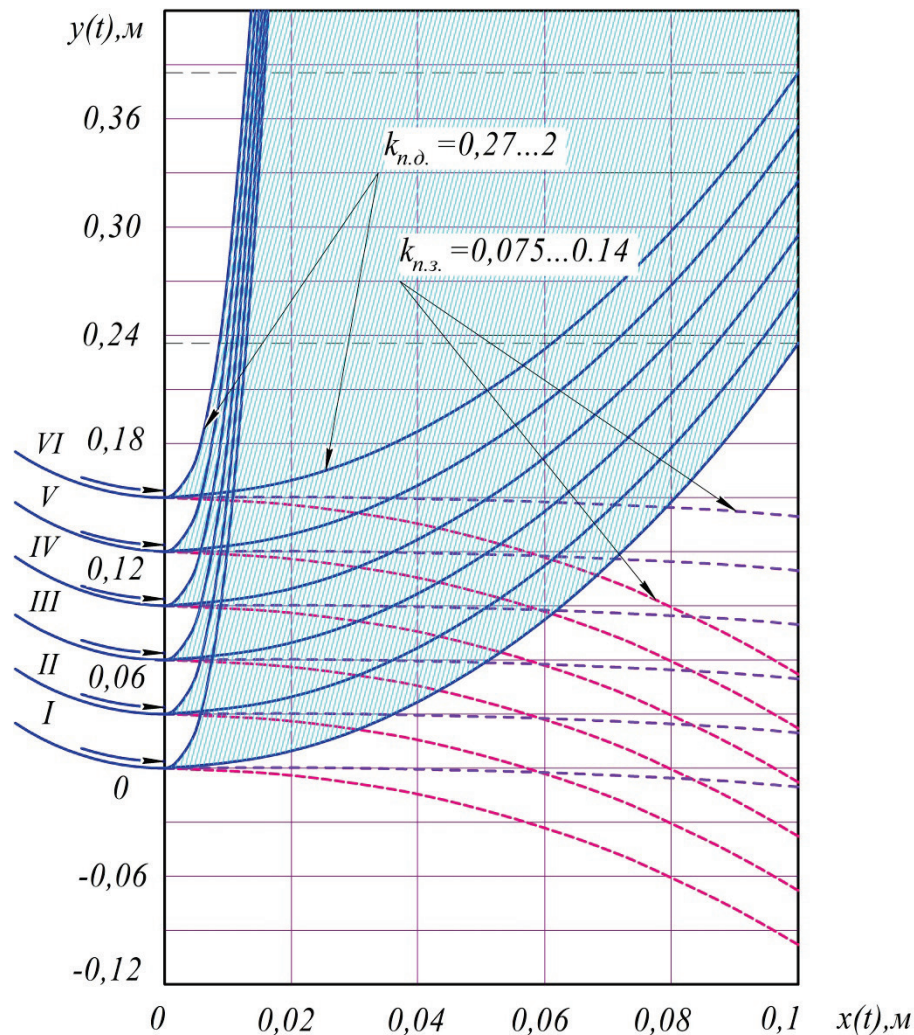


Рис. 2.7. Траєкторії польоту зерна та легких домішок при безконтактному польоті через зернові шари при багаторівневому введенні матеріалу за умов: початкова швидкість введення в ПСК $v_e = 0,5$ м/с, швидкість повітря $V_n = 8$ м/с, міжрівнева відстань $h_{м.р.} = 0,03$ м, кількість рівнів $n = 6$

При цьому, траєкторії легких домішок з першого рівня, що характеризуються коефіцієнтом парусності $k_{n.д.} = 0,27$, досягають задньої стінки ПСК на висоті $0,27...0,28$ м, перетинаючи траєкторії зернових фракцій на глибині каналу $C = 0,08$ м. Аналогічні траєкторії домішок з другого по шостий рівень введення досягають цієї ж висоти на проміжку глибини каналу від $0,9$ до $0,6$ м відповідно, а перетинають всі зернові шари до глибини ПСК $C = 0,07$ м.

Це доводить, що значна частина легких домішок, які виділились, не впливають на зміну концентрації зернової суміші і, відповідно, на якість процесу розділення. При цьому, з траєкторій польоту легкої фракції, які мають найменшу швидкість витання видно, що незалежно від рівня введення, такі домішки виділяються на проміжку глибини каналу $C = 0 \dots 0,016$ м. Відповідно, для домішок з коефіцієнтом парусності $k_{n.d.} = 0,27$, залежно від рівня введення, зміщення траєкторії по осі y відбувається в межах $0,23 \dots 0,38$ м.

2.2.3. Дослідження контактного руху легких домішок при багаторівневій подачі зернового матеріалу в ПСК

При багаторівневому введенні зернового матеріалу домішки, які виділяються з нижніх зернових шарів, повинні пройти через усі верхні шари. При цьому вони мають пройти останній шар до того, як досягнуть задньої стінки каналу. Враховуючи те, що траєкторія домішок може змінюватись після контакту з зерном, то найбільш несприятливою є ситуація для домішок самого нижнього шару. Тому за критерій якості роботи (відносно кількості шарів зернового матеріалу) пневмосепаратора виберемо умову:

$$T_{\text{гор}} > T_{\text{вер}} = \sum_{i=n}^{i=2n} T_i, \quad (2.44)$$

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

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

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

n - кількість шарів зернового матеріалу, шт.

Контактний рух домішок в багат шаровому потоці зерна є ступінчастим, кожна ступінь – проходження чергового шару і рух між шарами. 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 (рис. 2.8). Це зміщення є випадковою величиною і може прийняти будь-яке значення з області $[0; 2R]$.

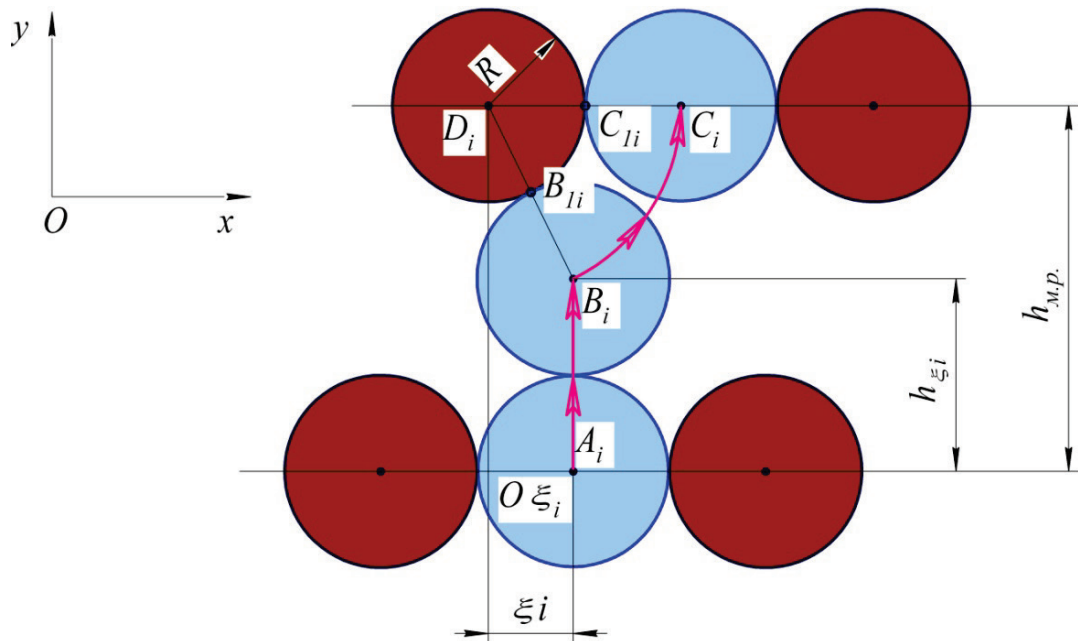


Рис. 2.8. Схема проходження домішки крізь шар зерна

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. 2.8):

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

Рух на кожному з ступенів описується аналогічними рівняннями. Відмінність полягає тільки в початкових умовах (2.33), (2.39), які змінюються від одного шару до іншого – кінцеві умови на попередньому зерновому шарі є початковими умовами для наступного.

Безконтактний рух домішок описаний в п.п. 2.3.2.

Алгоритм усереднення наступний.

1) 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. 2.8):

$$h_{\xi_i} = h_{м.р.} - \sqrt{4R^2 - \xi_i^2};$$

- час безконтактного польоту $t_{\xi_i}^{(1)}$, як розв'язок рівняння (див. (2.35))

$$h_{\xi_i} = (V_n - V_{с.д.})t_{\xi_i}^{(1)} - \frac{1}{k_\partial} \left(\ln \left| 1 - \frac{V_n - \dot{y}_0 - V_{с.д.}}{V_n - \dot{y}_0 + V_{с.д.}} e^{-\sqrt[2]{gk_\partial t_{\xi_i}^{(1)}}} \right| - \ln \frac{2V_{с.д.}}{V_n - \dot{y}_0 + V_{с.д.}} \right) + y_0,$$

- швидкість V_{ξ_i} домішок в момент зіткнення (див. (2.34*)):

$$V_{\xi_i} = \frac{\frac{V_n - \dot{y}_0 + V_{с.д.}}{V_n - \dot{y}_0 - V_{с.д.}} - e^{-\sqrt[2]{gk_\partial t_{\xi_i}^{(1)}}}}{\frac{V_n - \dot{y}_0 + V_{с.д.}}{V_n - \dot{y}_0 - V_{с.д.}} + e^{-\sqrt[2]{gk_\partial t_{\xi_i}^{(1)}}}} V_{с.д.} + V_n,$$

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

$$\beta_{\xi_i} = \arcsin \frac{\xi_i}{2R}.$$

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

$$V_{\xi_i}^{(1)} = \dot{y}_{\xi_i} (\sin \beta_{\xi_i} - f \cos \beta_{\xi_i})$$

або

$$V_{\xi_i}^{(1)} = -V_{с.д.} \cdot \left(\frac{\xi_i}{2R} - f \sqrt{1 - \frac{\xi_i^2}{4R^2}} \right) \cdot \frac{\frac{V_n - \dot{y}_0 + V_{с.д.}}{V_n - \dot{y}_0 - V_{с.д.}} + e^{-\sqrt[2]{gk_\partial t_{\xi_i}^{(1)}}}}{\frac{V_n - \dot{y}_0 + V_{с.д.}}{V_n - \dot{y}_0 - V_{с.д.}} - e^{-\sqrt[2]{gk_\partial t_{\xi_i}^{(1)}}}}. \quad (2.45)$$

3) Знаходимо закон руху домішок по зерну.

Для цього 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.

Рух домішок по зерну опишемо в рухомій системі координат $O_{\xi i} s \rho, / i = \overline{2, n} /$ (рис. 2.9), в якій: центр $O_{\xi i}$ співпадає з центром мас окремих частинок домішок; вісь $O_{\xi i} s$ паралельна дотичній до поверхні зерна в точці контакту з домішками; вісь $O_{\xi i} \rho$ направлена в сторону точки дотику.

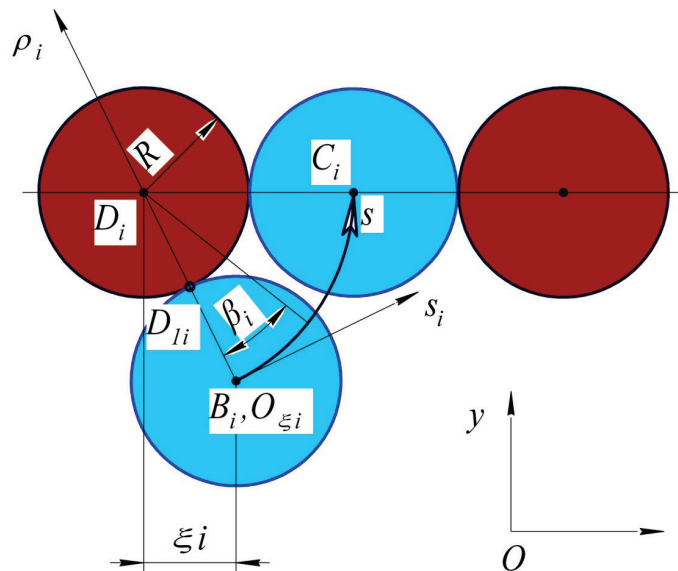


Рис. 2.9. Схема руху домішок під час контакту з зерном

При цьому домішки рухаються під дією сили інерції, сили опору повітря і сили ваги, тому рівняння руху в вибраній системі координат має вигляд:

$$m\ddot{s} = mk_o (V_n - \dot{s})^2 - mg \sin \beta,$$

де β - кут контакту домішок по зерну, град.

Оскільки

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

то останнє рівняння приймає вигляд:

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} = \left[k_\partial R \left(\frac{d\beta}{dt} - \frac{V_n}{R} \right)^2 - \frac{g}{R} \right] \sin \beta. \quad (2.46)$$

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 (2.46):

$$(Ru + V_n) \frac{du}{d\beta} = k_\partial (R^2 u^2 - V_{\text{с.д.}}^2) \sin \beta.$$

Розділяємо змінні

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

і інтегруємо

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

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

Зробивши зворотну заміну

$$\frac{1}{2k_\partial R} \left(\ln \left| (R\dot{\beta} - V_n)^2 - V_{\text{с.д.}}^2 \right| + \frac{V_n}{V_{\text{с.д.}}} \ln \left| \frac{R\dot{\beta} + V_n + V_{\text{с.д.}}}{R\dot{\beta} + V_n - V_{\text{с.д.}}} \right| \right) = \cos \beta + C_{1i} \cdot /i = \overline{2, n}/. \quad (2.47)$$

Постійну інтегрування C_1 знаходимо з початкових умов

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

Маємо

$$C_1 = \frac{1}{2k_\partial R} \left(\ln \left| (V_{\xi i}^{(1)} - V_n)^2 - V_{\text{с.д.}}^2 \right| + \frac{V_n}{V_{\text{с.д.}}} \ln \left| \frac{V_{\xi i}^{(1)} + V_n + V_{\text{с.д.}}}{V_{\xi i}^{(1)} + V_n - V_{\text{с.д.}}} \right| \right) = \cos \beta_{\xi i} + C_1, \quad /i = \overline{2, n}/$$

Підставивши C_1 в (2.47), отримаємо:

$$\ln \left| (R\dot{\beta} - V_n)^2 - V_{\text{с.д.}}^2 \right| + \frac{V_n}{V_{\text{с.д.}}} \ln \left| \frac{R\dot{\beta} + V_n + V_{\text{с.д.}}}{R\dot{\beta} + V_n - V_{\text{с.д.}}} \right| - \ln \left| (V_{\xi i}^{(1)} - V_n)^2 - V_{\text{с.д.}}^2 \right| +$$

$$+\frac{V_n}{V_{\text{с.д.}}} \ln \left| \frac{V_{\xi_i}^{(1)} + V_n + V_{\text{с.д.}}}{V_{\xi_i}^{(1)} + V_n - V_{\text{с.д.}}} \right| - 2k_{\text{д}} R (\cos \beta - \cos \beta_{\xi_i}) = 0, \quad / i = \overline{2, n} /. \quad (2.48)$$

Рівняння (2.48) не розв'язується аналітично, тому його розв'язок знаходимо наближеними числовими методами, враховуючи початкову умову

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

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

$$\beta(t_{\xi_i}^{(2)}) = \frac{\pi}{2}, \quad / i = \overline{2, n} /. \quad (2.49)$$

З умови (2.49) 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 $V_{\xi_i}^{(2)} = \dot{\beta}(t_{\xi_i}^{(2)}) R$ $/ i = \overline{2, n} /$.

4) Знаходимо усереднені значення T_i , $/ i = \overline{2, n} /$ - час проходження домішок через i - тий шар та V_i , $/ i = \overline{2, n} /$ - лінійну швидкість при виході з цього зернового шару:

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

5) За формулою (2.44) знаходимо загальний час проходження домішок з нижнього шару через усі зернові шари $T_{\text{вер}}$.

За результатами аналітичних досліджень були отримані усереднені траєкторії польоту легких часток при контактному русі через вище розміщені зернові шари (рис. 2.10.).

Траєкторії руху легких домішок (рис. 2.10), з урахуванням контакту із зерновими шарами, відхиляються по глибині ПСК (до задньої стінки каналу), за таких умов при глибині $C = 0,11$ м спостерігається повне виділення домішок із IV по VI рівень введення. В той же час легка фракція, яка потрапляє в ПСК з I по III рівень, досягає задньої стінки каналу в зоні виведення очищеного зерна, тому можливість її повного виділення знижується.

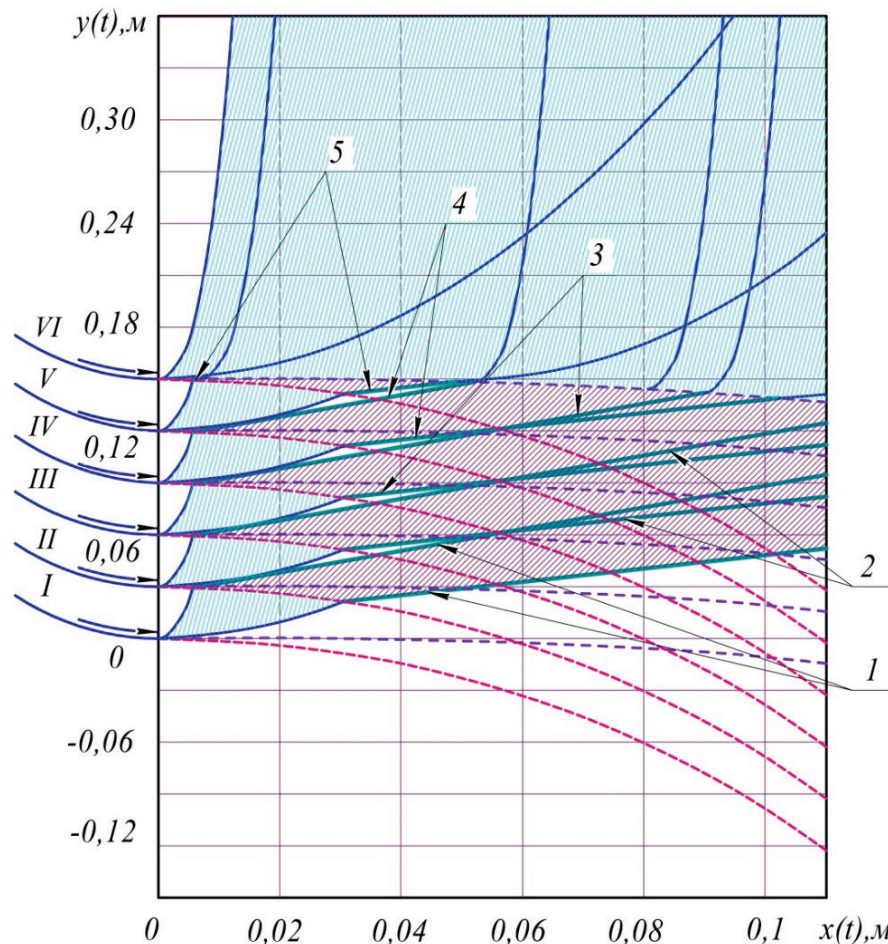


Рис. 2.10. Траєкторії руху легких домішок з врахуванням контактної взаємодії з зерновими шарами при багаторівневому введенні матеріалу за умов: початкова швидкість введення в ПСК $v_e = 0,5$ м/с, швидкість повітряного потоку $V_n = 8$ м/с, міжрівнева відстань $h_{м.р.} = 0,03$ м, кількість задіяних рівнів $n = 6$; 1 - 5 – траєкторії контактного руху домішок з I по V рівень, відповідно

З врахуванням зміни траєкторій руху важких та легких фракцій, під час продування повітряним потоком та при контактній взаємодії, можна визначити місце встановлення жалюзійної стінки, за допомогою якої важка фракція виводиться із зони дії повітряного потоку. Так, на основі отриманих графічних залежностей (рис. 2.10) можна стверджувати, що при шестирівневому введенні місце встановлення верхньої точки жалюзійної стінки, відносно I рівня введення $h_{ж.в.}$, повинна знаходитись на висоті $h_{ж.в.} = 0,05 \dots 0,055$ м. При цьому, траєкторії домішок перетинаються переважно з траєкторіями некондиційного зерна, а повноцінне зерно, яке знаходиться вище жалюзійної стінки, рухаючись вздовж неї, також потрапляє в вивідний канал.

При чотирьох- та п'ятирівневому введенні збільшується вірогідність повного виділення домішок, оскільки при $n = 4$ верхня точка жалюзійної стінки, відносно I рівня введення, розміщується на висоті $h_{ж.в.} = 0,11...0,12$ м, а для $n = 5 - h_{ж.в.} = 0,08...0,1$ м, при цьому траєкторії польоту легкої фракції, з врахуванням контактного зміщення, знаходяться вище цих значень.

Для отримання якісної характеристики пневмосепарації при багаторівневому введенні зернового матеріалу необхідно провести дослідження кількісного розподілу легких домішок.

2.3. Визначення якісних показників процесу сепарації з багаторівневим введенням зернового матеріалу по висоті ПСК

Після потрапляння в ПСК кожна з домішок за час проходження глибини каналу встигає піднятися на певну висоту. Ця висота залежить від того, яким чином відбувався її контакт із зерном при проходженні кожного шару, а саме в яких точках поверхні частинки домішки і зерна.

В попередньому розділі (див. розд. 2.2.3) досліджувався усереднений рух домішок. Усереднення проводилось по відстані (горизонтальній) між центрами мас домішок і зернини в момент їхнього зіткнення – $\xi_i \in [0; 2R]$, $/i = \overline{1, n}/$. При цьому, усі домішки після проходження чергового шару мали однакові (усереднені) кінематичні характеристики – вертикальну складову швидкості ($V_i, /i = \overline{1, n}/$) на виході з шару і час (момент) виходу з шару ($t_i, /i = \overline{1, n}/$).

Для отримання розподілу домішок потрібно розрізняти їхні кінематичні характеристики на виході з кожного шару. Кожна частинка домішок на виході з чергового шару матиме свої (відмінні від інших) значення швидкості і час виходу з шару. Вони залежатимуть від положення ($\xi_i, /i = \overline{1, n}/$) точки контакту домішок з зерною часткою з чергового верхнього шару. При цьому час виходу з шару буде мінімальний, якщо домішки вільно пройдуть між зернинами – $\xi_i \rightarrow 2R, /i = \overline{1, n}/$, і максимальний, якщо відстань між центрами їх

Оскільки тривалість руху домішок для деяких груп стає більшою за час проходження зерновим матеріалом глибини ПСК, то кількість груп для зернових шарів може бути суттєво меншою. Ймовірність виділення таких домішок суттєво зменшується, оскільки досягаючи жалюзійної стінки вони можуть потрапити у вікно для прийому очищеного зерна, і не будуть приймати участь в проходженні наступних шарів.

Алгоритм отримання розподілу домішок по висоті наступний.

1). Знаходимо діапазон висот, на які можуть піднятися домішки за час проходження ними глибини ПСК.

Для цього визначаємо:

- мінімальну висоту підйому $Y_{\min}$ – домішок з нижнього шару зіштовхується з зернинами усіх шарів за найнесприятливіших умов (майже лобовий удар) для проходження шару ($\xi_i \rightarrow 0$, $/i = \overline{1, n}/$);

- максимальну висоту підйому $Y_{\max}$ – домішки з верхнього шару вільно піднімаються вгору ($\xi_i \rightarrow 2R$, $/i = \overline{1, n}/$).

2) Задаємо масштаб висоти підйому домішок

$$\Delta Y = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{n},$$

де n – кількість зернових шарів.

3) Розподіл домішок з першого шару.

3.1) Знаходимо кінематичні характеристики домішок першого шару на виході з другого шару – $V_{2,j}$, $t_{2,j}$, $/j = \overline{1, N}/$. Якщо $t_{2,j} > T$, де T – час проходження зерновим матеріалом ПСК, то домішка не встигне пройти крізь другий зерновий шар і виноситься у вивідний канал для очищеного зерна.

Проводимо детальний аналіз проходження домішок через зерновий шар і визначаємо кінцеву висоту їх підйому – в який з n зернових шарів вона потрапляє.

3.2) Знаходимо кінематичні характеристики домішок першого шару на виході з третього шару – $V_{3,j}$, $t_{3,j}$, $/j = \overline{1, N^2}/$. Якщо $t_{3,j} > T$, то домішки виносяться разом з зерновим потоком в вивідний канал для очищеного зерна.

Визначаємо в який з рівнів висот потрапляють домішки після проходження через зерновий шар.

3.3) Усі інші шари ($i = \overline{4, n}$) проводяться аналогічно.

3.4) Після проходження останнього шару домішки здійснюють вільний політ (рухаються набагато швидше), тому над останнім шаром розсіювання домішок по висоті буде більшим (крива розподілу буде нижчою). Для кожної такої частинки домішок теж визначається рівень висоти, якого вона досягає.

4) Розподіли домішок з другого до передостаннього шарів визначаються аналогічно (див. п.3). При цьому домішки з усіх зернових шарів сумуються по рівнях висоти.

Вище розглянуто зерновий потік максимальної продуктивності $Q_{\max}$ – потік, в якому відстань l між поверхнями зернин в напрямку руху зернового потоку рівна їхньому розміру ($2R$). У випадку розрідженого зернового потоку ($l/2R = f_p > 1$, де f_p – коефіцієнт розрідженості) для області зміни відстані ξ_{ij} між центрами мас домішки і зернини потрібно ввести додатковий $N+1$ -ий інтервал довжиною $l-2R$. Цей інтервал буде нерівноцінний з першими N – він може бути як меншим так і більшим. Тому при проходженні кожного шару кількість домішок, які попадають в групи, що відповідають додатковому інтервалу, потрібно врахувати коефіцієнтом $2R/[N(l-2R)]$.

На основі запропонованого алгоритму за допомогою програми Mathcad [125] визначені варіаційні криві розподілу (див. додаток Г) які дозволяють, в залежності від основних параметрів ПСК та вхідного зернового потоку отримати кількісну характеристику домішок після проходження кожного наступного зернового шару.

За результатами такого розподілу отримано відсотковий вміст домішок, що залишились в очищеному зерні для кожного рівня введення (рис. 2.12, б), та загальну кількість легкої фракції, яка виділилась в осадову камеру (рис. 2.12, а).

Аналіз варіаційного розподілу легких домішок в робочій зоні ПСК дозволяє відзначити, що кількість легкої фракції, яка виділилась в осадову

камеру залежить від кількості задіяних рівнів введення та місця встановлення верхньої точки жалюзійної стінки вивідного каналу (рис. 2.12).

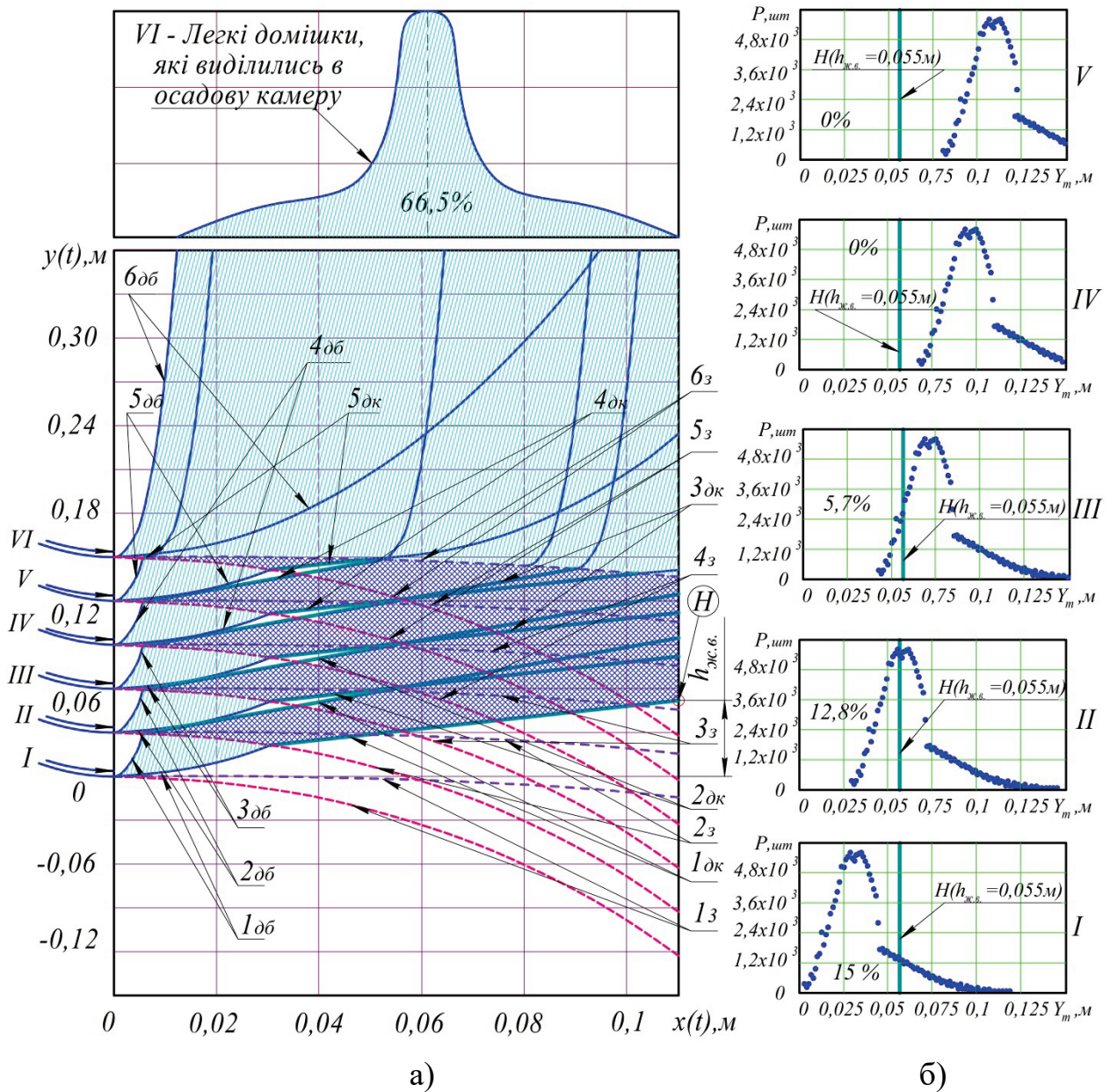


Рис. 2.12. Траєкторії контактного руху домішок (а) та їх кількісна характеристика в очищеному зерні (б) при багаторівневому введенні:
 $1\text{з} - 6\text{з}$ – траєкторії руху зернової фракції відповідно з 1 по 6 рівень введення;
 $1\delta\text{бк} - 6\delta\text{бк}$ – траєкторії безконтактного руху домішок з 1 по 6 рівень введення;
 $1\delta\text{к} - 5\delta\text{к}$ – траєкторії контактного руху домішок з 1 по 5 рівень введення;
 $\text{I} - \text{V}$ – кількісна характеристика та відсотковий вміст домішок в важкій фракції з 1 по 5 рівень введення відповідно.

Так, при подачі зернового матеріалу на шести рівнях повнота виділення легких домішок становить 66,5% (рис. 2.12, а) при цьому, кількість легких

домішок, які потрапили до очищеного зерна – 33,5 %, з них 27,8 % з I та II рівнів (рис. 2.12, б). За таких умов верхня точка жалюзійної стінки H (рис. 2.12, а), знаходиться на висоті $h_{ж.в.} = 0,055$ м, що також відмічена вертикальною прямою на рис. 2.12, б.

Відповідно, при зменшенні кількості задіяних рівнів збільшується кількість домішок, що виділились повітряним потоком, але це призводить до зменшення питомого навантаження на ПСК. При цьому, траєкторія домішок з I рівня введення з врахуванням контактного руху та точка H (рис. 2.12, а) буде підніматись вгору, відповідно, вертикальна пряма (рис. 2.12, б), буде зміщуватись вправо залежно від кількості задіяних рівнів введення.

Приведена характеристика та варіаційний розподіл легких домішок отриманий для зернового потоку при одношаровому розміщенні з максимальною щільністю в ПСК з інтервалом в $2R$. Відповідно, при збільшенні відстані між зерновими частками в ПСК збільшується вірогідність виділення легких домішок в осадову камеру, але при цьому буде зменшуватись величина q_{bi} .

Тому для визначення якісних показників при зміні питомого навантаження був введений коефіцієнт, який враховує ступінь розрідженості зернового потоку в кожному рівні.

З урахуванням цього, продуктивність розрідженого зернового потоку буде визначатись виразом:

$$q_{В\text{ розр}} = q_B \frac{2}{1 + f_p} \quad (2.50)$$

Продуктивність ПСК з урахуванням розрідження зернового потоку:

$$q_{В\text{ ПСК}} = 3600 \frac{\pi}{6} (B \cdot v_{\epsilon} \cdot n \cdot R \cdot \gamma) \cdot \frac{2}{1 + f_p} \quad (2.51)$$

де B – ширина каналу, м;

v_{ϵ} – швидкість введення матеріалу в канал, м/с;

n – кількість рівнів, шт;

R – радіус зерна, м;

γ – об’ємна маса зерна, кг/м^3 ;

f_p – коефіцієнт розрідження зернового потоку в ПСК.

За результатами розподілу з урахуванням коефіцієнту розрідження зернового потоку f_p (див. додаток Г) отримано аналітичну залежність повноти розділення ε від величини питомого навантаження ПСК q_B при багаторівневому введенні зерна (рис. 2.13).

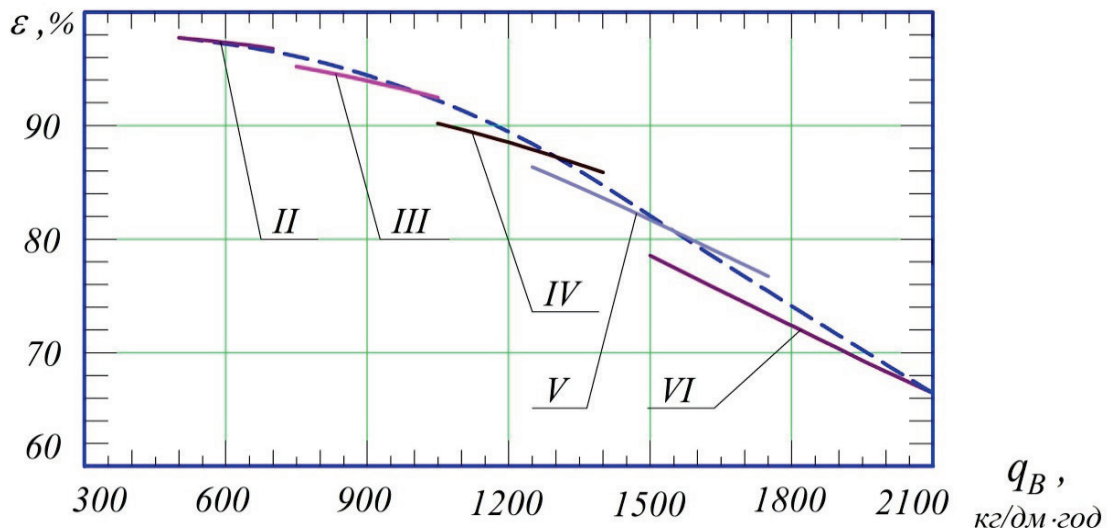


Рис. 2.13 Аналітична залежність повноти розділення зернового матеріалу від величини питомого навантаження ПСК, $\varepsilon = f(q_B)$:
II – VI – кількість задіяних рівнів введення

Аналіз отриманих залежностей свідчить (рис. 2.13), що при підвищенні питомого навантаження q_B і, відповідно, збільшенні кількості рівнів введення, повнота розділення ε зменшується, при цьому величина питомого навантаження ПСК q_B , залежить від кількості задіяних рівнів.

Зменшення якості сепарації можна пояснити збільшенням кількості вірогідних зіткнень легких частинок, які рухаються з нижче розташованих зернових шарів, відповідно, при цьому зменшується вихідна швидкість з кожним пройденим шаром та час на подолання глибини каналу C .

Приведені залежності отримані при питомому навантаженні на рівень живильного пристрою $q_{bi} = 250 \dots 350$ $\text{кг/дм} \cdot \text{год}$, при якому забезпечується одношарове введення зернового матеріалу. Так, при задіюванні двох рівнів введення повнота розділення становить $\varepsilon = 97 \dots 98$ %, при цьому питоме

навантаження на ПСК змінюється в межах 500...700 кг/дм·год. Для чотирирівневого введення зернового матеріалу в ПСК повнота розділення становить $\varepsilon = 86...91\%$, при цьому питоме навантаження на ПСК можна встановити від 1000 до 1400 кг/дм·год, а при задіюванні 6 рівнів отримуємо $\varepsilon = 66,5...78,2\%$, при питомому навантаженні $q_B = 1500$ до 2100 кг/дм·год.

З вищевикладеного можна зробити висновок, що зменшення кількості задіяних рівнів сприяє підвищенню якості сепарації, але при цьому, зменшується величина питомого навантаження, а отже й продуктивність ПСК, при цьому, кількість задіяних рівнів залежить від призначення очищення.

Висновки по розділу

В результаті проведених теоретичних досліджень встановлені конструктивні та технологічні параметри ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу, обґрунтовані умови одношарового введення зернового матеріалу в зону сепарації та визначені закономірності руху зернових часток та домішок для означених умов.

1. Швидкість введення зернового матеріалу в ПСК залежить від основних параметрів на прямої гравітаційної кривої живильного пристрою (2.9): кута нахилу α , довжини розгінної ділянки L_p та радіуса дуги r . Визначено, що для забезпечення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК $v_g = 0,5...0,6$ м/с., довжина розгінної ділянки повинна бути $L_p = 0,2$ м, кут її нахилу $\alpha = 33^\circ$, радіус дуги направляючої $r = 0,15$ м.

2. Удосконалено математичні моделі пневмосепарації в вертикальному ПСК за умови одношарового введення зернового матеріалу, які описують траєкторії польоту зернівок (2.20), та безконтактного польоту легких часток (2.35), (2.42) з урахуванням засміченості зернового потоку. Визначено, що при безконтактному польоті легкі домішки, що характеризуються коефіцієнтом парусності $0,27 \leq k_{n.d.} \leq 2$ виділяються по всій глибині ПСК, при цьому перетинають траєкторії зернових шарів за умови шестирівневого введення, на глибині каналу $C = 0,08$ м.

3. Виділення легких домішок залежить від часу та швидкості проходження через зернові шари, які змінюються залежно від кута контакту домішок з зерном, а також від місця встановлення верхньої точки жалюзійної стінки $h_{ж.в.}$. Так, при шестирівневому введенні 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.

4. Встановлено закономірність контактного руху легких домішок при багаторівневому введення зернового матеріалу в ПСК, яка дозволяє отримати усереднені траєкторії домішок після взаємодії з зерновими шарами під час розділення. Визначено, що при кількості рівнів $n = 6$, $V_n = 8$ м/с повне виділення домішок відбувається із IV по VI рівень введення.

5. Залежно від вихідних параметрів – кількості задіяних рівнів живильника n , швидкості повітряного потоку V_n та концентрації зернових частинок в каналі, отримано кількісну характеристику домішок після проходження кожного наступного зернового шару. Так, при максимальній щільності зернового потоку ($l = 2R$) з питомим навантаженням $q_{bi} = 350$ кг/дм·год та кількістю рівнів $n = 6$ повнота розділення становить $\epsilon = 66,5\%$, при цьому, кількість легких домішок, які потрапили до важкої фракції – $33,5\%$, з них $27,8\%$ з I та II рівнів введення.

6. Збільшення відстані між зернинами в горизонтальному напрямку руху в ПСК більше $2R$, сприяє підвищенню якості розділення матеріалу, що підтверджує отримана аналітична залежність повноти розділення ϵ від продуктивності ПСК q_B . Визначено, що зменшення кількості задіяних рівнів сприяє підвищенню якості сепарації, але при цьому обмежується величина питомого навантаження на ПСК.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень, встановлення закономірностей сепарації на реальному матеріалі та визначення впливу конструктивних та технологічних параметрів ПСК, а також властивостей оброблюваного зернового матеріалу на якісні показники пневмосепарації була прийнята наступна програма експериментальних досліджень:

1. Визначення характеристик зернового матеріалу:
 - аеродинамічних властивостей компонентів;
 - вологості;
 - об'ємної маси;
2. Дослідження впливу параметрів направляючої поверхні живильного пристрою на режими руху зернового потоку:
 - швидкості введення;
 - питомого навантаження.
3. Дослідження впливу щільності розташування зернового матеріалу на опір ПСК в умовах його багаторівневого введення.
4. Визначення аеродинамічної характеристики ПСК та закономірностей руху зернового матеріалу залежно від умов його введення.
5. Оцінка рівномірності розподілу зернового матеріалу та визначення засміченості очищеного зерна по висоті ПСК.
6. Дослідження процесу сепарації зерна з багаторівневим його введенням в ПСК для обґрунтування раціональних параметрів і режимів роботи пневмосепаратора.
7. Дослідження впливу засміченості та вологості зернового матеріалу на технологічну ефективність процесу пневмосепарації.
8. Визначення технологічної характеристики процесу сепарації зернового матеріалу в ПСК з вдосконаленням введенням і виведенням матеріалу.

3.2. Визначення основних характеристик зернового матеріалу

3.2.1. Визначення аеродинамічних властивостей та засміченості зернового матеріалу

В якості основної аеродинамічної характеристики компонентів зернового матеріалу прийнято швидкість витання частинок $V_{в.з.}$. З метою її визначення та встановлення варіаційної характеристики зернового матеріалу, а також характеристик його компонентів (легких домішок та зерна) був виготовлений парусний порційний класифікатор (рис. 3.1).

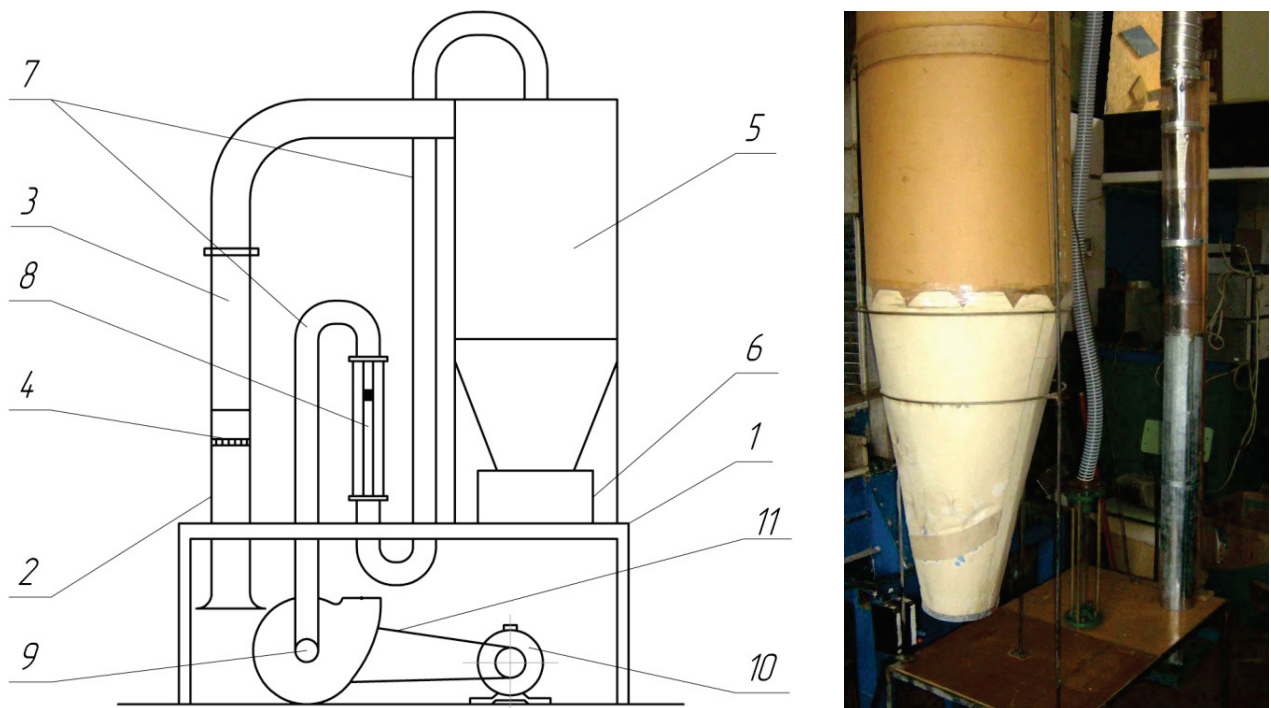


Рис. 3.1. Схема та загальний вигляд парусного порційного класифікатора

Класифікатор змонтовано на столі 1, на якому закріплений всмоктувальний трубопровід 2 із прозорою частиною 3, в нижній частині якої встановлюється касета з сітчастим дном для навіски досліджуваного матеріалу 4. Трубопровід 2 входить в циклон 5, де відбувається осадження обробленого матеріалу, який виділяється в стакан 6. Повітря всмоктується в трубопровід 2 вентилятором 9, який приводиться в роботу електродвигуном 10 через клинопасовий варіатор 11.

Швидкість повітряного потоку в робочому трубопроводі 2 регулюється за допомогою варіатора 11.

Методика відбору проб та визначення величини вихідної навіски була наступною. Із зернової суміші основної культури та домішок методом середньої проби відбирали навіски кожного компоненту.

Оскільки швидкість витання групи зерна залежить від їх концентрації в зоні вимірювання, то отримати однозначні результати можливо при дотриманні наступних умов [33]:

1. Обробка при кожному дискретному значенні швидкості повітряного потоку повинна проводитись до повного винесення зерна із каналу;
2. Величина вихідної навіски зернового матеріалу повинна бути такою, щоб його концентрація не впливала на винесення із каналу.

Тому, для вибору величини вихідної навіски зернового матеріалу при його класифікації за швидкістю витання використовували методику, запропоновану А.С. Матвеевим [33]. Вибрану навіску розміщували в стакан, який закріплено в гнізді 4 робочого трубопроводу. Послідовне підвищення швидкості повітряного потоку дозволяло виділити в стакан циклона всі частинки, що дає можливість отримати повний варіаційний ряд аеродинамічної характеристики.

За допомогою витратоміра 8 визначалась витрата повітря і розраховувалась швидкість повітряного потоку за формулою [100]:

$$V_n = \frac{W}{F}, \quad (3.1)$$

де W – витрати повітря, $\text{м}^3/\text{с}$;

F – площа поперечного перерізу трубопроводу, м^2 .

Виділення зерна кожного класу проводилось протягом 3...5 хв. Послідовним збільшенням швидкості повітряного потоку забезпечувалось виділення в приймальник всіх класів зернового матеріалу і домішок. Значення маси фракцій різних класів та відповідну швидкість повітряного потоку записували в таблицю.

Використовуючи значення мінімальної V_{nmin} і максимальної V_{nmax} швидкості повітряного потоку і вибирали класовий інтервал λ :

$$\lambda = \frac{V_{nmax} - V_{nmin}}{m}, \quad (3.2)$$

де m – число класів, шт.

За масою фракцій, виділених при кожному дискретному значенні вказаної швидкості в вихідній навісці, будували варіаційні криві, відкладаючи по осі абсцис границі класів по швидкості витання, а по осі ординат – кількість виділеного матеріалу (в відсотках).

3.2.2. Визначення вологості та об'ємної маси зернового матеріалу

Визначення вологості зерна здійснювали стандартним методом прямого висушування, згідно ДСТУ 29144 [101]. При цьому використовувалось наступне обладнання: духовка шафа марки ШСУ та електронні ваги ВЛК-500.

Визначення об'ємної маси зерна здійснювали стандартним методом згідно ДСТУ 4233 [102].

3.3. Дослідження впливу параметрів напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою на режими руху зернового потоку в ПСК

3.3.1. Визначення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК

Згідно з теоретичними та експериментальними дослідженнями [21] визначено, що найбільш ефективному розділенню зернового матеріалу відповідає горизонтальний напрямок введення. При цьому, для багаторівневого розділення необхідною умовою є забезпечення одношарового введення матеріалу.

За означених умов були проведені дослідження впливу параметрів напрямної поверхні живильника (кута нахилу розгінної ділянки α , її довжини L_p та радіуса дуги r) на швидкість введення v_e зернового матеріалу в ПСК.

Параметри розгінної ділянки змінювали в наступних межах: кут нахилу α , $\alpha_1 = 30^\circ$; $\alpha_2 = 33^\circ$; $\alpha_3 = 36^\circ$, довжину розгінної ділянки L_p – від 0,05 до 0,3 м з інтервалом в 0,05 м. Радіус дуги направляючої – $r_1 = 0,1$ м; $r_2 = 0,15$ м; $r_3 = 0,2$ м.

Швидкість введення визначали шляхом вимірювання реальних координат зернової частки в каналі [103] (рис. 3.2). При цьому, не враховувався опір повітряному потоку, внаслідок його невеликого значення при малих швидкостях руху зернового матеріалу [99].

Оскільки траєкторії руху зерна пов'язані з швидкістю введення v_e , то його координати x і y визначали для довільного положення частки. Переміщення частки по осі x за час t рівний $x = v_e \cdot t$, по осі $y = gt^2/2$.

Вирішивши систему рівнянь:

$$\begin{cases} x = v_e \cdot t \\ y = \frac{gt^2}{2} \end{cases} \quad (3.3)$$

шляхом виключення t , отримуємо вираз для визначення швидкості v_e :

$$v_e = \frac{x\sqrt{g}}{\sqrt{2y}} = x\sqrt{\frac{g}{2y}}. \quad (3.4)$$

Умови проведення дослідів були наступні:

1. Рух повітря в каналі відсутній;
2. В ПСК встановлена сітка з відповідними координатами;
3. Досліди проводились в п'ятикратній повторності.

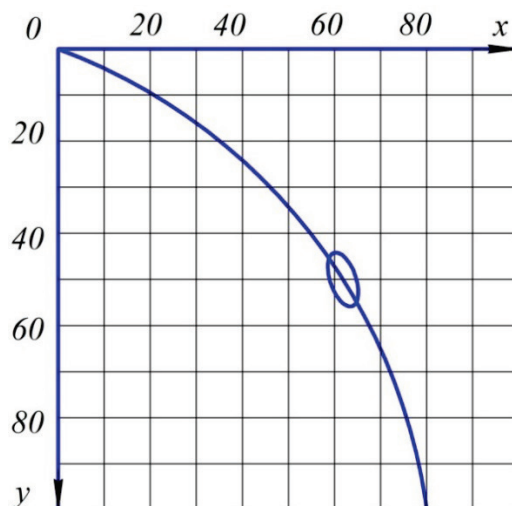


Рис. 3.2. Схема та фото визначення швидкості введення зерна

Оскільки при русі групи частинок зернового матеріалу, тобто при певному питомому навантаженні q_B , траєкторії часток розходяться, то визначалась середня швидкість введення. Для цього, фіксувались траєкторії, а отже й координати, верхньої та нижньої часток, та визначалось їх середнє значення.

3.3.2. Визначення питомого навантаження за умови одношарового введення зернового матеріалу в ПСК

Забезпечення умови одношарового введення буде визначатись параметрами напрямної поверхні живильника (кутом нахилу розгінної ділянки α , її довжиною L_p та радіусом дугоподібної ділянки r). Відповідно, змінюючи означені параметри, можна встановити величину питомого навантаження на рівень живильного пристрою q_{bi} , при якій буде забезпечено одношарову товщину зернового потоку. Параметри направляючої поверхні живильного пристрою змінювали в межах, описаних в п. 3.3.1.

Величину питомого навантаження живильного пристрою q_B , кг/дм·год, визначали шляхом зважування відповідної маси зернового матеріалу G , яка проходила через одиницю ширини каналу B за проміжок часу t . Оскільки зерновий ворох потрапляє в ПСК по декількох рівнях живильного пристрою, то загальна величина питомого навантаження буде визначатися:

$$q_B = \frac{n \cdot G}{B \cdot t}, \quad (3.5)$$

де n – кількість рівнів живильного пристрою, шт.

Завантаження бункера експериментальної установки проводили за допомогою навіски зернового матеріалу масою $G = 10$ кг та, встановивши заслінки бункера на певну величину, вимірювали час його витікання t .

Величину необхідного питомого навантаження на кожен рівень живильного пристрою можна визначити з виразу:

$$q_{bi} = \frac{q_B}{n}. \quad (3.6)$$

Після визначення q_{bi} на заслінках дозуючого пристрою наносили шкалу, що відповідає величині конкретного питомого навантаження кожного рівня живильного пристрою пневмосепаратора.

Повторюваність дослідів була п'ятикратною, з допустимою похибкою $\pm 5\%$.

3.4. Дослідження впливу щільності розташування матеріалу на опір ПСК в умовах його багаторівневого введення

Зважаючи на те, що процес пневмосепарації носить нестационарний характер, а тривалість перебування частинки матеріалу в каналі досить незначна (0,3...0,5 с), дослідження цього процесу при багаторівневому введенні матеріалу не дозволяє в повній мірі відстежити та визначити необхідні закономірності та врахувати взаємодію впливових факторів.

Тому, з метою визначення впливу щільності розташування зернових частинок при багаторівневому введенні на його опір повітряному потоку в ПСК та на енергоємність процесу була реалізована «модель процесу пневмосепарації» [5]. Тобто, зернова суміш змодельована на групі металевих стержнів, діаметр яких був підібраний близьким до середнього еквівалентного діаметру зерна пшениці (3 мм) і розташованих в ПСК горизонтально перпендикулярно до його бокових стінок та напрямку руху повітряного потоку (рис. 3.3, а).

Як свідчать теоретичні дослідження [111], гідравлічний опір пучків труб або стержнів, які поперечно обдуваються газовою сумішшю, розташованих в шаховому порядку, визначається такими ж законами як і опір зернового шару в реальних умовах процесу пневмосепарації.

Досліди проводились в каналі квадратного перерізу (100x100 мм), в якому встановлювали металеві стержні щільно один до одного. Збільшення відстані між ними в досліді здійснювали без зміни їх кількості, шляхом пересування парних стержнів в вертикальному напрямку, внаслідок чого

створювали їх двоядне розташування (рис. 3.3, б) з поступовим збільшенням відстані між рядами і відповідно, зазору між стержнями.

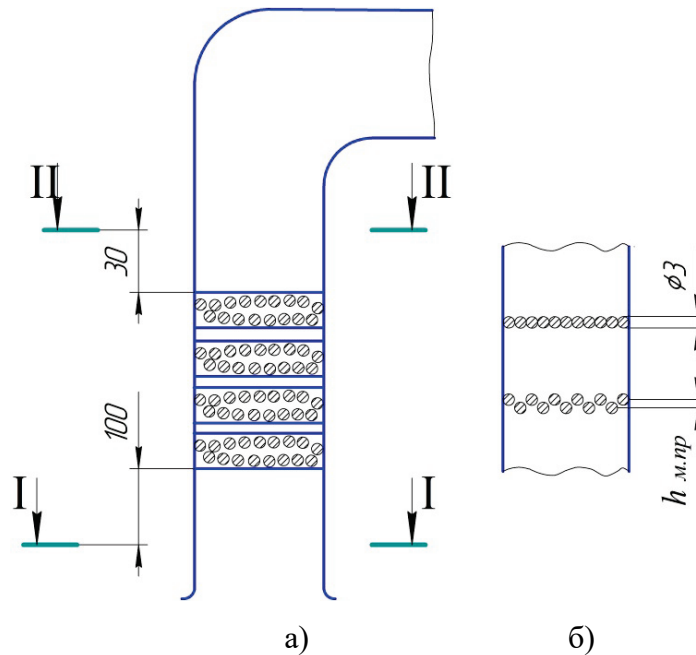


Рис 3.3. Схема дослідного ПСК: а) – схема розташування пруткових решіток; б) – розташування стержнів в каналі

Швидкість повітряного потоку встановлювали відповідно до робочої швидкості в ПСК, рівній $V_n = 7 \dots 7,5$ м/с, при якій визначали втрати статичного тиску повітря. Заміри статичного тиску виконували за допомогою експериментального мікроманометра в перетинах I-I та II-II, 100 мм під та 30 мм над місцем розташування пруткових решіток (рис. 3.3).

Гідравлічний опір змодельованих елементів визначали за формулою:

$$\zeta = \frac{2\Delta P}{\rho \cdot V_n^2}, \quad (3.7)$$

де ΔP – втрати тиску в елементі, Н/м²;

ρ – щільність повітря, кг/м³;

V_n – швидкість повітряного потоку, м/с.

Наступним етапом було визначення взаємного впливу шарів матеріалу, а також загальної оцінки енергоємності процесу. Тому, за аналогічним принципом була створена «модель процесу пневмосепарації» багатошарового розміщення матеріалу із 4-х рівнозначних за опором решіток, сформованих з

металевих стержнів (рис. 3.3, а). Взаємне розташування стержнів всіх решіток було підбрано згідно реальної епюри поля швидкостей повітряного потоку в ПСК при його питомому навантаженні $q_B = 500$ кг/дм·год., характеристики якого було отримано під час попередніх досліджень [5].

Визначення опору решіток та швидкості повітряного потоку здійснювали за допомогою мікроманометру в перетинах ПСК I-I та II-II, як при відсутності решіток, так і при їх наявності, від однієї до чотирьох.

Ступінь впливу означених решіток визначали величиною нерівномірності швидкості повітряного потоку в поперечному перерізі ПСК.

Відносна нерівномірність поля швидкостей повітряного потоку в ПСК оцінювалась коефіцієнтом варіації δ , який визначали за формулою:

$$\delta = \frac{\sigma_c}{\bar{V}} \cdot 100\%, \quad (3.8)$$

де $\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum (V_i - \bar{V})^2}{m-1}}$ – середньоквадратичне відхилення величини швидкості, м/с;

V_i – місцева швидкість в точці заміру, м/с;

$\bar{V}$ – середньоарифметична швидкість повітря в каналі, м/с;

m – кількість точок заміру швидкості, шт.

3.5. Дослідження аеродинамічної характеристики ПСК та закономірностей руху зернового матеріалу в залежності від умов його введення.

Стабільність процесу пневмосепарації є важливим показником роботи ПСК і оцінюється його аеродинамічною характеристикою. Тому, її визначення з метою отримання поля швидкостей повітряного потоку при різних умовах завантаження ПСК було поставленою задачею.

Для цього нами розроблена і виготовлена експериментальна установка (рис. 3.4).

Конструкція установки представляє собою вертикальний ПСК прямокутного поперечного перетину, з можливістю регулювання глибини каналу C , а його

бокова стінка виготовлена прозорою, що забезпечує можливість спостереження за процесом.

Основними складовими частинами установки (рис. 3.4) є: бункер 1, багаторівневий живильний пристрій 3, ПСК 4, вентилятор 6, осадова камера 5 та герметичний вивідний канал 8.

Принцип роботи полягає у наступному: зерновий матеріал із бункера 1 через заслінки 2 потрапляє на направляючі поверхні 9 живильного пристрою 3, які спрямовують його рівномірними потоками в робочу зону ПСК 4 на різні рівні по його висоті. Під дією повітряного потоку, створеного вентилятором 6, зерновий матеріал розділяється на дві фракції: легкі домішки, які виносяться в осадову камеру 5, та очищене зерно, яке через жалюзійну стінку 10 потрапляє в герметичний вивідний канал 8 і далі по лотку виводиться з ПСК.

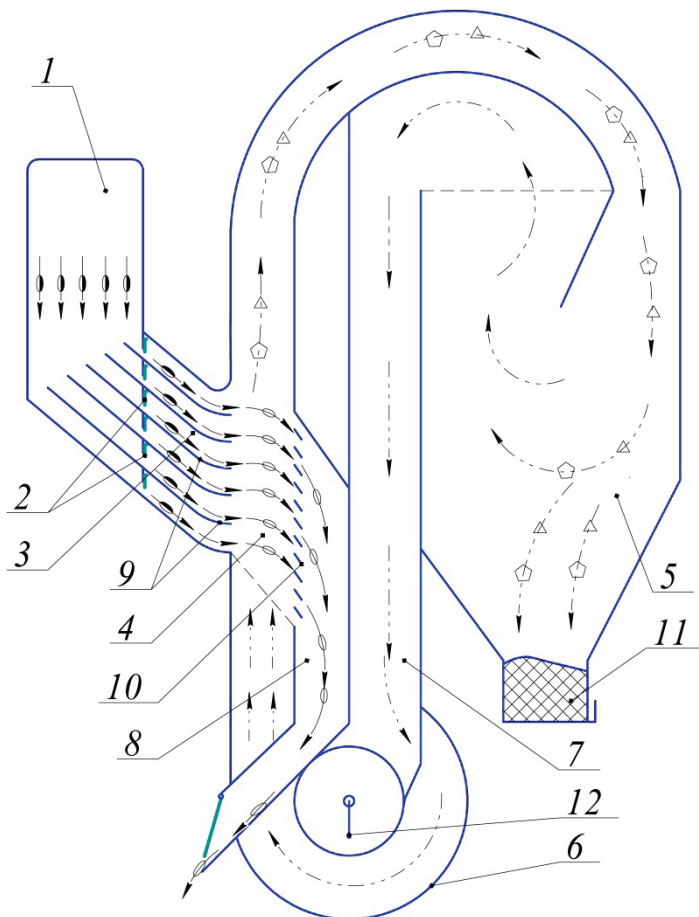


Рис. 3.4 Схема та загальний вигляд експериментальної установки для дослідження ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу

Зміна продуктивності забезпечується ступенем відкриття заслінок бункера 2 та кількістю задіяних рівнів живильного пристрою, а зміна швидкості введення зернового матеріалу – за допомогою довжини розгінної ділянки направляючої поверхні 9 та зміною кута її нахилу. Осадова камера 5 з'єднана з ПСК повітряним каналом 7. Швидкість повітряного потоку змінюється за допомогою конусоподібної заслінки 12, яка встановлена на вхідному отворі вентилятора. Установка працює із замкнутим циклом руху повітряного потоку.

Для визначення впливу умов введення та виведення зернового матеріалу на розподіл поля швидкостей в робочій зоні каналу був виготовлений експериментальний мікроманометр (рис. 3.5), який дозволяє вимірювати швидкості повітряного потоку одночасно в п'яти точках поперечного перетину ПСК. Пневмометричні трубки мікроманометра виготовлені регламентованого діаметру, з дотриманням необхідних пропорцій розмірів [23], з метою зменшення їх впливу на рівномірність поля швидкостей та опір повітряному потоку у відповідному перетині ПСК.

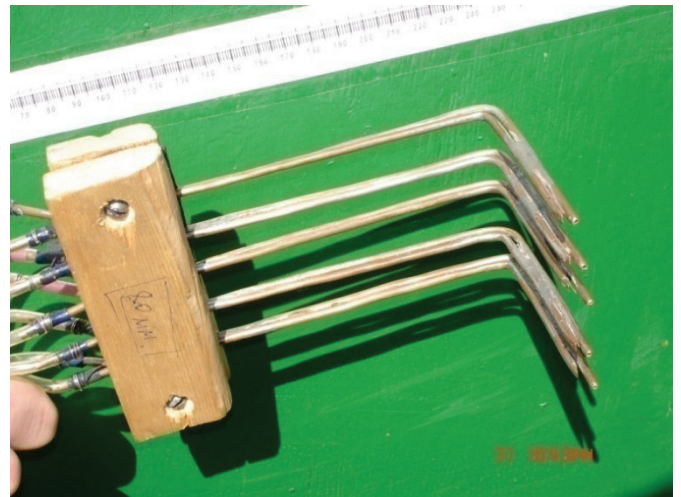


Рис. 3.5. Батарейний мікроманометр: а) – загальний вигляд;
б) – «батарея» трубок Піто-Прандля

На основі показів мікроманометра розраховували динамічний тиск P_o [23]:

$$P_o = \gamma_p \cdot \sin \alpha_m \cdot (h_k - h_n), \quad (3.9)$$

де $(h_k - h_n)$ – різниця кінцевих і початкових показів мікроманометра, мм. вод. ст;

α_m – кут нахилу трубки мікроманометра, град;

γ_p – питома вага робочої рідини мікроманометра, кг/м³.

Величину швидкості повітряного потоку в i -ій точці поперечного перерізу ПСК визначали за формулою:

$$V_{n_i} = 4,04 \sqrt{P_{o_i}}. \quad (3.10)$$

Контроль правильності вимірів здійснювали мікроманометром ММН-1.

Для визначення впливу способу і параметрів введення зернового матеріалу в ПСК з декількома розташованими один над одним зерновими шарами на розподіл швидкостей повітряного потоку в поперечному перетині та обґрунтування раціональної відстані між ними, проведено наступні дослід. Зерновий матеріал вводили в ПСК з попередньо визначеною його аеродинамічною характеристикою, вологістю, відповідним питомим навантаженням і заданою за величиною та напрямком швидкістю введення трьома рівновеликими потоками, розташованими один над одним на певній відстані, тобто на різних рівнях. За допомогою живильного пристрою змінювали відстані між рівнями в межах $h_{м.р.} = 15 \dots 60$ мм, вимірюючи при цьому динамічний тиск в двох його перетинах I-I та II-II (рис. 3.6), розташованих під задіяними рівнями та над ними, відповідно на відстані 30 мм від верхнього шару зернового матеріалу.

Величину відстані між рівнями змінювали відкриттям відповідних заслінок бункера, задіюючи необхідні направляючі лотки. Очищене зерно виводили через жалюзійну стінку в герметичний канал, а також вниз, вздовж задньої стінки ПСК.

Швидкість введення зернового матеріалу в ПСК v_e змінювалась залежно від величини питомого навантаження в межах від 0,5 м/с до 0,6 м/с, а її напрямком введення встановлювали горизонтальний, відповідно до рекомендацій

[21]. Середню швидкість повітряного потоку встановлювали в межах $V_n = 7 \dots 7,5$ м/с.

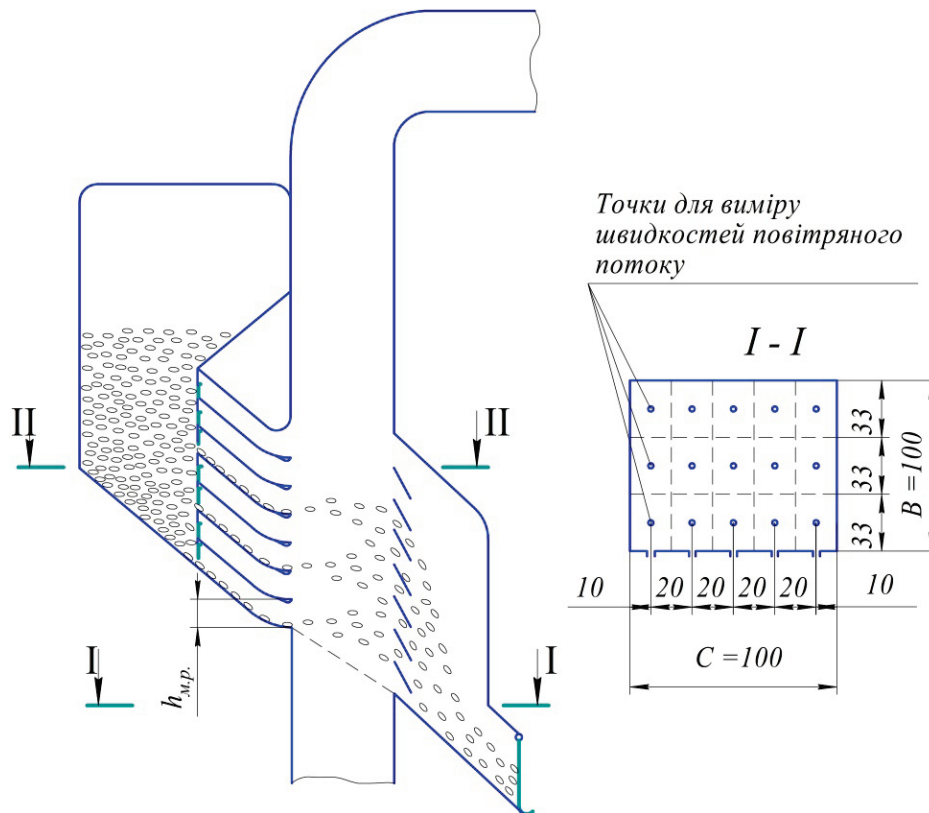


Рис. 3.6. Схема ПСК і його робочого перерізу для визначення аеродинамічної характеристики

Аеродинамічну характеристику ПСК (швидкості повітря по перетину каналу) визначали спочатку без зернового навантаження, потім з традиційним способом введення, а також з трьома задіяними рівнями живильного пристрою. При цьому, величину питомого зернового навантаження на рівень q_{bi} встановлювали 250, 300 та 350 кг/дм·год. Вимірювання починали проводити через 5 с після того, як досягалось рівномірне усталене витікання матеріалу з бункера. Повторюваність дослідів трикратна.

Середню швидкість повітряного потоку визначали як середньоарифметичне значень швидкостей повітряного потоку на кожній i -ій ділянці:

$$V_n = \sum_{i=1}^m \frac{V_{n_i}}{m}, \quad (3.11)$$

де V_{ni} – середня швидкість повітряного потоку на i -ій ділянці, м/с;

m – кількість ділянок в перетині, шт.

При побудові епюр швидкостей повітряного потоку в ПСК проводилось згладжування методом найменших квадратів.

3.6. Оцінка рівномірності розподілу зернового матеріалу та визначення якісних показників пневмосепарації по висоті ПСК

Для аналізу рівномірності заповнення робочої зони зерновим матеріалом, а також для дослідження впливу багаторівневого введення на вміст домішок в очищеному зерні по висоті ПСК була проведена наступна серія дослідів.

В герметичному вивідному каналі за жалюзійною стінкою 4 закріплювали вивідні лотки 7, під якими встановлювали пробовідбірники 5 (рис. 3.7).

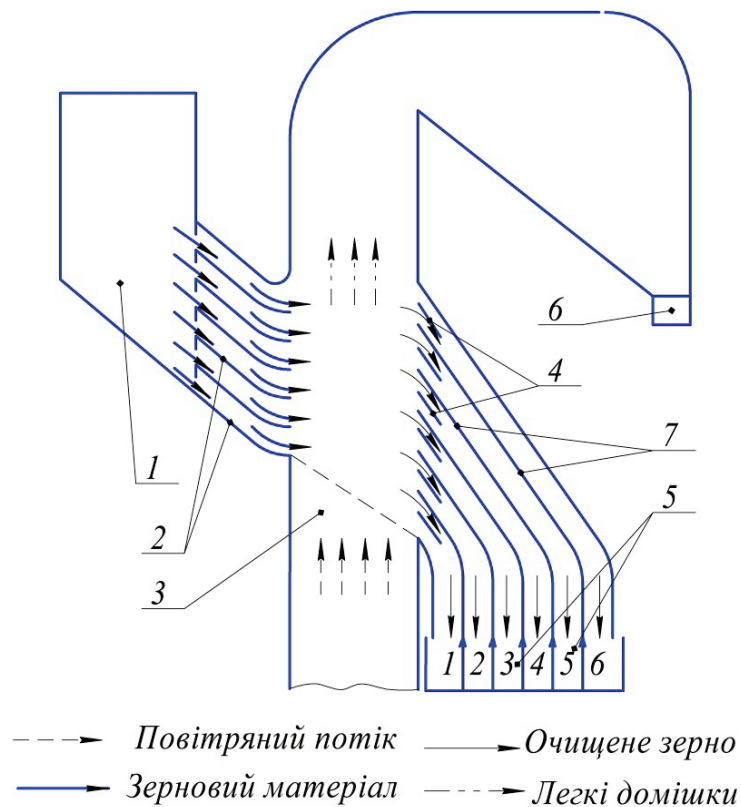


Рис. 3.7. Схема до визначення засміченості очищеного зерна по висоті ПСК:

1 – бункер; 2 – напрямні поверхні живильника; 3 – ПСК; 4 – жалюзійна стінка ПСК; 5 – пробовідбірники; 6 – приймальник легких домішок; 7 – вивідні лотки.

Вивідні лотки встановлювали напроти відповідної направляючої поверхні живильника так, щоб отримана порція в кожному i -му пробовідбірнику приблизно відповідала питомому навантаженню i -го рівня живильника q_{bi} .

В бункер завантажувался зерновий матеріал масою 10 кг, який штучно засмічувався домішками на 10%. Потім вихідний матеріал продували повітряним потоком, при цьому легкі домішки виділялись в приймальник осадової камери 6, а очищене зерно по вивідним лоткам потрапляло до пробовідбірників 5.

Кількість задіяних рівнів живильного пристрою встановлювали 2, 4 та 6 шт., при цьому, навантаження на кожен рівень було однаковим $q_{bi} = 350$ кг/дм·год. Швидкість повітряного потоку встановлювали $V_n = 7 \dots 7,5$ м/с, а швидкість введення матеріалу, $v_e = 0,5 \dots 0,6$ м/с, відстань між рівнями – $h_{м.р.} = 0,03$ м.

Ступінь засміченості для кожного i -го пробовідбірника визначали за вмістом домішок в очищеному зерні:

$$\tau_i = \frac{G_i}{G_{заг}} \cdot 100\%, \quad (3.12)$$

де G_i – маса легких домішок в i -му пробовідбірнику, кг;

$G_{заг}$ – загальна маса легких домішок в вихідному зерновому матеріалі, кг.

Повноту розділення зернового матеріалу визначали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{G_{вид}}{G_{заг}} \cdot 100\%, \quad (3.13)$$

де $G_{вид}$ – загальна маса легких домішок, яка виділилась в осадову камеру, кг.

Рівномірність розподілу зернового матеріалу по висоті ПСК оцінювали коефіцієнтом варіації Δ , якій визначали за формулою:

$$\Delta = \frac{\sigma_c}{M_i} \cdot 100\%, \quad (3.14)$$

де $\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum (M_i - \bar{M})^2}{k-1}}$ – середньоквадратичне відхилення маси зерна, кг;

M_i – маса зерна в i -му пробовідбірнику, кг;

$\overline{M}$ – середньоарифметична маса зерна на рівні живильника, кг;

k – кількість пробовідбірників, шт.

3.7. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів і режимів роботи пневмосепаратора з багаторівневим введенням зернового матеріалу в ПСК

Аналіз літературних даних, що присвячені проблемі розділення зернового матеріалу, результатів теоретичних і експериментальних досліджень показують, що процес пневмосепарації з багаторівневим введенням матеріалу в ПСК є функцією значної кількості факторів. Тому для оцінки їх взаємного впливу та отримання статистичної математичної моделі об'єкту досліджень у вигляді рівняння регресії застосували методику математичного планування експерименту [104 – 108].

Найбільш значимими факторами, що впливають на процес пневмосепарації з багаторівневим введенням зернового матеріалу, є наступні:

$$E = f(q_B, V_n, \tau, W, \alpha_e, h_{m.p.}, C, v_e, n), \quad (3.15)$$

де q_B – питоме зернове навантаження, кг/дм·год;

V_n – швидкість повітряного потоку, м/с;

τ – засміченість зернового матеріалу легкими домішками, %;

W – вологість суміші, %;

α_e – кут введення, град.;

$h_{m.p.}$ – відстань між рівнями, мм;

C – глибина каналу, мм;

v_e – швидкість введення зернового матеріалу в ПСК, м/с;

n – кількість рівнів, шт.

До переліку основних факторів впливу на процес включено лише такі, які відповідають наступним вимогам: керованості, операційності, однозначності, сумісності та незалежності [107, 108]. Пошукові та попередні експериментальні дослідження дозволили визначити вплив деяких факторів і вибрати їх рівні, які в подальших дослідженнях були прийняті постійними.

До факторів, що суттєво впливають на процес пневмосепарації, віднесли наступні: питоме навантаження i -го рівня на одиницю ширини каналу q_{bi} , швидкість введення зернового матеріалу в ПСК v_6 , глибину каналу C , відстань між рівнями $h_{м.р.}$, n – кількість рівнів, V_n – швидкість повітряного потоку.

Для вказаних факторів встановлені параметричні обмеження, які представляють собою рівні варіювання факторів (табл. 3.1. та 3.2) відповідно, для першого та другого етапу дослідів.

Задачею першого етапу досліджень було визначення раціональних умов введення зернового матеріалу в ПСК для отримання найбільш рівномірного поля швидкостей повітряного потоку в поперечному перетині робочої зони ПСК. На другому етапі ставилась задача забезпечити найвищу якість роботи пневмосепаратора шляхом обґрунтування параметрів ПСК.

Для дослідження взаємозв'язку між конструктивними та технологічними параметрами ПСК і отримання їх раціональних значень була застосована методика математичного планування експерименту, задачею якої є одержання статистичної математичної моделі об'єкту досліджень у вигляді рівняння регресії. Планування експериментальних досліджень, визначення значимості факторів та обчислення виконували за допомогою пакету прикладних програм «STATISTICA 10» [109].

Рівні та інтервал варіювання факторів першого етапу досліджень

Таблиця 3.1

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіюва- ння
	Найменування	Позна- чення	Нижній (-)	Основ- ний	Верхній (+)	
1	Питоме навантаження i -го рівня живильника q_{bi} кг·дм/год	x_1	300	400	500	100
2	Швидкість введення зернового матеріалу в ПСК, v_6 , м/с	x_2	0,3	0,5	0,7	0,2
3	Глибина каналу C , мм	x_3	80	100	120	20
4	Відстань між рівнями $h_{м.р.}$, мм	x_4	25	35	45	10

Рівні та інтервал варіювання факторів другого етапу

Таблиця 3.2

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіюва- ння
	Найменування	Позна- чення	Нижній (-)	Основ- ний	Верхній (+)	
1	Питоме навантаження на рівень живильника q_{bi} , кг/дм ³ ·год	x_1	250	300	350	50
2	Глибина каналу C , м	x_2	90	100	110	10
3	Кількість рівнів, n	x_3	3	5	7	2
4	Швидкість повітряного потoku V_n , м/с	x_4	6,5	7,5	8,5	1

Залежність критеріїв оптимізації від керованих факторів експерименту побудували шляхом апроксимації.

Найбільш точним методом апроксимації є метод поліноміального опису процесу за допомогою рівняння регресії, яке в загальному випадку має такий вигляд [108]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i \leq j}^k b_{i-j} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i \leq j}^k b_i \cdot x_i^2 + \dots, \quad (3.16)$$

де b_i – коефіцієнт регресії i -го фактора;

k – кількість факторів, шт.

Для оцінки ступеня рівномірності розподілу зернового матеріалу в робочій зоні ПСК в якості критерію оптимізації було вибрано коефіцієнт варіації $\delta\%$, що характеризує величину нерівномірності поля швидкостей повітряного потоку $Y = (\delta)$. Відповідно, отримання мінімального значення коефіцієнта варіації характеризувало максимально вирівняну епюру швидкостей повітряного потоку.

Під час другого етапу досліджень за параметри оптимізації прийнято два критерія: повноту розділення зернового матеріалу ε , % ($Y_1 = \varepsilon$) та кількість повноцінного зерна в відходах z , % ($Y_2 = z$).

Щоб скористатися стандартною матрицею, значення факторів, приведених в таблицях 3.1, 3.2, кодували чинниками ($x_1 - x_4$), потім за відомими методиками [106 – 108] знаходили коефіцієнти регресії, що визначають ступінь впливу факторів на параметри оптимізації $Y = (\delta)$, ($Y_1 = \varepsilon$) та ($Y_2 = z$).

Значимість коефіцієнтів регресії перевірялась з допомогою рівності нулю коефіцієнтів при квадратичних членах. Для цього були проведені додаткові досліді в центрі експерименту, визначено середнє значення $\bar{Y}_0$ критерію оптимізації і розрахована різниця $b_0 - \bar{Y}_0$, яка є деякою характеристикою кривизни поверхні відгуку.

Нуль гіпотеза приймається, якщо різниця $(b_0 - \bar{Y}_0)$ – не перевищує похибки досліді. Значимість цієї різниці перевіряли за критерієм Стюдента (t – критерієм):

$$t_{розр} = \frac{(b_0 - \bar{Y})\sqrt{N}}{\sqrt{S_y^2}}. \quad (3.17)$$

Потім розрахункове значення $t_{розр}$ порівнювали з табличним значенням, яке обирали за таблицями [108] залежно від рівня значимості $\alpha = 0,05$ та ступеня вільності $f_l = N$. Коефіцієнт регресії визнавали статистично значимим величині довірчого інтервалу, якщо абсолютне значення дорівнювало або перевищувало його. Якщо виконувалась нерівність $|b_s| < |\Delta b_s|$, відповідний фактор аналізували щодо вибору іншого інтервалу варіювання, якщо це можливо.

При цьому, всі необхідні досліді повторювали, і якщо після аналізу коефіцієнт знову відповідав попередній умові, робили висновок про незначимість впливу фактора x_i на параметр оптимізації Y_i .

Відтворюваність експериментів визначали за допомогою критерію Кохрена (G – критерія), при цьому необхідною умовою є $G^P < G^T$.

Адекватність статистичної математичної моделі перевіряли за допомогою критерію Фішера (F – критерію). При умові адекватності моделі її можна використовувати при наступних дослідженнях.

При проведенні даних експериментальних досліджень використовувалась вибірка масою 10 кг, яка була відібрана згідно ДСТУ 3355 [110]. Послідовність проведення дослідів визначалась робочою матрицею проведення експериментальних досліджень (табл. 4.3, 4.4, 4.5).

Подачу оброблюваного матеріалу до живильного пристрою пневмосепаратора здійснювали після включення експериментальної установки і дочекавшись усталеного режиму її роботи.

3.8. Дослідження впливу засміченості та вологості зернового матеріалу на технологічну ефективність процесу пневмосепарації

Дослідження впливу засміченості та вологості вихідного зернового матеріалу на якісні та кількісні показники пневмосепарації проводилися на матеріалі: пшениці сортів «Альбатрос Одеський» врожаю 2014-2016 року, «Переяславка» – 2015 року, які поступали на обробку від комбайна.

Засміченість оброблюваного матеріалу оцінювали за аеродинамічними властивостями компонентів зернового матеріалу і визначали за методикою, наведеною в п. 3.2.1., вологість матеріалу визначали стандартним методом за методикою, наведеною в п. 3.2.2. Вплив цих показників на технологічну ефективність сепарації визначали за методикою, приведеною в п.3.9.

Штучне підвищення засміченості оброблюваної суміші проводили шляхом додавання легкого компонента з очищеного зернового матеріалу з подальшим рівномірним перемішуванням. Для штучного підвищення вологості проводили обприскування зернового матеріалу з одночасним його перемішуванням та витримкою не менше 24 годин при температурі повітря не вище 20°, накривали, після чого визначали його вологість за (п. 3.2.2).

3.9. Визначення технологічної характеристики пневмосепарації зернового матеріалу в ПСК

Для отримання об'єктивної оцінки технологічних можливостей запропонованого ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу необхідно отримати його характеристику та провести порівняння основних технологічних показників з показниками сучасних пневмосепараторів аналогічного призначення. Тому нами були проведені відповідні дослідження з метою визначення впливу способів введення та величини питомого навантаження робочої зони вдосконаленого ПСК на якісні показники пневмосепарації.

В якості оброблюваного матеріалу використовували зерновий ворох пшениці сорту «Вікторія», вологістю 14,6% та засміченістю 12%. Вихідний матеріал включав дрібні, биті зерна основної культури, а також інші природні домішки зерна, отриманого із бункера комбайна «ДОН-1500» після прямого комбайнування.

ПСК завантажували, почергово задіюючи рівні введення від одного до шести, змінюючи при цьому загальну сумарну величину питомого навантаження в межах: $q_B = 500 \dots 2100 \text{ кг} \cdot \text{дм} / \text{год}$.

Якість розділення зернового матеріалу оцінювали повнотою розділення

$$\varepsilon = \frac{G_{\text{вид}} - G_{\text{зер}}}{G_{\text{заг}}} \cdot 100\%, \quad (3.18)$$

та кількістю повноцінного зерна в відходах:

$$z = \frac{G_{\text{зер}}}{G_{\text{вид}}} \cdot 100\%, \quad (3.19)$$

де $G_{\text{вид}}$ – маса виділених повітряним потоком легких домішок, кг;

$G_{\text{заг}}$ – маса легкого компоненту в вихідному зерновому матеріалі, кг;

$G_{\text{зер}}$ – кількість повноцінного зерна в виділеній повітряним потоком легкій фракції, кг.

Визначення вмісту повноцінного зерна в виділених легких домішках проводили на парусному порційному класифікаторі за методикою, приведеною в пункті 3.2.1.

Для отримання порівняльної характеристики різних способів завантаження ПСК зерновий ворох вводили спочатку на одному рівні живильника з традиційним виведенням матеріалу вниз по каналу, а потім багаторівневим способом, з виведенням очищеного зерна як через жалюзійну стінку, так і вниз вздовж задньої стінки ПСК. Жалюзійна стінка виготовлена з можливістю регулювання ступеню відкриття та повного закриття жалюзі.

Оцінку якості розділення виконували за вище приведеною методикою.

Висновки по розділу

Розроблена програма експериментальних досліджень дозволила дослідити основні параметри ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення матеріалу, оптимізувати підготовку до їх проведення та мінімізувати похибку вимірювань.

Для визначення швидкості введення в ПСК по напрямній гравітаційній кривій була розроблена оригінальна методика, яка базується на вимірюванні реальних координат зернової частинки в каналі. Також для забезпечення точності визначення аеродинамічної характеристики ПСК при багаторівневому введенні був розроблений експериментальний мікроманометр, що дозволяє вимірювати швидкості повітряного потоку одночасно в п'яти точках поперечного перерізу ПСК та мінімізувати вплив пристрою на процес пневмосепарації.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ
ПНЕВМОСЕПАРАЦІЇ З БАГАТОРІВНЕВИМ ВВЕДЕННЯМ ЗЕРНОВОГО
МАТЕРІАЛУ

4.1. Основні характеристики зернового матеріалу

4.1.1 Аеродинамічні властивості компонентів зернового матеріалу

Задачею дослідів було встановлення засміченості даної партії зернового матеріалу, який використовували в експериментальних дослідженнях, а також визначення раціонального значення робочої швидкості повітря в ПСК, при якій відбувається виділення легких домішок із зерна основної культури.

Під час аналізу навіски було отримано всі фракції зернового матеріалу (рис. 4.1), та інтервал швидкості витання кожної фракції (додаток Д).

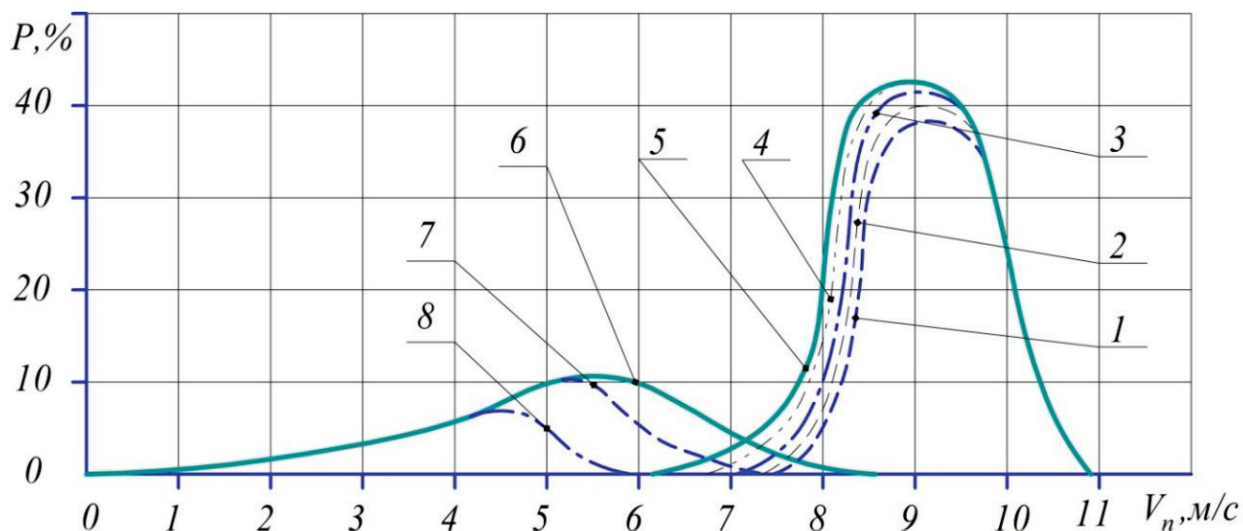


Рис. 4.1. Аеродинамічна характеристика зернового матеріалу пшениці.

1 – насіння I класу; 2 – II класу; 3 – III класу; 4 – продовольче зерно;
5 – зернофуражна фракція; 6, 7, 8 – категорії відходів (відповідно I, II, III).

Встановлено, що засміченість матеріалу складає 12,4%, а середня швидкість повітряного потоку V_n , при якій відбувається найменше винесення повноцінного зерна в відходи, тобто чіткість сепарації z не перевищує 2%, становить $V_n = 7,5 \dots 7,8$ м/с.

4.1.2. Вологість зернового матеріалу

Вологість вихідного зернового матеріалу (табл. 4.1), який використовувався в дослідженнях, відповідає реальним значенням вологості матеріалу, що поступає на очищення.

Таблиця 4.1

Вологість зернового матеріалу

№ вибірки	Контроль висушуванням			
	маса навіски зерна, г		втрата вологи, г	вологість, %
	вологого	сухого		
1	50,0	45,4	4,6	10,13
2	50,0	43,62	6,38	14,62
3	50,0	43,2	6,8	15,7

4.1.3. Об'ємна вага вихідного зернового матеріалу

За результатами проведених досліджень визначено, що середнє значення об'ємної ваги зернового матеріалу складає $766,26 \text{ г/дм}^3$ (табл. 4.2).

Таблиця 4.2.

Об'ємна вага вихідного зернового матеріалу

№ дослідю	Вага посуду з зерном, г.	Вага порого посуду, г.	Питома вага, г/дм^3
1	801,04	35,24	765,8
2	802,6	35,24	767,36
3	800,88	35,24	765,64

4.2. Основні параметри напрямної гравітаційної кривої живильного пристрою ПСК та режими руху вхідного зернового потоку

Для забезпечення найбільш раціональних умов введення зернового матеріалу в ПСК були проведені дослідження по визначенню основних параметрів живильного пристрою та режимів руху даного матеріалу.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновок, що для питомих навантажень $q_B = 250 - 350$ кг/дм·год одношаровий рух матеріалу спостерігається при досягненні довжини $L_p = 0,2$ м для всього діапазону досліджуваних кутів нахилу поверхні, а для $q_B = 500$ кг/дм·год, товщина шару в одне зерно забезпечується при $L_p = 0,25$ м для кутів нахилу $\alpha = 33...36^\circ$ (рис. 4.2).

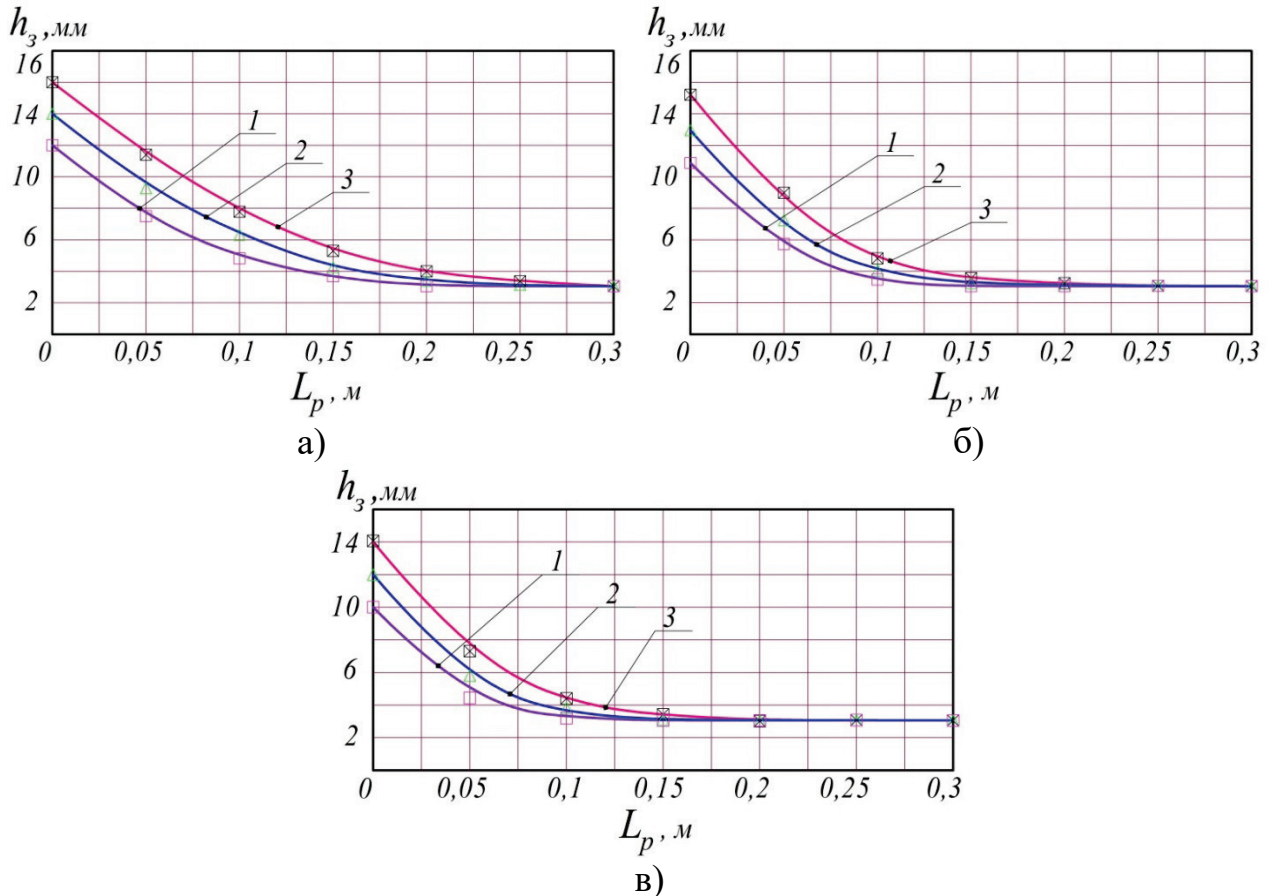


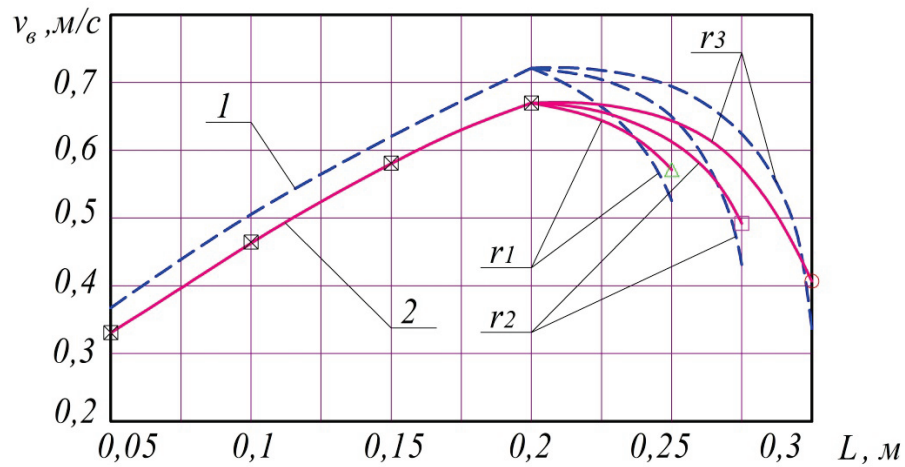
Рис. 4.2. Залежність зміни товщини шару зернового потоку h_z по довжині розгінної ділянки прямої кривої живильника L_p при:

1 – $q_B = 250$ кг/дм·год; 2 – $q_B = 350$ кг/дм·год; 3 – $q_B = 500$ кг/дм·год;

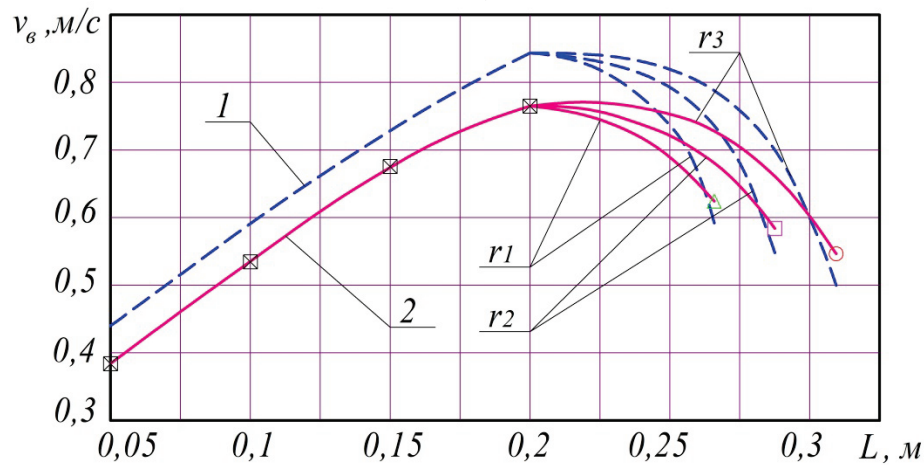
а) – $\alpha = 30^\circ$; б) – $\alpha = 33^\circ$; в) – $\alpha = 36^\circ$

Отримані графічні залежності (рис. 4.3), які побудовані при фіксованій довжині розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, при якій забезпечується одношаровий рух зернового матеріалу для питомих навантажень $q_B = 250...350$ кг/дм·год, свідчить про те, що збільшення кута нахилу α призводить до підвищення швидкості руху матеріалу, при цьому, потрапивши на дугоподібну ділянку, вона стрімко спадає. І чим більший радіус, тим більше зменшується швидкість

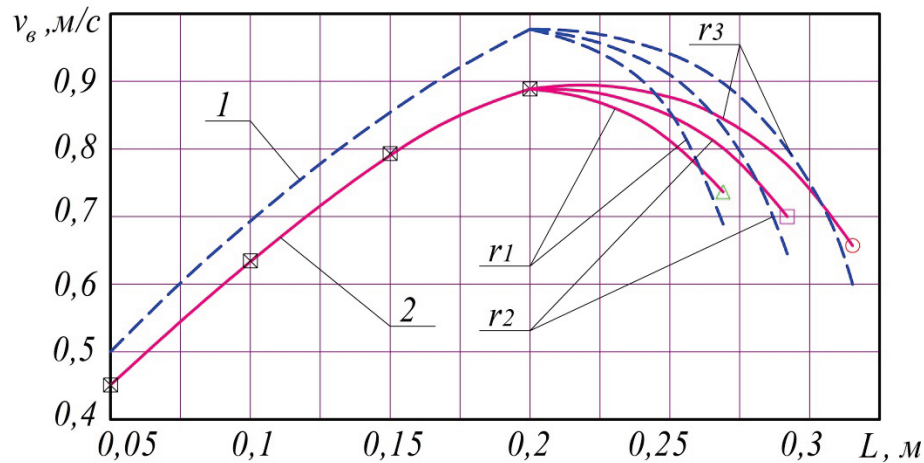
введення. Це можна пояснити тим, що при більшому радіусі дуги збільшується полого ділянка на якій відбувається пригальмовування зернового матеріалу.



а)



б)



в)

Рис. 4.3. Зміна швидкості руху зернового матеріалу по напрямній гравітаційній кривій живильника: 1 – теоретична залежність; 2 – експериментальна залежність при: $q_B = 250$ кг/дм·год; $r_1 = 0,1$ м; $r_2 = 0,15$ м; $r_3 = 0,2$ м. Кут нахилу розгінної ділянки: а) – $\alpha = 30^\circ$; б) – $\alpha = 33^\circ$; в) – $\alpha = 36^\circ$

Так, після сходу з розгінної ділянки, при куті її нахилу $\alpha = 33^\circ$, швидкість матеріалу зменшується від 0,76 м/с до 0,55...0,62 м/с залежно від радіуса дуги r прямої кривої.

Розбіжність між теоретичними і експериментальними даними пояснюється тим, що при теоретичних дослідженнях не враховувався аеродинамічний опір руху частинок, а також внутрішній коефіцієнт тертя між зерновими шарами.

Також слід відмітити, що при введенні зернового матеріалу в ПСК по дузі спостерігається значно ширший діапазон розсіювання частинок, ніж при введенні по прямолінійній ділянці.

4.3. Вплив щільності розташування матеріалу на опір ПСК в умовах його багаторівневого введення

З фізичної суті процесу пневмосепарації витікає, що для його ефективного здійснення необхідно забезпечити в ПСК відповідну швидкість повітряного потоку, яка максимально наближається до величини швидкості витання зерна, і при цьому, не перевищує її. Але в реальних умовах роботи ПСК, навіть при рівномірному введенні зерна, перерозподіл швидкостей повітряного потоку призводить до зміни опору повітряному потоку в різних зонах робочого перетину. Тому, визначення закономірності його зміни, при різній щільності розташування частинок в ПСК є вкрай важливою задачею для процесу сепарації.

За результатами досліджень встановлено, що при щільному розташуванні стержнів в притул один до одного, спостерігається максимальний опір решітки (рис. 4.4). А при поступовому збільшенні відстані h до 3-4 мм опір решітки швидко зменшується, а потім при $h > 6$ мм він стабілізується, і далі, залишається на постійному рівні. Це говорить про те, що при багаторівневому розміщенні зернових шарів в ПСК, за умови одношарового введення, мінімальна відстань між ними повинна бути не менше 5...6 мм, що сприятиме забезпеченню мінімально стабільного опору повітряному потоку.

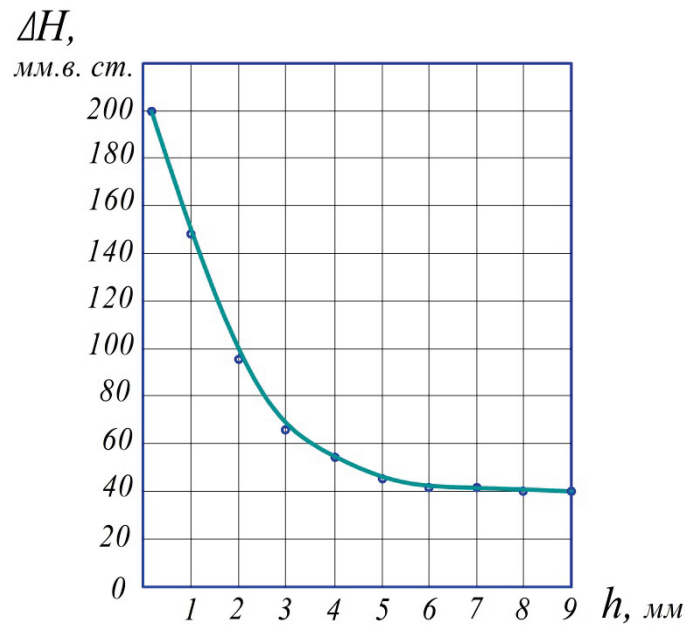


Рис. 4.4. Залежність опору решітки ΔH від відстані між її стержнями h

Для визначення сумарного опору ПСК змодельовані решітки були встановлені в ПСК одна над одною, взаємне розташування стержнів підібрано згідно реальної епюри поля швидкостей повітряного потоку в ПСК при його питомому навантаженні $q_B = 500 \text{ кг/дм} \cdot \text{год.}$

Аналіз діаграм (рис. 4.5) свідчить, що з підвищенням кількості змодельованих решіток в ПСК нерівномірність швидкостей повітряного потоку зменшується як в нижній зоні, під розташуванням шару часток, так і в верхньому перерізі. Це підтверджує висновок, що збільшення коефіцієнту опору каналу підвищує стійкість процесу сепарації [113].

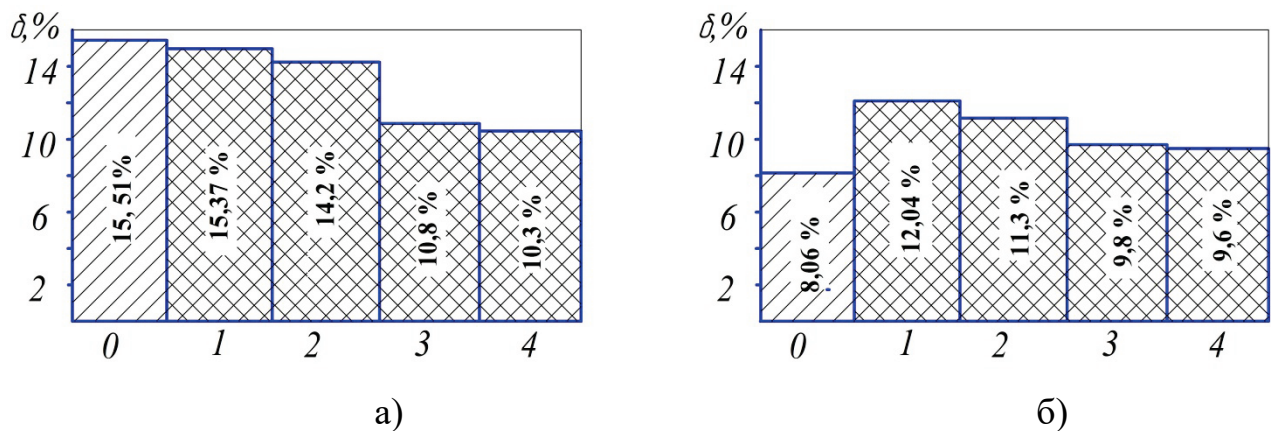


Рис. 4.5. Діаграми нерівномірності поля швидкостей повітряного потоку:
а) – в перетині I-I; б) – в перетині II-II для умов: 0 – відсутність решітки;
1-4 – відповідна кількість решіток в каналі

Для порівняння закономірностей зміни енергоємності запропонованої моделі зернового шару з результатами аналогічних досліджень на реальній суміші, залежно від питомого навантаження було визначено гідравлічний опір послідовно встановлених решіток (рис. 4.6).

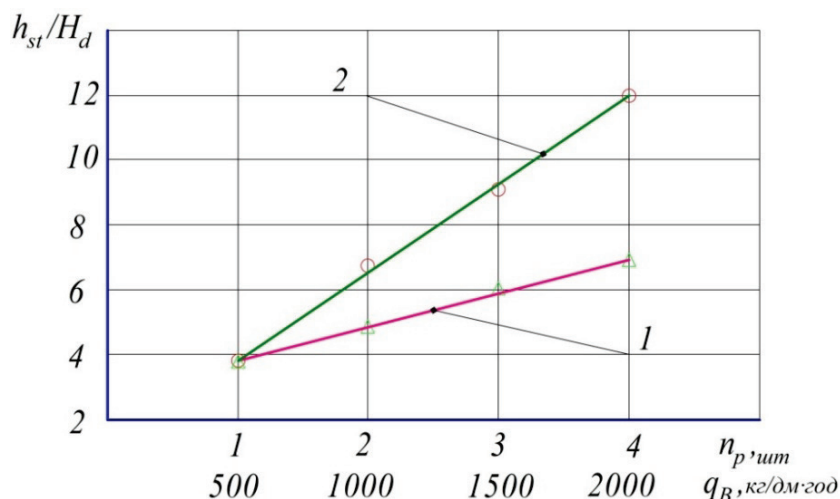


Рис. 4.6. Порівняльна характеристика зміни енерговитрат процесу пневмосепарації, h_{st}/H_d , від навантаження q_B для: 1- багаторівневого введення; 2 – звичайного введення матеріалу (за даними Шклярова [114])

Аналіз приведених залежностей свідчить, що збільшення питомого навантаження призводить до суттєвого підвищення опору. При рівнозначній величині питомого навантаження $q_B = 500$ кг/дм³·год (рис. 4.6), значення h_{st}/H_d практично збігаються, а при досягненні максимального навантаження $q_B = 2000$ кг/дм³·год різниця збільшується майже в два рази.

В першому випадку, його величина збільшилась лише вдвічі, а в другому h_{st}/H_d змінюється майже прямо пропорційно по відношенню до навантаження q_B , що пояснюється різницею щільності розташування частинок, відповідно й нерівномірністю швидкостей повітряного потоку.

4.4. Аеродинамічна характеристика ПСК залежно від умов введення зернового матеріалу та виведення очищеного зерна

Аналіз аеродинамічної характеристики дозволяє відзначити, що для всіх отриманих залежностей над місцем введення (переріз II-II) в центральній

частині ПСК спостерігається більш вирівняний діапазон швидкостей ніж під місцем введення (переріз I-I), що підтверджує гіпотезу про те, що багаторівневе введення матеріалу сприяє вирівнюванню поля швидкостей.

При дослідженні впливу міжрівневої відстані на ступінь рівномірності поля швидкостей повітряного потоку можна зробити висновок, що для кожного питомого навантаження q_{bi} найбільш вирівняна еюра отримана при різних значеннях вертикального розташування рівнів введення $h_{м.р.}$. Так, наприклад, для питомого навантаження $q_{bi} = 250$ кг/дм·год найбільш рівномірне поле швидкостей повітряного потоку спостерігається при $h_{м.р.} = 15$ мм (рис. 4.7, а, б), а для навантаження $q_{bi} = 350$ кг/дм·год при $h_{м.р.} = 30$ (рис. 4.7, в, г).

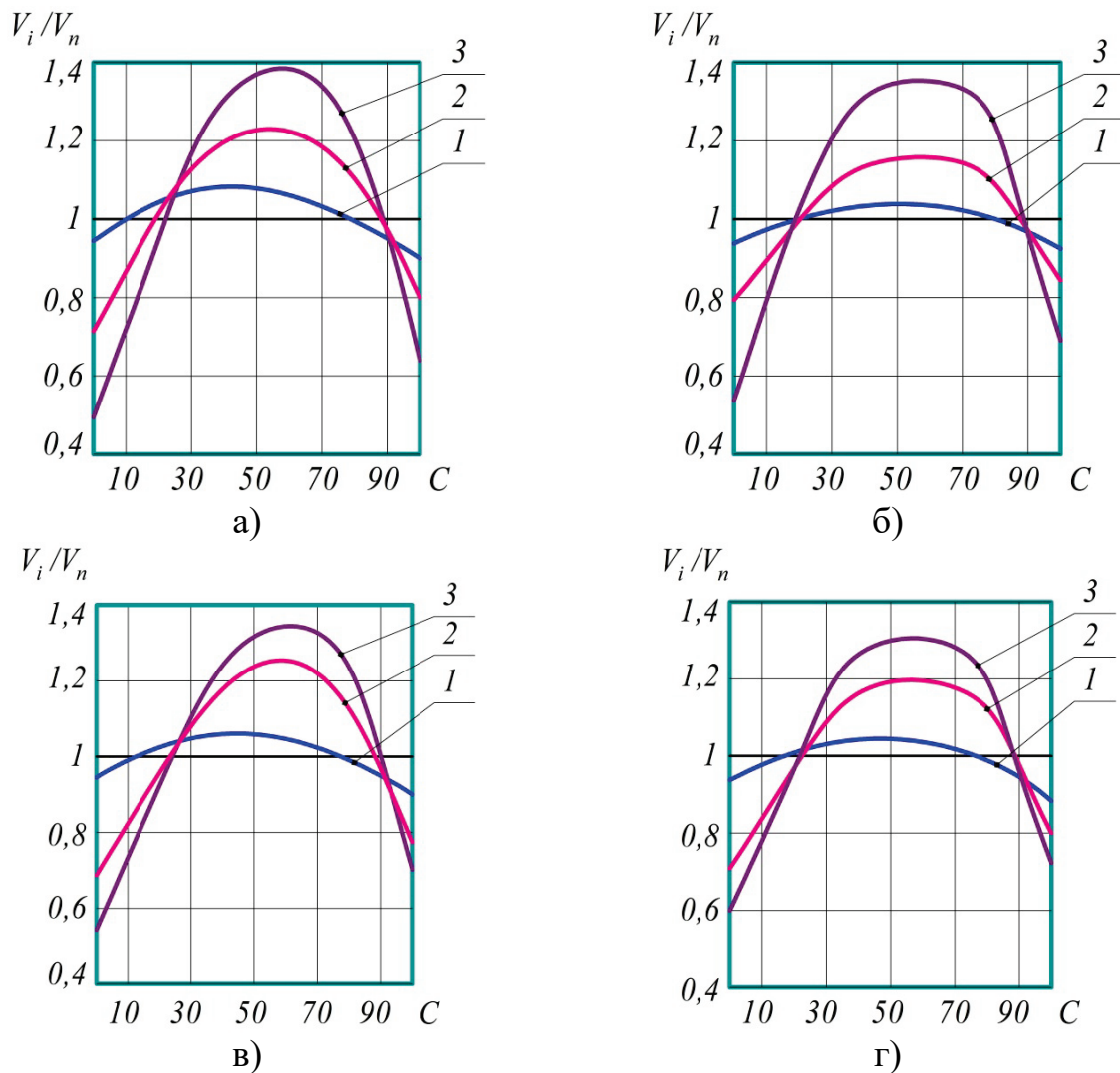


Рис. 4.7. Поля швидкостей повітряного потоку при трьохрівневому введенні зернового матеріалу в ПСК: а), б) – при $h_{м.р.} = 15$ мм.; в), г) – при $h_{м.р.} = 30$ мм.; 1 – без навантаження; 2 – $q_{bi} = 250$ кг/дм·год; 3 – $q_{bi} = 350$ кг/дм·год; а), в) – в перерізі I-I; б), г) – в перерізі II-II.

Це пояснюється тим, що для кожного значення q_{bi} необхідно створення найбільш оптимальної концентрації зернової маси в певному об'ємі повітряного потоку. І відповідно, чим більша величина питомого навантаження, тим більший об'єм повинен займати матеріал в ПСК для забезпечення найбільш раціональних умов розділення.

При збільшенні міжрівневої відстані до $h_{м.р.} = 60$ мм (рис. 4.8, в, г) спостерігається погіршення рівномірності швидкостей повітряного потоку для всіх значень питомих навантажень q_{bi} .

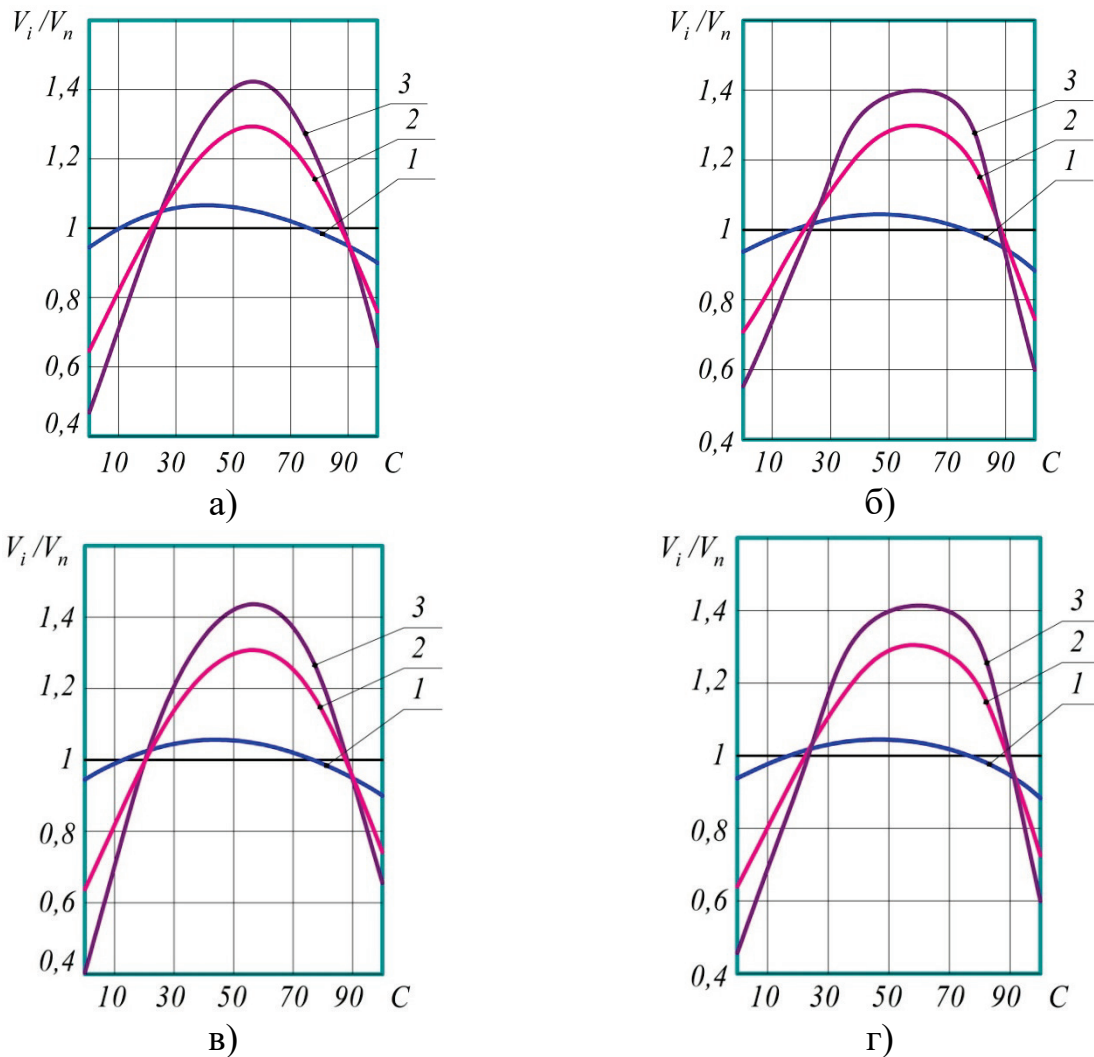


Рис. 4.8. Поля швидкостей повітряного потоку при трьохрівневому введенні зернового матеріалу в ПСК: а), б) – при $h_{м.р.} = 45$ мм.; в), г) – при $h_{м.р.} = 60$ мм.; 1 – без зернового навантаження; 2 – $q_{bi} = 250$ кг/дм·год; 3 – $q_{bi} = 350$ кг/дм·год; а), в) – в перерізі I-I; б), г) – в перерізі II-II.

Таку зміну епюри поля швидкостей можна пояснити тим, що між рівнями введення утворюються незаповнені повітряні зони, які створюють умови для різкого перепаду середньої швидкості повітряного потоку V_n , що ймовірно впливає на розподіл швидкостей в ПСК.

Отримані залежності для традиційного введення зернового матеріалу (рис. 4.9, крива 1) підтверджують багаточисленні експериментальні дослідження [23, 26, 30, 32, 34, 37, 51] та свідчить, що збільшення питомого навантаження погіршує рівномірність розподілу швидкостей повітряного потоку як нижче місця введення матеріалу, так і над ним.

При традиційному введенні з виведенням через жалюзійну стінку спостерігається підвищення швидкості повітряного потоку біля задньої стінки, при цьому пік його найбільшого значення зміщується ближче до центральної частини ПСК.

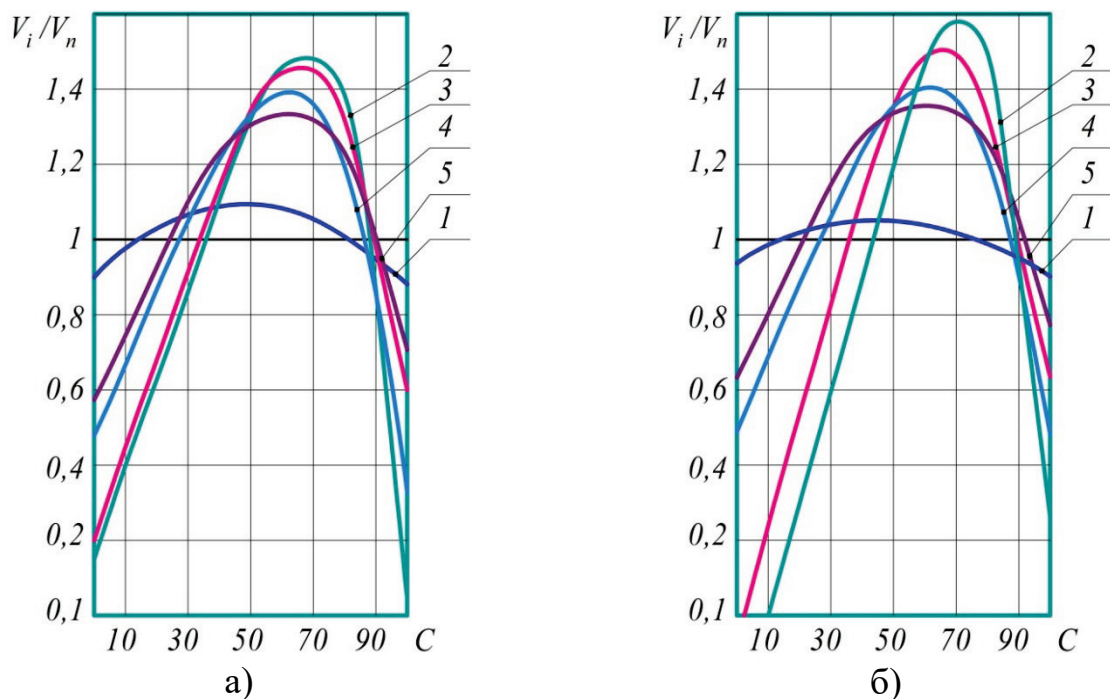


Рис. 4.9. Аеродинамічна характеристика ПСК залежно від способу введення та виведення зернового матеріалу:

- а) – під місцем введення в перерізі I-I; б) – над місцем введення в перерізі II-II;
 1 – без зернового навантаження; 2 – традиційне введення при $q_B = 2000$ кг/дм·год;
 3 – традиційне з виведенням через жалюзійну стінку при $q_B = 2000$ кг/дм·год;
 4 – багаторівневе введення при $q_{bi} = 350$ кг/дм·год, $n = 6$; 5 – багаторівневе з виведенням через жалюзійну стінку $q_{bi} = 350$ кг/дм·год, $n = 6$

Аналіз отриманих епюр дозволяє стверджувати, що багаторівневе введення сприяє вирівнюванню поля швидкостей повітряного потоку на відміну від традиційного. В порівнянні з епюрами під місцем введення (рис. 4.9, а), епюри над місцем введення (рис. 4.9, б) при багаторівневій подачі матеріалу отримані більш згладжені та вирівняні, тоді як при традиційному спостерігається їх піднімання та збільшення піку середньої швидкості ближче до задньої стінки. Це підтверджує робочу гіпотезу про те, що за рахунок багаторівневого введення зерна та виведення очищеного зерна через жалюзійну стінку спостерігається зменшення опору повітряному потоку в місцях введення та виведення матеріалу.

4.5. Раціональні параметри та режими роботи пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу

Рівномірність поля швидкостей повітряного потоку безпосередньо впливає на якісні показники процесу, повноту розділення ε та кількість повноцінного зерна в відходах z . Відповідно, покращуючи цей показник в робочій зоні ПСК, можна досягти і підвищення якості процесу сепарації. Для цього було проведене статистичне математичне моделювання процесу пневмосепарації, що відбувалось в два етапи.

Метою першої серії дослідів було отримання закономірностей впливу основних параметрів ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна на рівномірність поля швидкостей повітряного потоку.

Для цього нами була реалізована матриця 2^4 зіркові точки, в результаті чого встановлено вплив чинників (q_{bi} , v_e , C , $h_{m.p.}$) та отримані раціональні значення основних параметрів ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу при мінімальному значенні коефіцієнта варіації δ , що характеризує максимальну рівномірність поля швидкостей повітряного потоку.

Основні рівні та інтервали варіювання вибрані на основі аналізу теоретичних та попередніх експериментальних досліджень.

Результати реалізації матриці випробувань центрального композиційного плану $N = 2^4$ зіркові точки (табл. 4.4) дозволили отримати статистичну математичну модель для рівномірності поля швидкостей $\delta(Y)$:

$$Y = 20,4 + 3,568x_1 - 3,756x_2 + 2,07x_3 - 1,221x_4 + 1,059x_1^2 + 2,256x_2^2 + 1,648x_3^2 + 1,982x_4^2 + 0,612x_1x_2 + 1,401x_1x_3 + 0,073x_1x_4 - 1,69x_2x_3 + 0,007x_2x_4 - 0,078x_3x_4 \quad (4.1)$$

Таблиця 4.4.

Результати реалізації матриці планування експерименту 2^4 -зіркові точки

Номер досліджу	Питоме навантаження на 1 рівень q_{bi} , кг/дм ³ ·год x_1	Швидкість введення зерна в ПСК v_{θ} , м/с x_2	Глибина каналу, С, мм x_3	Відстань між рівнями $h_{m.p.}$, мм x_4	Рівномірність поля швидкостей, δ , % (Y)
1	2	3	4	5	6
1	300	0,7	120	25	19,86
2	300	0,7	120	45	18,28
3	300	0,3	120	25	29,64
4	300	0,3	120	45	27,45
5	300	0,7	80	25	18,55
6	300	0,7	80	45	17,48
7	300	0,3	80	25	26,86
8	300	0,3	80	45	24,52
9	500	0,7	120	25	32,48
10	500	0,7	120	45	29,91
11	500	0,3	120	25	43,62
12	500	0,3	120	45	42,74
13	500	0,7	80	25	30,15
14	500	0,7	80	45	28,84
15	500	0,3	80	25	30,38
16	500	0,3	80	45	29,14
17	160	0,5	100	35	22,61
18	640	0,5	100	35	28,27
19	400	0,1	100	35	35,73
20	400	0,9	100	35	20,06
21	400	0,5	52	35	24,89
22	400	0,5	148	35	32,77
23	400	0,5	100	11	34,96
24	400	0,5	100	58	25,53
25	400	0,5	100	35	18,42
26	400	0,5	100	35	19,78

Статистична оцінка отриманих результатів дозволила зробити наступні висновки. Досліди рівноточні: розрахункові значення G^P критерію Кохрена за параметром оптимізації $Y(\delta)$, $G^P=0,235$ менше табличного $G^P=0,242$.

Значимість отриманих коефіцієнтів перевіряли за допомогою критерію Стьюдента, табличне значення якого для рівня надійності $P_H = 0,95$ і числа степенів свободи $f = 15$ складає $t = 2,13$. Дисперсії знайдених коефіцієнтів дорівнюють:

$$(S_b)_1^2 = 2,44; \quad (S_b)_2^2 = 0,008.$$

Величина довірчого інтервалу складає:

$$\Delta b_1 = 5,2; \quad \Delta b_2 = 0,017.$$

Адекватність рівнянь перевіряли за допомогою критерію Фішера, табличне значення якого для рівня надійності $P_H=0,95$ і числа степенів свободи $f = 15$ складає $F^T = 3,0$. Розрахункові значення $F_1^P = 0,066$ не перевищують $F^T=3,0$, що підтверджує адекватність рівнянь, які описують процес пневмосепарації.

Аналізуючи рівняння регресії та Парето – карту для коефіцієнта варіації (δ) (рис. 4.10), можна зробити висновок, що найбільший вплив на рівномірність поля швидкостей чинять величина питомого навантаження $q_{bi}(x_1)$, швидкість введення зерна в ПСК $v_\theta(x_2)$ та глибина каналу $C(x_3)$ і квадратичні значення міжрівневої відстані $h_{m.p.}(x_4^2)$ та швидкості введення матеріалу $v_\theta(x_2^2)$.

З аналізу взаємного впливу факторів на коефіцієнт варіації $Y(\delta)$ (рис. 4.12) можна зробити висновок, що збільшення питомого навантаження q_{bi} в ПСК погіршує рівномірність повітряного потоку, що пояснюється збільшенням аеродинамічному опору зернової маси.

Рациональна відстань між рівнями живильного пристрою ($h_{m.p.}$), (рис. 4.12) знаходиться в межах 30...40 мм, що пояснюється необхідністю розшарування зернового потоку на певну відстань з врахуванням питомого навантаження q_{bi} . При таких значеннях допускається навіть збільшення питомого навантаження

до $q_{bi} = 450...500$ кг/дм·год, оскільки еюра поля швидкостей має більшу рівномірність при рівнозначному навантаженні при традиційному введенні.

При збільшенні швидкості введення зернового матеріалу в ПСК v_g спостерігається покращення рівномірності поля швидкостей, оскільки відбувається зменшення товщини шару матеріалу, що сприяє зменшенню опору повітряному потоку. При цьому раціональне значення $v_g = 0,5...0,6$ м/с.

Збільшення глибини каналу C виявляє негативний вплив на рівномірність швидкісного поля повітряного потоку, що пояснюється зміною структури зернової решітки матеріалу ближче до задньої стінки ПСК. В той же час глибина каналу C та швидкість введення матеріалу в ПСК v_g – взаємопов’язані величини, і результати досліджень показують, що для питомого навантаження $q_{bi} = 250...300$ кг/дм·год мінімальне значення нерівномірності поля швидкостей повітряного потоку $Y(\delta)$ досягається при глибині каналу $C = 90...110$ мм.

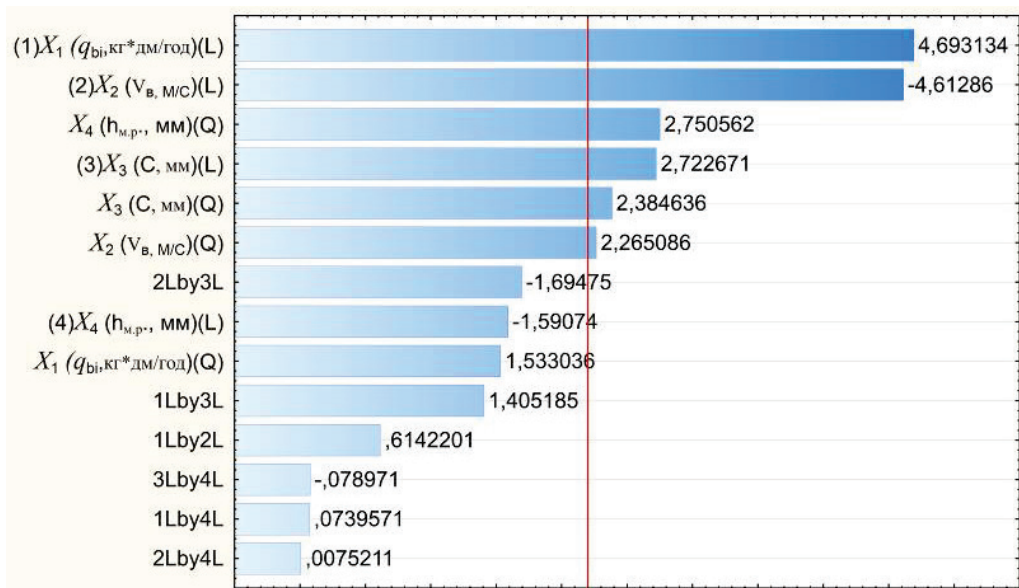


Рис. 4.10. Парето-карта для визначення межі статистичного значення коефіцієнту математичного чекання для рівномірності поля швидкостей $Y(\delta)$

Приведені графіки поверхонь відгуку та ліній рівного виходу для $Y(\delta)$ (рис. 4.11) дозволяють визначити, що найбільш рівномірне поле швидкостей повітряного потоку досягається при наступних значеннях чинників:

$$x_1 \rightarrow q_{bi} = 200...300 \text{ кг/дм·год}$$

$$x_3 \rightarrow C = 90...110 \text{ мм}$$

$$x_2 \rightarrow v_g = 0,5...0,6 \text{ м/с}$$

$$x_4 \rightarrow h_{m.p.} = 30...40 \text{ мм}$$

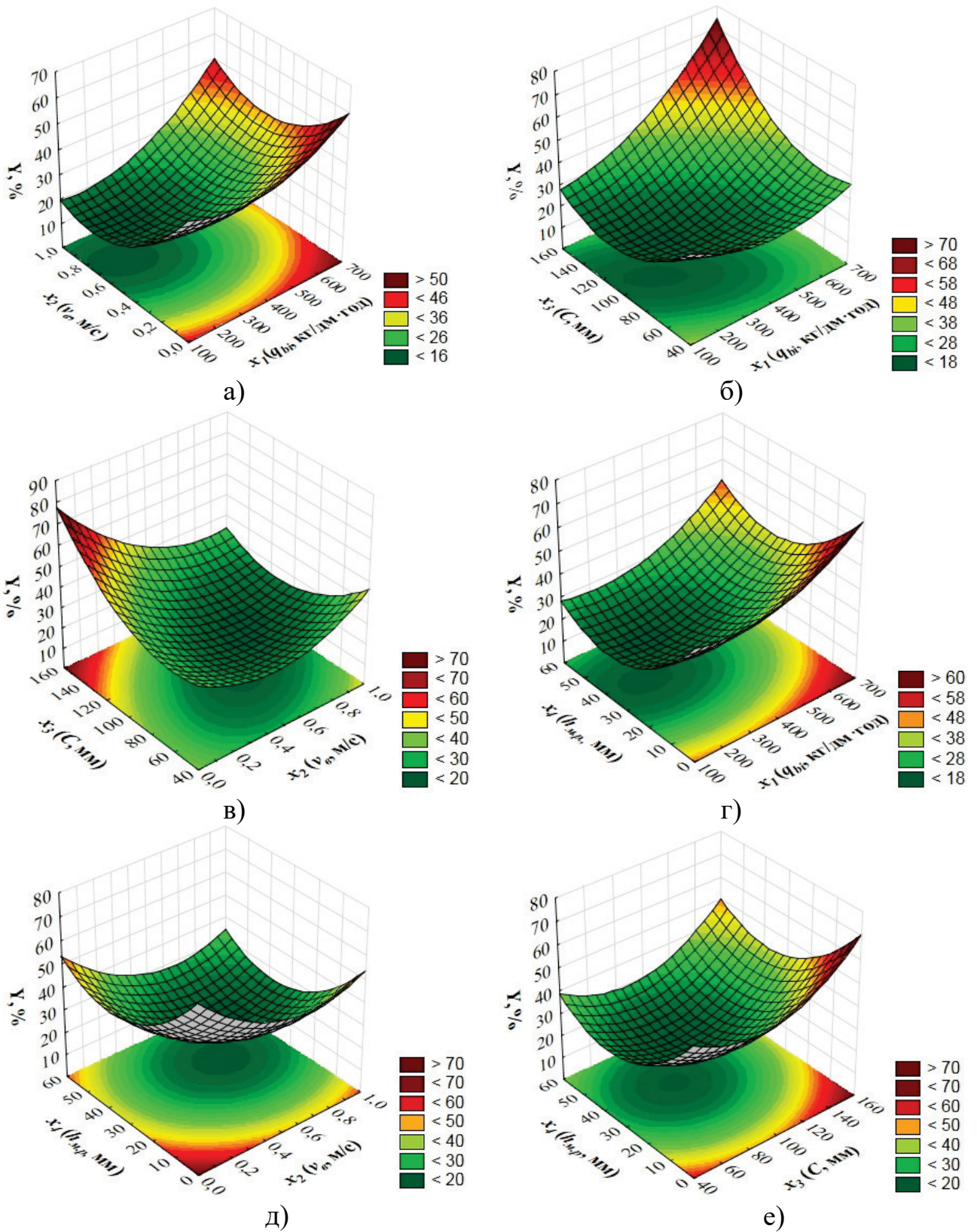
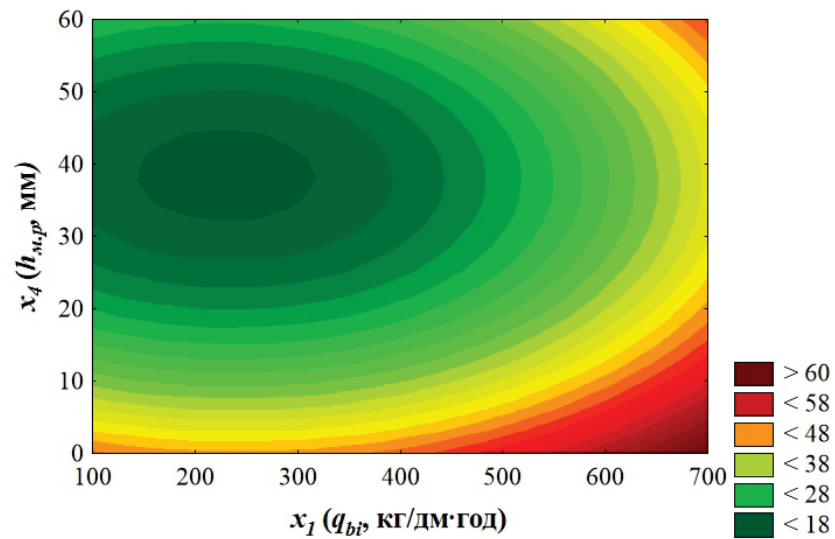
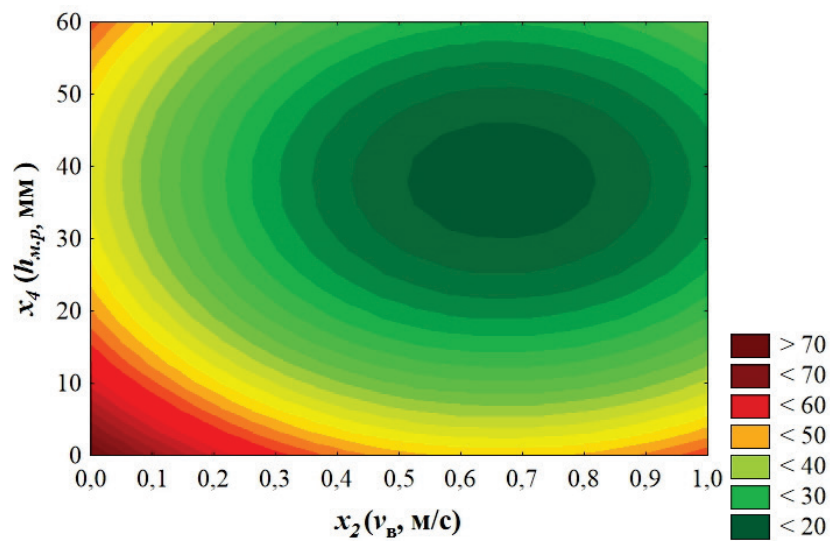


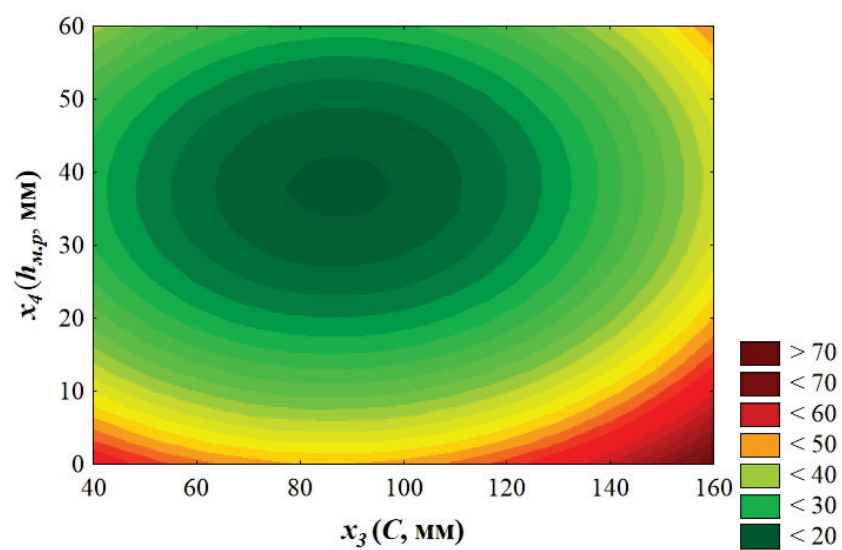
Рис. 4.11. Поверхні відгуку та лінії рівного виходу для рівномірності поля швидкостей повітряного потоку $Y(\delta)$: а) – $Y = (x_2 \cdot x_1)$; б) – $Y = (x_3 \cdot x_1)$; в) – $Y = (x_3 \cdot x_2)$; г) – $Y = (x_4 \cdot x_1)$; д) – $Y = (x_4 \cdot x_2)$; е) – $Y = (x_4 \cdot x_3)$



а)



б)



в)

Рис. 4.12. Графіки ліній рівного виходу взаємного впливу відстані між рівнями $h_{m.p.}(x_4)$ з $v_e(x_2)$ та $C(x_3)$ на рівномірність поля швидкостей $Y(\delta)$.

Метою наступної серії дослідів було реалізація матриці центрального композиційного плану 2^4 зіркові точки, в результаті чого встановлено вплив чинників q_{bi} , C , n , V_n та отримані їх раціональні параметри і режими роботи ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна при забезпеченні максимальної якості сепарації.

Рівні та інтервал варіювання чинників для даної серії дослідів (табл. 4.5) були визначені на основі першої серії дослідів. За критерії оптимізації прийнято повноту розділення $\varepsilon(Y_1)$, % та кількість повноцінного зерна в відходах $z(Y_2)$, %.

Таблиця 4.5.

Результати реалізації матриці планування експерименту 2^4 зіркові точки

Номер дослідів	Навантаження на рівень (q_{bi}), кг/дм год, x_1	Глибина каналу, (C), мм, x_2	Кількість рівнів, (n), x_3	Швидкість повітряного потоку, (V_n), м/с, x_4	Повнота розділення, ε , % (Y_1)	Кількість повноцінного зерна в відходах z , % (Y_2)
1	2	3	3	5	6	7
1	250	110	7	6,5	73,6	0,86
2	250	110	7	8,5	78,6	2,01
3	250	90	7	6,5	68,2	0,65
4	250	90	7	8,5	74,9	1,93
5	250	110	3	6,5	72,7	1,15
6	250	110	3	8,5	76	2,26
7	250	90	3	6,5	67,1	0,96
8	250	90	3	8,5	74,3	2,11
9	350	110	7	6,5	71,9	1,3
10	350	110	7	8,5	76,7	2,39
11	350	90	7	6,5	69,6	1,25
12	350	90	7	8,5	66,2	2,21
13	350	110	3	6,5	72,8	1,57
14	350	110	3	8,5	75,8	2,35
15	350	90	3	6,5	65,7	1,45
16	350	90	3	8,5	72,9	2,55
17	193	100	5	7,5	75,6	0,73
18	407	100	5	7,5	61,8	2,41
19	300	80	5	7,5	67,5	0,68
20	300	120	5	7,5	75,6	2,21
21	300	100	1	7,5	71,9	1,13

Продовження табл. 4.5

22	300	100	9	7,5	63,3	3,19
23	300	100	5	5,5	53,7	0,8
24	300	100	5	9,5	75,3	3,56
25	300	100	5	7,5	82,7	0,76
26	300	100	5	7,5	82,4	0,74

В результаті проведення серії дослідів отримано статистичні математичні моделі для повноти розділення $\varepsilon(Y_1)$ та для кількості повноцінного зерна в відходах, $z(Y_2)$:

$$Y_1 = 82,9 - 1,722x_1 + 2,308x_2 - 0,616x_3 + 3,2x_4 - 2,59x_1^2 - 2,17x_2^2 - 3,16x_3^2 - 3,94x_4^2 + 0,4x_1x_2 - 0,5x_1x_3 - 0,662x_1x_4 + 0,287x_2x_3 - 0,1x_2x_4 - 0,47x_3x_4; \quad (4.2)$$

$$Y_2 = 0,73 + 0,267x_1 + 0,16x_2 + 0,09x_3 + 0,589x_4 + 0,165x_1^2 + 0,155x_2^2 + 0,333x_3^2 + 0,338x_4^2 - 0,003x_1x_2 + 0,016x_1x_3 - 0,047x_1x_4 + 0,016x_2x_3 - 0,022x_2x_4 + 0,021x_3x_4. \quad (4.3)$$

Статистична оцінка отриманих результатів дозволила зробити висновки, що досліди рівноточні, розрахункові значення критерію Кохрена G^P по параметрах оптимізації $Y_1(\varepsilon)$, та $Y_1(z)$, $G_1^P = 0,108$; $G_2^P = 0,068$ менші табличного $G^T = 0,192$. Значимість отриманих коефіцієнтів перевіряли за допомогою критерію Стюдента, табличне значення якого для рівня надійності $P_H = 0,95$ і числа ступенів свободи $f = 25$ складає $t = 2,06$. Дисперсії знайдених коефіцієнтів дорівнюють:

$$(S_b)_1^2 = 1,74; \quad (S_b)_2^2 = 0,00228.$$

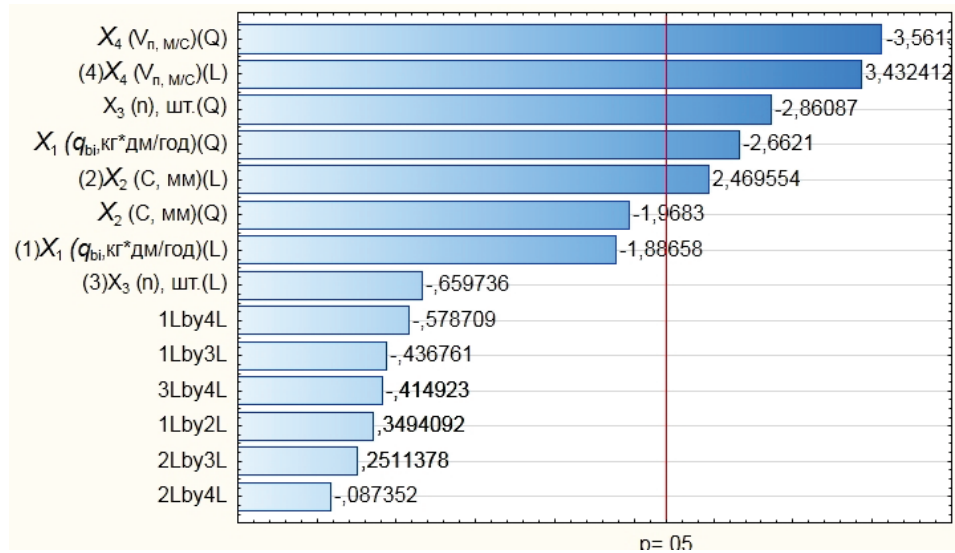
Величина довірчого інтервалу складає:

$$\Delta b_1 = 3,6; \quad \Delta b_2 = 0,047.$$

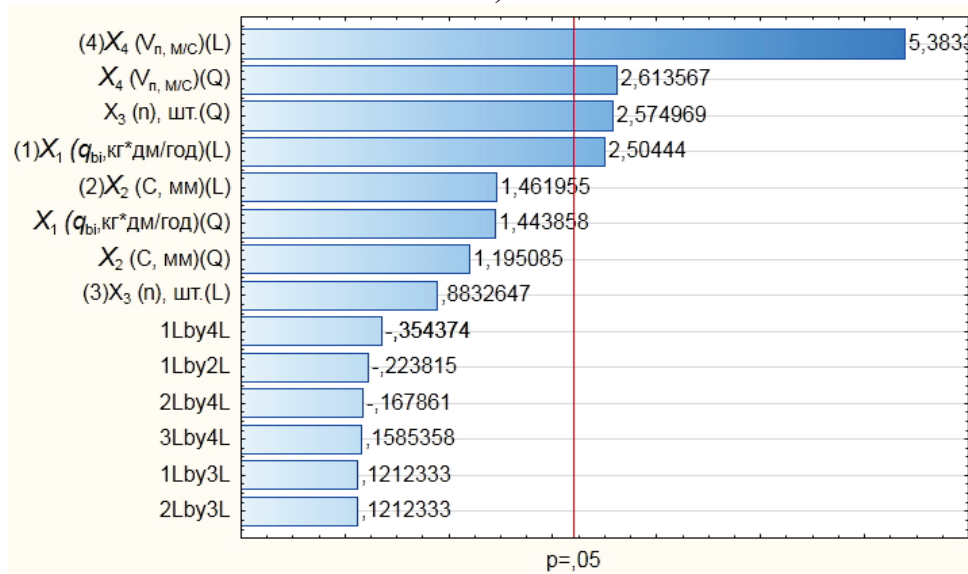
Адекватність рівнянь за критерієм Фішера, табличне значення якого для рівня надійності $P_H = 0,95$ і числа ступенів свободи $f = 25$ складає $F^T = 2,8$. Розрахункові значення $F_1^P = 0,04$ та $F_2^P = 0,297$ не перевищують $F^T = 2,8$, що підтверджує адекватність рівнянь, які описують процес пневмосепарації.

Аналізуючи рівняння регресії та Парето-карту для $Y_1(\varepsilon)$ та для $Y_2(z)$ (рис. 4.13, а, б), можна зробити висновок, що найбільший вплив на повноту

розділення та чіткість сепарації здійснюють лінійне та квадратичне значення середньої швидкості повітряного потоку $V_n(x_4)$, (x_4^2) , лінійне значення величини питомого навантаження $q_{bi}(x_1^2)$ для $Y_2(z)$ та квадратичні значення питомого навантаження $q_{bi}(x_1^2)$ і кількості рівнів $n(x_3^2)$ для $Y_1(\varepsilon)$.



а)



б)

Рис. 4.13. Парето-карти для визначення межі статистичного значення коефіцієнту математичного чекання: а) – для повноти розділення зернового матеріалу $Y_1(\varepsilon)$; б) – для чіткості сепарації $Y_2(z)$, %.

Аналіз взаємного впливу факторів на величину повноти розділення $Y_1(\varepsilon)$ (рис. 4.14) та чіткість сепарації $Y_2(z)$ (рис. 4.16), дозволив зробити наступні висновки.

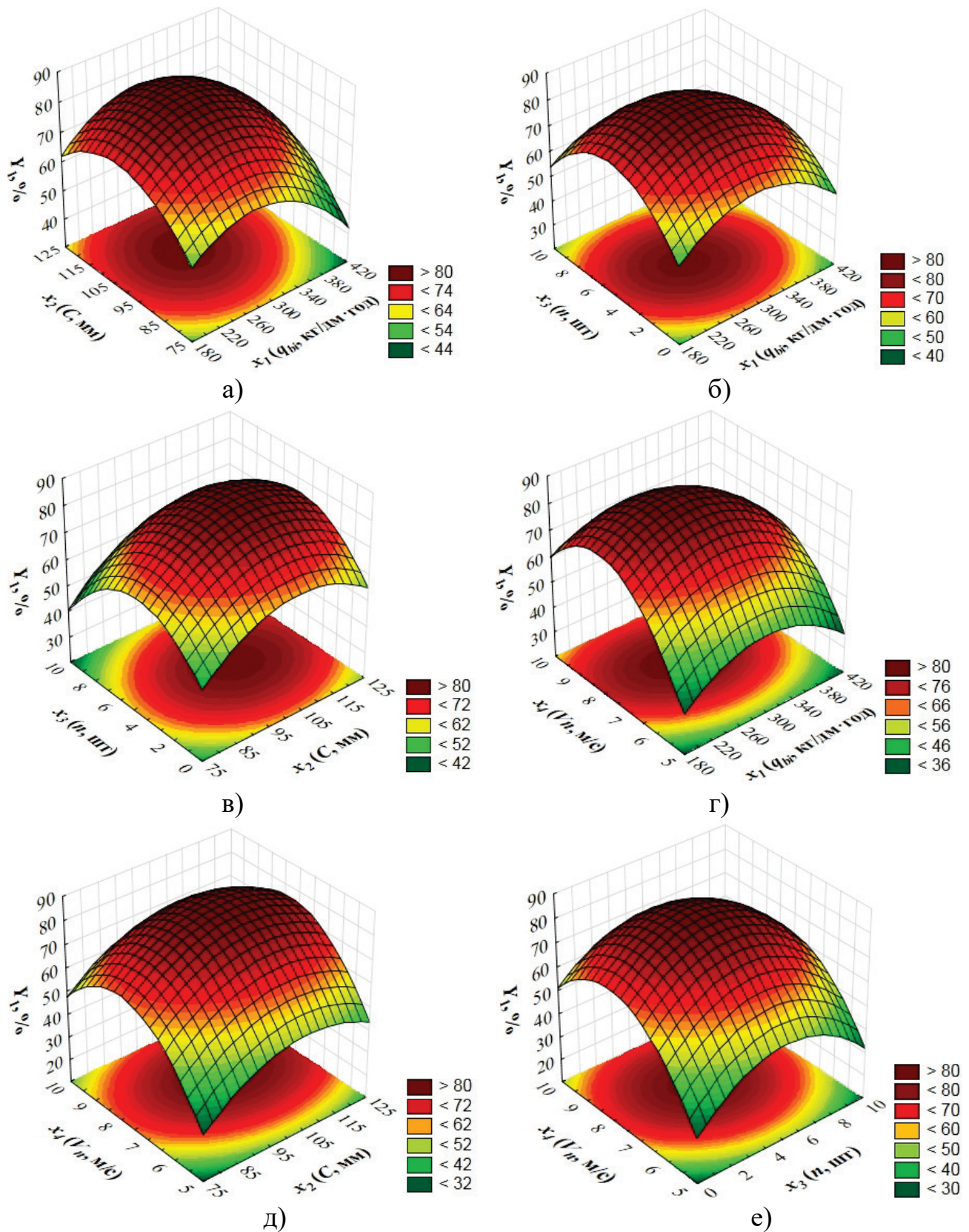


Рис. 4.14. Поверхні відгуку та лінії рівного виходу для повноти розділення $Y_1(\varepsilon)$: а) – $Y_1(x_2 \cdot x_1)$; б) – $Y_1(x_3 \cdot x_1)$; в) – $Y_1(x_3 \cdot x_2)$; г) – $Y_1(x_4 \cdot x_1)$; д) – $Y_1(x_4 \cdot x_2)$; е) – $Y_1(x_4 \cdot x_3)$

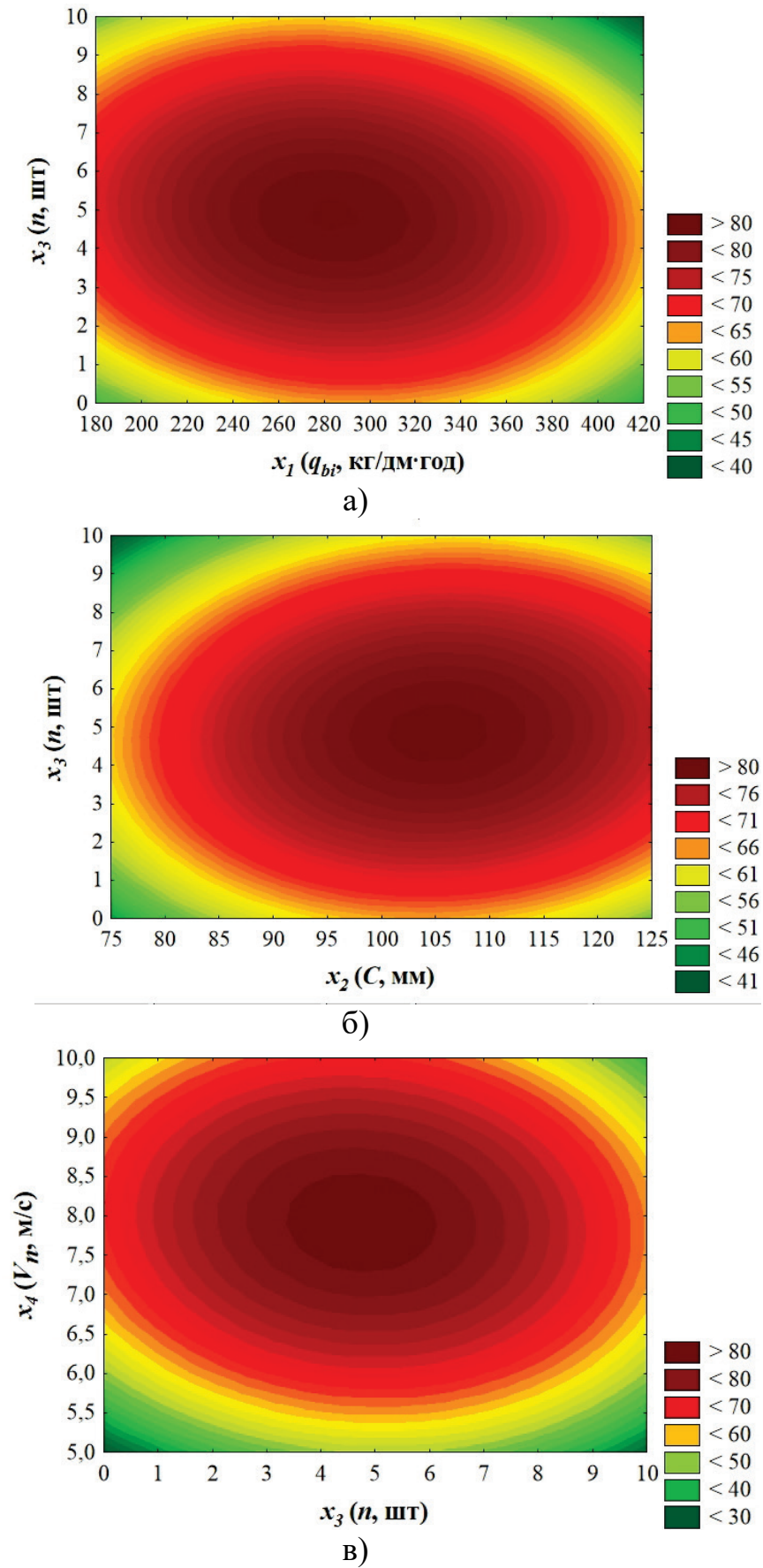


Рис. 4.15. Графіки ліній рівного виходу взаємного впливу кількості рівнів живильника на повноту розділення. а) – $Y_I = (x_1 \cdot x_3)$; б) – $Y_I = (x_2 \cdot x_3)$; в) – $Y_I = (x_3 \cdot x_4)$

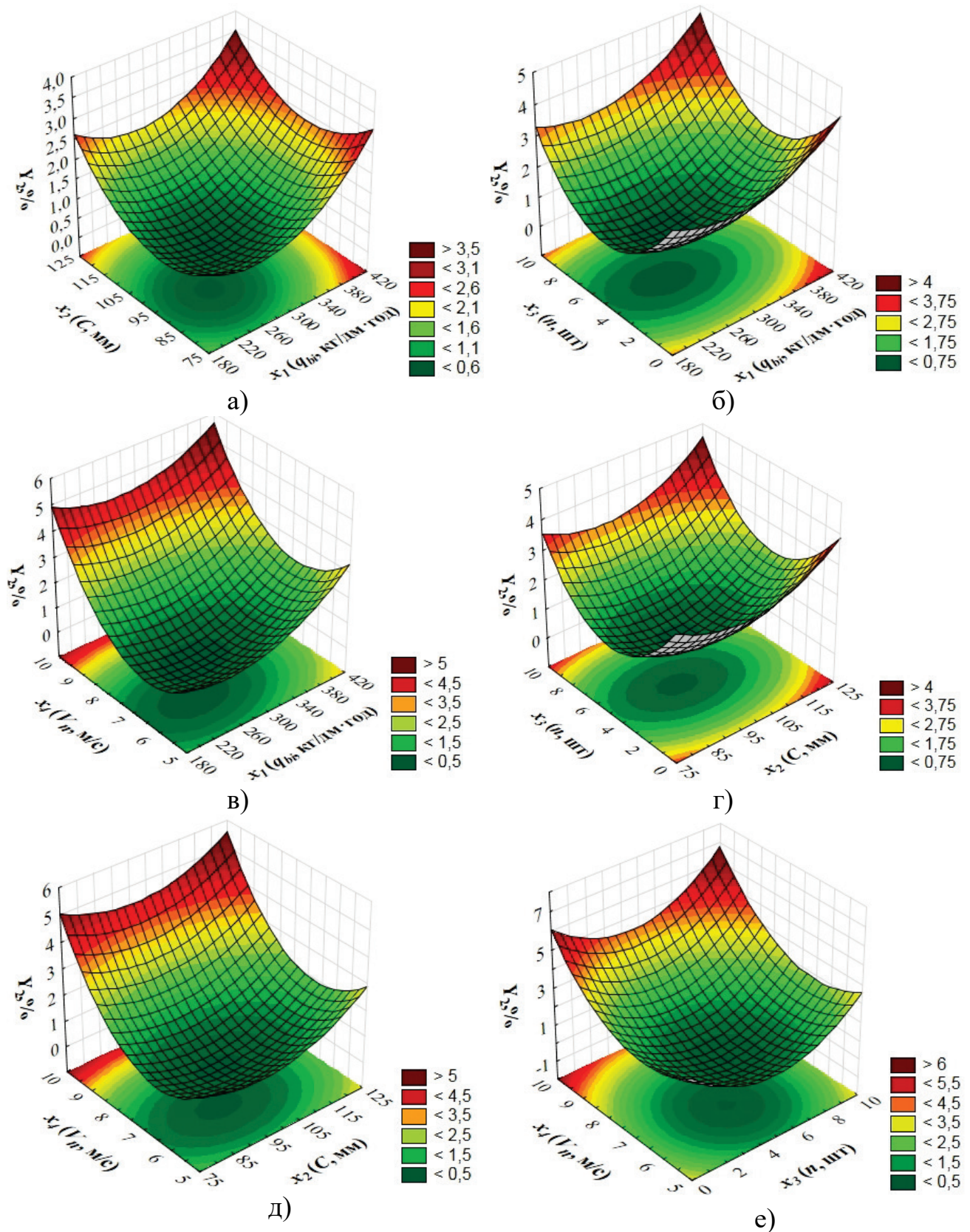


Рис. 4.16. Поверхні відгуку та лінії рівного виходу для кількості повноцінного зерна в відходах, $Y_2(z)$: а) – $Y_2(x_2 \cdot x_1)$; б) – $Y_2(x_3 \cdot x_1)$; в) – $Y_2(x_4 \cdot x_1)$; г) – $Y_2(x_3 \cdot x_2)$; д) – $Y_2(x_4 \cdot x_2)$; е) – $Y_2(x_4 \cdot x_3)$

При збільшенні кількості рівнів більше шести відбувається зменшення повноти розділення ε , що можна пояснити підвищенням кількості потрапляння легких домішок, які виносяться з нижніх шарів матеріалу у фракцію очищеного зерна вище розташованих шарів. Це відповідно збільшує вірогідність їх засмічення та підвищує втрати повноцінного зерна у відходах z . В той же час, кількість рівнів і питома подача є взаємозалежними факторами. При цьому, для досягнення повноти розділення зернового матеріалу $\varepsilon = 70...75\%$ та мінімальних втратах зерна в відходах $z \leq 2\%$, область раціональних значень кількості задіяних рівнів живильного пристрою знаходиться в межах $n = 4...6$ шт. при питомому навантаженні $q_{bi} = 250...300$ кг/дм·год.

Для детальнішого аналізу експериментальних даних безпосередньо по кожному з факторів приведемо графіки їх впливу на повноту розділення $Y_1(\varepsilon)$ та чіткість сепарації $Y_2(z)$ (рис. 4.17 – 4.20).

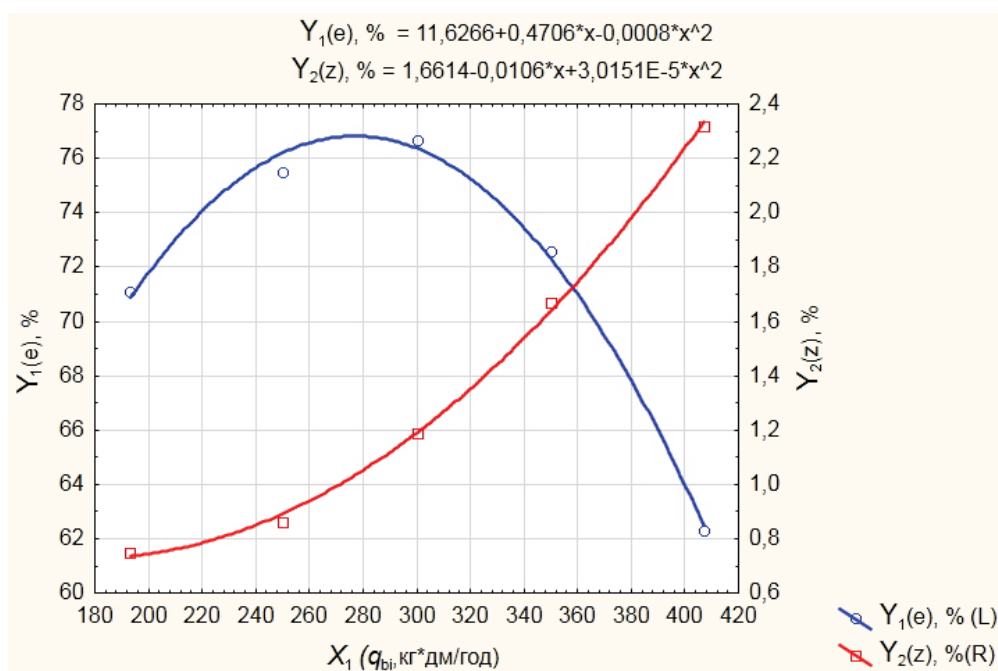


Рис. 4.17. Вплив питомого навантаження на i -му рівні живильника $x_1 (q_{bi})$, кг/дм·год на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

Аналізуючи графіки (рис. 4.17 – 4.20) можна стверджувати, що збільшення глибини каналу C позитивно впливає на повноту розділення ε , що пояснюється збільшенням часу перебування частинок в полі дії повітряного потоку, але при цьому підвищується вірогідність виносу повноцінного зерна у відходи.

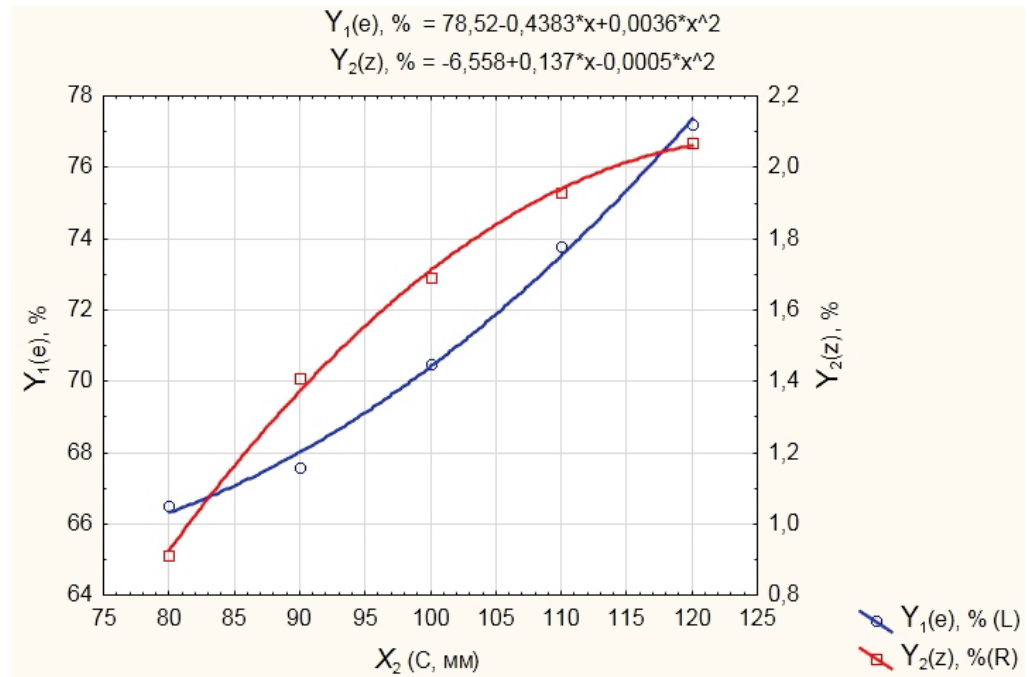


Рис. 4.18. Вплив глибини каналу $x_2(C)$, мм на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

При збільшенні $C > 110$ мм відбувається перерозподіл поля швидкостей повітряного потоку, що й призводить до зменшення повноти розділення. Тому, інтервал раціональних значень глибини каналу C , при якій забезпечується найбільше значення повноти розділення при питомому навантаженні $q_{bi} = 280 \dots 320$ кг·дм/год., знаходиться в межах $C = 100 \dots 110$ мм.

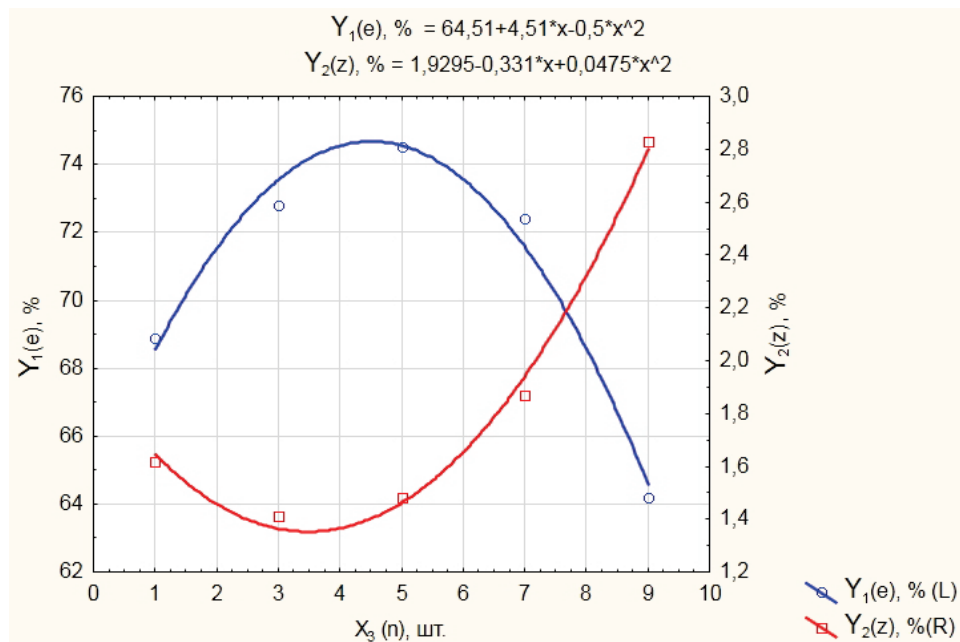


Рис. 4.19. Вплив кількості рівнів $x_3(n)$, шт на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

Аналіз залежностей впливу середньої швидкості повітряного потоку на якісні показники процесу сепарації (рис. 4.22) дозволяє відзначити, що підвищення V_n сприяє покращенню повноти розділення зернового матеріалу ε , в той же час призводить до збільшення кількості повноцінного зерна у відходах z .

Але при застосуванні багаторівневого введення матеріалу в ПСК відбувається вирівнювання поля швидкостей повітряного потоку, в результаті чого досягається наближення середньої швидкості повітряного потоку до швидкості витання повноцінного зерна. Це дозволяє підвищити середню швидкість повітряного потоку в порівнянні з традиційним введенням матеріалу, забезпечуючи при цьому мінімальні втрати повноцінного зерна z та досягнути значного підвищення повноти розділення легких домішок ε . Область раціональних значень цього показника знаходиться в межах $V_n = 7,5 \dots 8$ м/с.

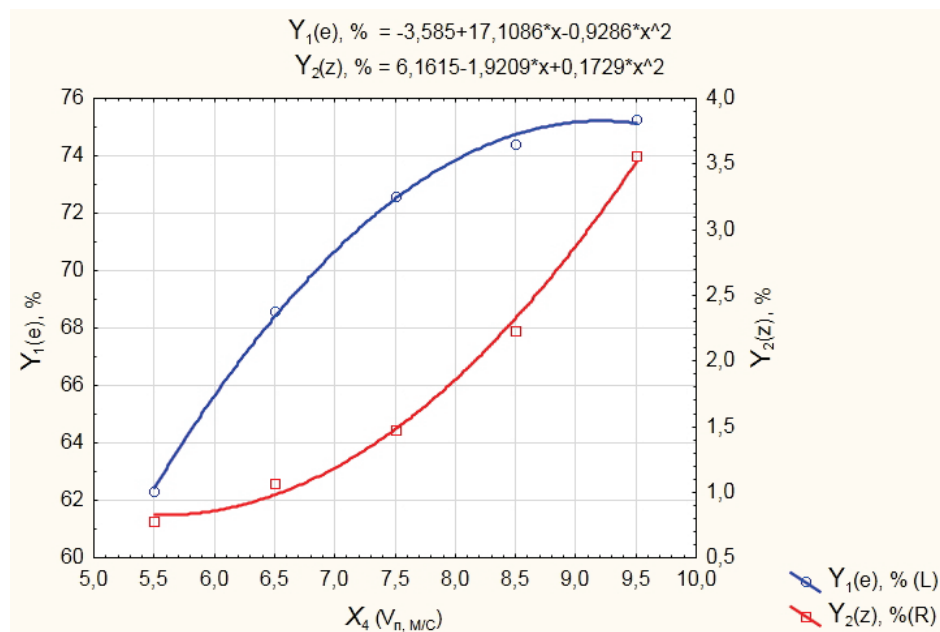
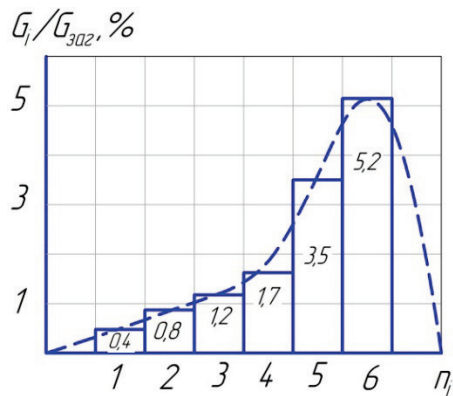


Рис. 4.20. Вплив швидкості повітряного потоку $x_4 (V_n)$, м/с на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

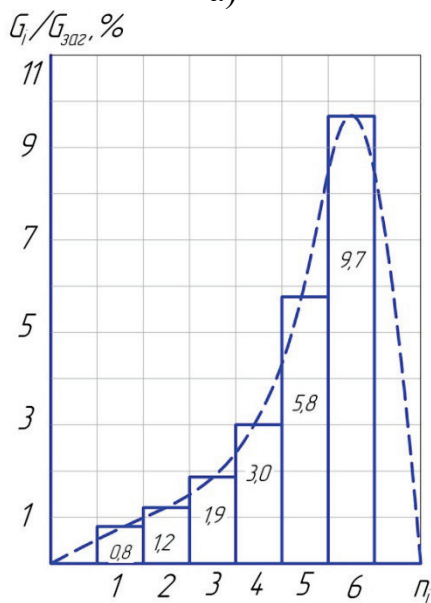
При виборі раціональних параметрів і режимів роботи сепаратора визначальним є максимально можливе значення повноти розділення ε при забезпеченні мінімальних втрат повноцінного зерна z . Тому досягнути максимальних значень показників якості процесу пневмосепарації $Y_1(\varepsilon)$ та $Y_2(z)$ одночасно неможливо, оскільки вони мають обернено-пропорційний зв'язок.

4.6. Оцінка рівномірності розподілу зернового матеріалу та ступеня засміченості очищеного зерна по висоті ПСК

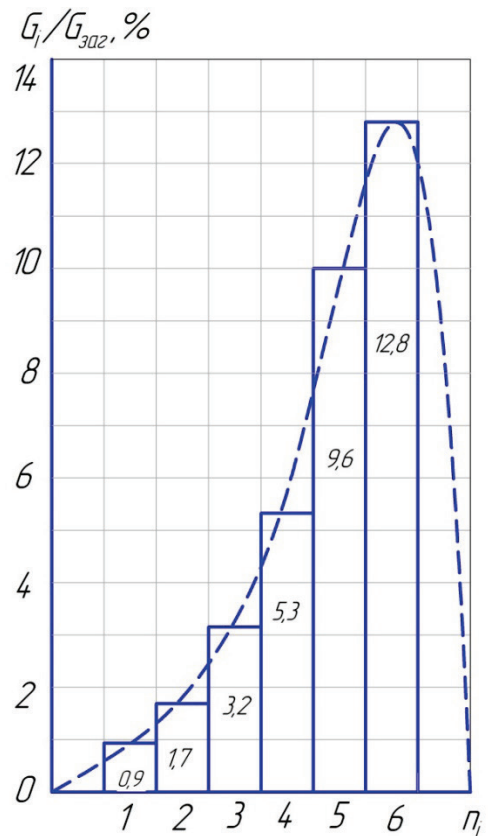
Результати визначення засміченості очищеного зерна по висоті ПСК (рис. 4.21) дозволяють зробити висновок, що вміст домішок в очищеному зерні збільшується по експоненціальному закону як для дворівневого введення, так і при чотирьох і шести задіяних рівнях.



а)



б)



в)

Рис. 4.21. Варіаційний розподіл вмісту легких домішок в очищеному зерні по висоті ПСК (питоме навантаження $q_{bi} = 350$ кг·дм/год) при кількості рівнів живильного пристрою: а – 2; б – 4; в – 6

Аналіз залежностей дозволяє стверджувати, що по мірі збільшення кількості задіяних рівнів живильника відсотковий вміст легких домішок в очищеному зерні підвищується в кожному приймальнику по висоті ПСК. При

цьому, основна частина домішок, що потрапила в очищене зерно, знаходиться в п'ятому та шостому приймальному незалежно від кількості задіяних рівнів.

Так, при дворівневому введенні в 5 і 6 приймальною потрапило легких домішок 8,7% із 12,8 %, при чотирирівневому – 15,5% із 22,4 %, при шести задіяних рівнях – 24,8% із 33,5 %. Відповідно, повнота розділення при двох задіяних рівнях становить $\varepsilon = 87,2\%$ ($q_B = 700$ кг/дм·год), при чотирирівневому введенні – $\varepsilon = 77,6\%$ ($q_B = 1400$ кг/дм·год), і при шестирівневому введенні – $\varepsilon = 65,5\%$ ($q_B = 2100$ кг/дм·год).

Аналіз графіка (рис. 4.22) дозволяє відзначити, що рівномірність заповнення приймальною очищеного зерна підвищується зі збільшенням кількості задіяних рівнів живильника. Відповідно, чим більше задіяних рівнів живильника, тим рівномірніше матеріал розподіляється по висоті ПСК.

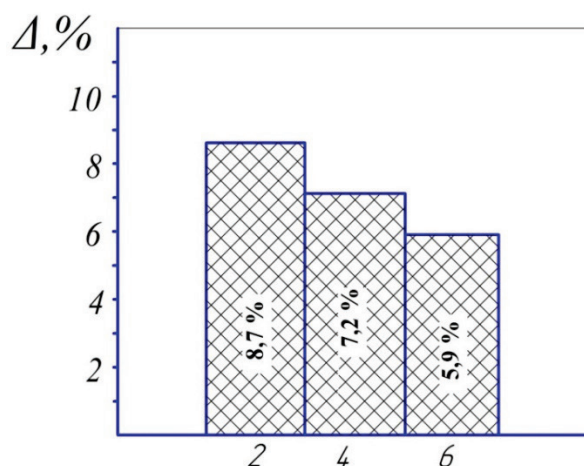
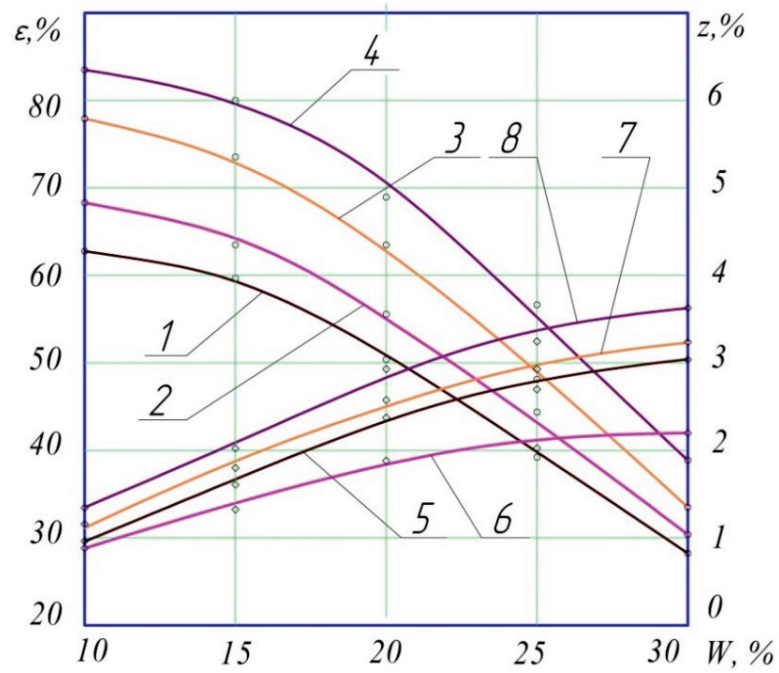


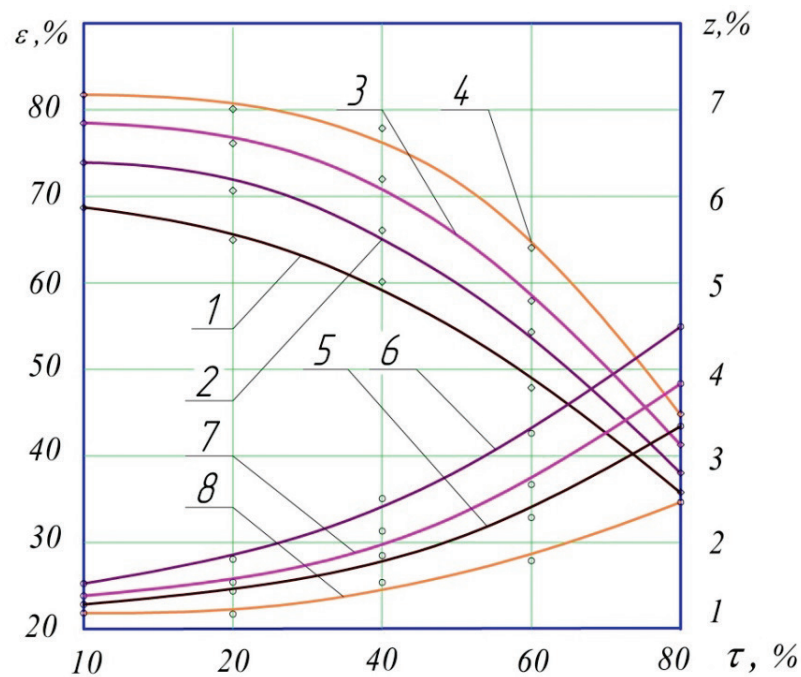
Рис. 4.22. Діаграма рівномірності розподілу зернового матеріалу по висоті ПСК. 2, 4, 6 – кількість задіяних рівнів живильника відповідно.

4.7. Вплив засміченості та вологості зернового матеріалу на ефективність пневмосепарації

Підвищення вологості та засміченості зернового матеріалу (рис. 4.23) суттєво впливає на якісні показники процесу пневмосепарації, оскільки в першому випадку збільшується швидкість витання легких домішок, а в другому – їх об'ємна концентрація, що погіршує умови їх розділення в ПСК [26, 32, 51].



а)



б)

Рис. 4.23. Вплив вологості (а) та засміченості (б) зернового матеріалу на повноту розділення ε та чіткість сепарації z при швидкості повітряного потоку в ПСК $V_n = 8$ м/с, швидкості введення $v_e = 0,6$ м/с, глибині каналу $C = 0,11$ м:
 $\varepsilon = f(W)$ – залежності 1–4; $z = f(W)$ – залежності 5–8. 1, 5 – традиційне введення з питомим навантаженням $q_B = 1200$ кг/дм·год; 2, 6 – шестирівневе введення при $q_B = 2100$ кг/дм·год; 3, 7 – чотирирівневе введення при $q_B = 1400$ кг/дм·год; 4, 8 – трирівневе введення при $q_B = 1050$ кг/дм·год.

Отримані результати (рис. 4.23, а, б) підтверджують дослідження, що підвищення вологості матеріалу призводить до зниження якості очищення. Це спостерігається як при багаторівневому, так і традиційному введенні матеріалу.

Застосування багаторівневого введення (рис. 4.23, а) сприяє підвищенню повноти розділення та чіткості сепарації при аналогічних показниках вологості, порівняно з традиційним.

Так, при вологості $W = 20\%$ та питомому навантаженні $q_B = 1200$ кг/дм·год при введенні традиційним способом повнота розділення становить 51%. Тоді як при чотирирівневому введенні з питомим навантаженням $q_B = 1400$ кг/дм·год повнота розділення збільшується до 64 %, що доводить можливість ефективного застосування багаторівневого введення при очищенні зернового матеріалу з підвищеною вологістю.

Аналіз залежностей (рис. 4.23, б) показує, що зі збільшенням вмісту легкого компоненту в зерновому матеріалі якісні показники погіршуються, як при традиційному способі введення матеріалу, так і багаторівневому.

Зменшення повноти розділення пояснюється тим, що повітряному потоку необхідно виділити і транспортувати більшу кількість матеріалу. Зокрема, при багаторівневому введенні зі збільшенням вмісту легких домішок підвищується ймовірність їх потрапляння в вище розміщені шари зернового матеріалу в ПСК, що відповідно дещо погіршує як ефект очистки так і чіткість сепарації.

Але при цьому, використання багаторівневого введення сприяє підвищенню повноти розділення ϵ на 12...18% та зменшенню чіткості сепарації z на 0,6...2,4 % в порівнянні з традиційним введенням.

4.8. Оцінка технологічної характеристики ПСК з багаторівневим введенням зернового матеріалу

Отримані експериментальні залежності (рис. 4.24) в достатній мірі підтверджують характер зміни аналітичних кривих (див. рис. 2.13), відмінність полягає лише в відсотковому відношенні.

Так при питомому навантаженні $q_B = 500$ кг/дм·год повнота розділення становить $\varepsilon = 89,5\%$, а при $q_B = 2100$ кг/дм·год досягає $\varepsilon = 58,5\%$, тоді як при аналітичних дослідженнях отримано $\varepsilon = 98\%$ і $\varepsilon = 66,5\%$ відповідно.

Така різниця між теоретичними і експериментальними даними пояснюється тим, що умови розділення зернової суміші на практиці і при аналітичному розгляді (при прийнятих допущеннях) відрізняються.

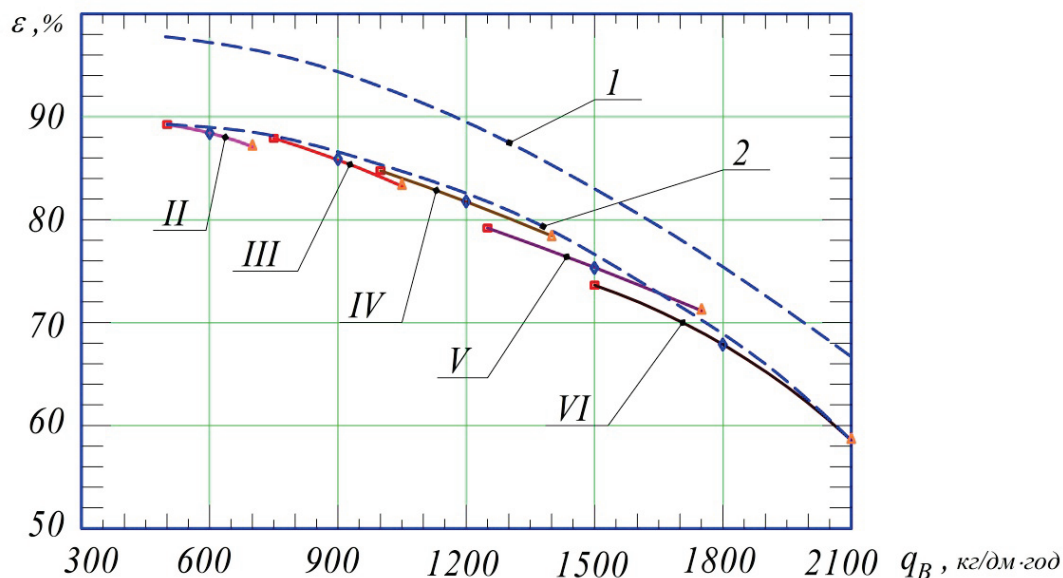


Рис. 4.24. Залежність повноти розділення зернового матеріалу від величини питомого навантаження ПСК, $\varepsilon = f(q_B)$: 1 – аналітична (див. рис. 2.13);

2 – експериментальна. II – VI – кількість задіяних рівнів введення

Аналіз отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що зі збільшенням кількості задіяних рівнів та питомого навантаження на них q_{bi} повнота розділення зменшується (рис. 4.24).

Проаналізувавши отримані залежності, можна зробити висновок, що при виборі необхідних параметрів і режимів роботи ПСК необхідно виходити з умови: $q_B \rightarrow \max$ при $\varepsilon \rightarrow \min$, $n \rightarrow \min$. При цьому, для попереднього очищення зернового матеріалу $\varepsilon \geq 50\%$ доцільно встановлювати величину питомого навантаження на i -ий рівень живильного пристрою $q_{bi} = 350$ кг/дм·год ($q_B = 2100$ кг/дм год) з кількістю задіяних рівнів $n = 6$. Для первинного очищення з $\varepsilon \geq 60\%$ найбільш раціональним є навантаження $q_{bi} = 300$ кг/дм·год

($q_B = 1800$ кг/дм год) при $n = 6$, для вторинного очищення $\varepsilon \geq 70\%$ доцільно застосувувати п'ятирівневе введення при $q_{bi} = 350$ кг/дм·год ($q_B = 1750$ кг/дм год), а при підготовці насіннєвого матеріалу $\varepsilon \geq 80\%$ найбільш раціональним є задіювання чотирьох рівнів при $q_{bi} = 300$ кг/дм·год ($q_B = 1200$ кг/дм год).

При порівняльній оцінці вдосконаленого та традиційного способів введення зернового матеріалу (рис. 4.25), використаний матеріал пшениця, сорту «Вікторія», при вологості 14,6% з вихідним вмістом легких домішок $\tau = 12,4\%$.

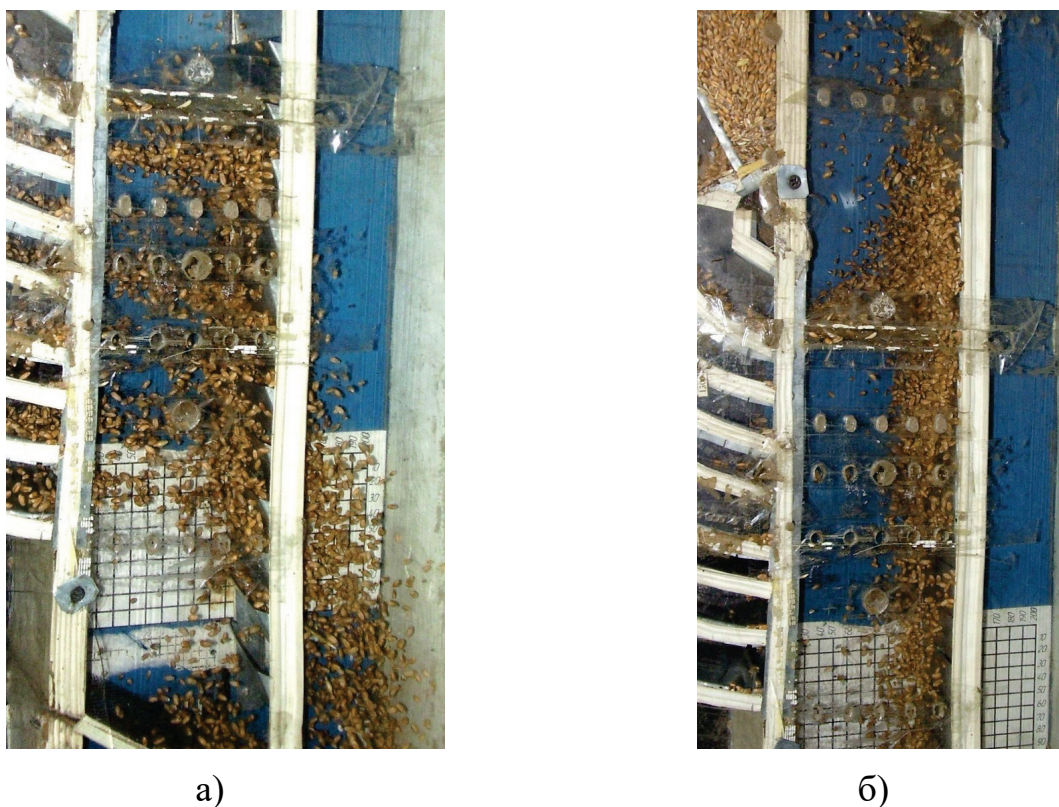


Рис. 4.25. Процес розділення зернової суміші в ПСК:
а) – з вдосконаленням; б) – традиційним введенням.

Аналіз результатів досліджень (рис. 4.26) дозволяє зазначити, що при традиційному завантаженні ПСК (крива 1 рис. 4.26) спостерігається майже прямопропорційна залежність, при якій відбувається різке зниження повноти розділення ε та значний приріст повноцінного зерна в відходах, z (крива 5), і при досягненні $q_B = 1600$ кг/дм год показники якості не відповідають вимогам для попереднього очищення зерна. Незначний приріст повноти розділення відбувається при традиційному введенні матеріалу з виведенням очищеного

матеріалу через жалюзійну стінку (крива 2, рис. 4.26), при $q_B \geq 1500$ кг/дм год в середньому на 3...6 %.

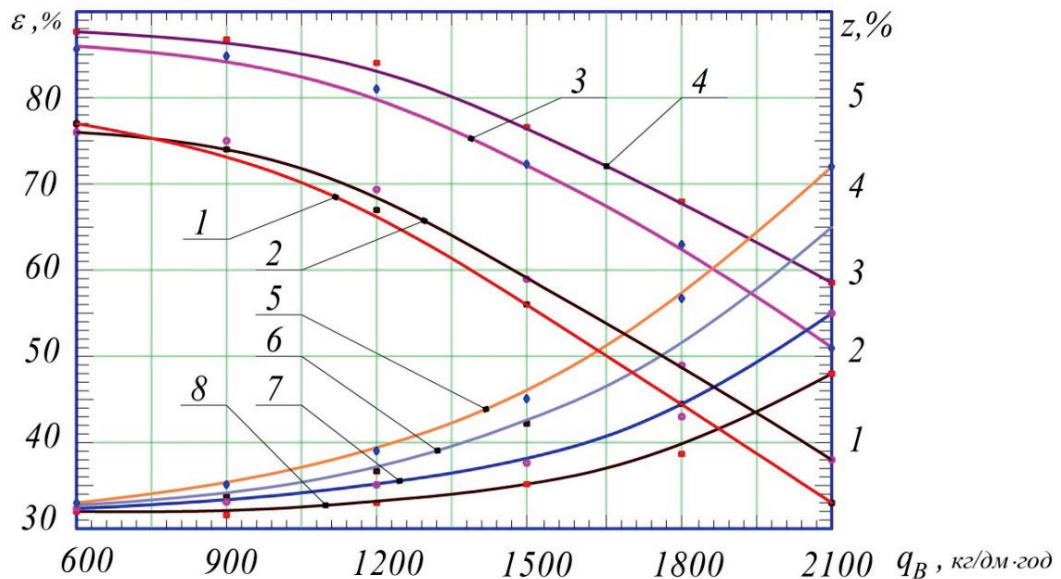


Рис. 4.26. Порівняльна характеристика способів завантаження ПСК:
 $\varepsilon = f(q_B)$ – залежності 1–4; $z = f(q_B)$ – залежності 5 – 8. 1,5 – однорівневе введення; 2,6 – однорівневе введення з виведенням через жалюзійну стінку; 3,7 – багаторівневе введення; 4,8 – багаторівневе введення з виведенням через жалюзійну стінку.

Забезпечення найбільших значень якості очищення спостерігається при застосуванні багаторівневого введення з виведенням очищеного зерна через жалюзійну стінку (криві 4 та 8 рис. 4.26). при цьому у всьому діапазоні значень питомого навантаження якісні показники залишаються в межах вимог до попереднього очищення зерна.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування вдосконаленого способу введення зернового матеріалу в порівнянні з традиційним дозволяє підвищити якість очищення зерна на 12...25%.

Висновки по розділу:

1. Для забезпечення одношарового руху при багаторівневому введенні зернового матеріалу зі швидкістю введення в ПСК $v_g = 0,5...0,6$ м/с, при якому створюються найбільш сприятливі умови розділення, раціональні параметри прямої гравітаційної кривої живильного пристрою будуть

наступні: довжина та кут розгінної ділянки, $L_p = 0,2$ м; та $\alpha = 33^\circ$ відповідно, радіус дуги напрямної кривої $r = 0,15$ м.

2. Встановлено, що для забезпечення раціонального і стабільного зниження опору ΔH для щільного однорядного зернового шару необхідно здійснити відповідне розшарування, при якому відстань між сусідніми частинками в вертикальній та горизонтальній площині буде більшою $h \geq 3 \dots 4$ мм., тобто приблизно рівною розміру зернової частинки, при їх взаємному розташуванню в сусідніх рядах в «шаховому порядку».
3. Використання багаторівневого введення матеріалу сприяє вирівнюванню поля швидкостей повітряного потоку при збільшенні питомого навантаження на ПСК q_B . Визначено, що раціональне значення міжрівневої відстані $h_{m.p.}$ залежить від величини питомого навантаження на i -ий рівень живильного пристрою q_{bi} , а отже й концентрації матеріалу в певному об'ємі ПСК, раціональне значення якого знаходиться в межах $h_{m.p.} = 30 \dots 40$ мм.
4. При застосуванні багаторівневого введення матеріалу, незалежно від кількості задіяних рівнів живильного пристрою, найбільша кількість домішок потрапляє в очищене зерно напроти найвищого задіяного рівня. При цьому визначено, що збільшення кількості рівнів живильника покращує рівномірність розподілу зернового матеріалу по висоті ПСК.
5. Повнота виділення домішок в робочій зоні ПСК збільшується зі збільшенням середнього значення швидкості повітряного потоку V_n та глибини каналу C , при цьому відбувається підвищення вмісту повноцінного зерна в відходах. Їх раціональні значення знаходиться в межах $V_n = 7,5 \dots 8$ м/с та $C = 100 \dots 110$ мм відповідно.
6. Встановлено, що кількість рівнів n і питома подача на рівень живильного пристрою q_{bi} є взаємозалежними факторами, при цьому, для отримання повноти розділення зернового матеріалу $\varepsilon \geq 70\%$ та мінімальних втратах зерна в відходах $z \leq 2\%$, область раціональних значень кількості задіяних рівнів живильного пристрою знаходиться в межах $n = 4 \dots 6$ шт.

7. Підвищена вологість та засміченість вихідного зернового матеріалу негативно впливає на процес його розділення повітряним потоком. Так, при вихідній вологості та засміченості зернового матеріалу $W = 20\%$ та $\tau = 40\%$ при використанні багаторівневого введення матеріалу в ПСК, порівняно з традиційним, досягається підвищення повноти розділення ε на $13...16\%$ та зменшення чіткості сепарації z на $0,3...0,8\%$ для W , та на $12...18\%$ і $0,3...0,8\%$ для τ , відповідно.
8. При виборі необхідних параметрів і режимів роботи ПСК для багаторівневого введення необхідно виходити з умови: $q_B \rightarrow \max$ при $\varepsilon \rightarrow \text{opt}$, $n \rightarrow \text{opt}$. При цьому, для попереднього очищення ($\varepsilon \geq 50\%$) доцільно встановлювати величину питомого навантаження на i -ий рівень живильного пристрою $q_{bi} = 350$ кг/дм·год ($q_B = 2100$ кг/дм год) з кількістю задіяних рівнів $n = 6$. Для первинного очищення ($\varepsilon \geq 60\%$) найбільш раціональним є також шестирівневе введення при $q_{bi} = 300$ кг/дм·год ($q_B = 1800$ кг/дм год), для очищення $\varepsilon \geq 70\%$ доцільно застосовувати п'ятирівневе введення при $q_{bi} = 350$ кг/дм·год ($q_B = 1750$ кг/дм год), а для високоякісного очищення $\varepsilon \geq 80\%$ найбільш раціональним є застосування чотирьох рівнів при $q_{bi} = 300$ кг/дм·год ($q_B = 1200$ кг/дм год).
9. Застосування вдосконаленого способу введення матеріалу порівняно з традиційним підвищує якість очищення зерна в ПСК на $12...25\%$ залежно від призначення очищення.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Методика інженерного розрахунку пневмосепаратора з багаторівневим введенням зернового матеріалу

Вихідні дані: продуктивність Q , повнота розділення ε , чіткість сепарації z , характеристика зернового матеріалу.

Порядок розрахунку:

1. Кількість рівнів живильного пристрою розраховується з умови заданої якості і необхідної продуктивності пневмосепаратора:

$$n = \frac{Q}{q_{bi} \cdot B}, \quad (5.1)$$

де Q – продуктивність пневмосепаратора, кг/год;

q_{bi} – питома навантаження на рівень живильного пристрою, кг/дм·год;

B – ширина ПСК, дм.

2. Величина питомого навантаження на рівень живильного пристрою q_{bi} (кг/дм·год) пов'язана з якістю очищення, і залежить від коефіцієнта розрідження зернового потоку в ПСК f_p :

$$q_{bi} = \frac{\pi}{6} (v_s \cdot R \cdot \gamma) \cdot \frac{2}{1 + f_p}, \quad (5.2)$$

де v_s – швидкість введення матеріалу в канал, м/с;

R – середній радіус зерна, м;

γ – об'ємна маса зерна, кг/дм³;

f_p – коефіцієнт розрідженості зернового потоку в ПСК, $f_p = 1$ при відстані

між поверхнями зернин в напрямку руху зернового потоку рівній $2R$.

3. Довжина розгінної ділянки прямої гравітаційної кривої визначається за формулою:

$$L_p = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2g(\sin \alpha - f \cos \alpha)}, \quad (5.3)$$

де v_1 – швидкість руху зернового матеріалу в кінці розгінної прямолінійної ділянки (м/с), яка визначається рівнянням (2.4);

v_0 – початкова швидкість витікання зернового матеріалу з бункера, м/с;

α – кут нахилу розгінної ділянки, град;

f – коефіцієнт тертя, $f = 0,36 \dots 0,65$ [37].

4. Радіус дуги прямої гравітаційної кривої живильного пристрою визначається виразом:

$$r = \frac{v_0^2}{2g} \frac{\frac{1+4f^2}{1-2f^2} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_0} \right)^2 e^{-2f\left(\varphi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)} \right]}{\frac{3f}{1-2f^2} \cos \varphi + \sin \varphi - \left(\frac{3f}{1-2f^2} \sin \alpha + \cos \alpha \right) e^{-2f\left(\varphi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right)}}, \quad (5.4)$$

де v_0 – швидкість введення зернового матеріалу в ПСК, м/с;

φ – кут, що визначає положення частки на дугоподібній ділянці. При куті розгінної ділянки $\alpha = 33^\circ$ на сході з направляючої поверхні живильного пристрою, $\varphi = 3,87^\circ$.

5. Рациональна швидкість повітряного потоку, з врахуванням багаторівневого способу введення зернового матеріалу в ПСК:

$$V_n = \sqrt{k_{\text{в.д.}} \cdot (V_{\text{в.з.}}^{\max} \cdot V_{\text{в.д.}}^{\max})}, \quad (5.5)$$

де $V_{\text{в.д.}}^{\max}$ – найбільша швидкість витання легких домішок, м/с;

$V_{\text{в.з.}}^{\max}$ – найбільша швидкість витання повноцінного зерна, м/с;

$k_{\text{в.д.}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив домішок на опір переміщення в засміченому повітряному потоці, $k_{\text{в.д.}} = 1,03 \dots 1,05$.

6. Глибина ПСК визначається рівнянням:

$$C = \frac{V_6}{V_n k_3} (1 - e^{-V_n k_3 t}), \quad (5.6)$$

де k_3 – коефіцієнт, який враховує вплив засміченості повітряного потоку на швидкість витання зерна;

t – час руху частинки від передньої до задньої стінки, який визначається рівнянням (2.22).

7. Мінімальна висота верхньої частини ПСК з урахуванням багаторівневого способу введення зерна:

$$H_{B_{\min}} = (h_{м.р.} \cdot n) + (\delta \cdot \Delta S), \quad (5.7)$$

де $h_{м.р.}$ – міжрівнева відстань, м;

δ – коефіцієнт варіації, який характеризує ступінь нерівномірності швидкостей повітряного потоку та визначається виразом:

$$\delta = \frac{\sigma}{V_n} \cdot 100\%, \quad (5.8)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення швидкостей в окремих точках поперечного перетину ПСК від середньої швидкості повітряного потоку, м/с;

ΔS – максимальна висота підймання повноцінного зерна, м.

8. Вибір вентилятора.

8.1. Витрати повітря у ПСК, м³/год:

$$Q_n = 3600 \cdot V_n \cdot S, \quad (5.9)$$

де V_n – середня швидкість повітряного потоку в ПСК, м/с;

S – площа поперечного перерізу ПСК, м².

8.2. Загальні втрати тиску в пневмосепаруючому каналі з багаторівневим введенням матеріалу $P_{ПСК}$ складаються з втрат на подолання тертя P_f по

стінках, опору зернових шарів, на переміщення виділених домішок $P_{\text{зер}}$ та опору жалюзійної стінки $P_{\text{жс}}$ та визначаються рівнянням:

$$P_{\text{ПСК}} = P_f + P_{\text{зер}} + P_{\text{жс}}. \quad (5.10)$$

8.2.1. Втрати на подолання тертя визначаються згідно з рекомендаціями [29, 100]:

$$P_f = \xi \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho_n \cdot \frac{V_n^2}{2}, \quad (5.11)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору тертя, який наближено визначається за формулою Блесса:

$$\xi = 0,0125 + \frac{0,0011}{d}, \quad (5.12)$$

де l – довжина каналу, м;

d – діаметр ПСК, м;

ρ_n – густина повітря, кг/м³.

8.2.2. Визначення втрат тиску на переміщення домішок:

$$P_{\text{зер}} = P_{\text{ПСК}} \cdot (1 + K_0 \cdot \zeta_{\text{в.д.}}), \quad (5.13)$$

де K_0 – коефіцієнт, що залежить від виду домішок, концентрації матеріалу, швидкості та стану повітряного потоку, розмірів повітропроводу і т.д. [115];

$\zeta_{\text{в.д.}}$ – коефіцієнт виносу легких домішок, який визначається як відношення маси легких домішок, що переміщуються, до маси повітря за одиницю часу;

8.2.3. Визначення втрат опору жалюзійної стінки:

$$P_{\text{жс}} = \xi_{\text{жс}} \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho_n \cdot \frac{V_n^2}{2}, \quad (5.14)$$

де $\xi_{\text{жс}}$ – коефіцієнт опору жалюзійної стінки;

Знайдені витрати повітря та втрати тиску у пневмосистемі сепаратора дозволяють вибрати за характерною номограмою [116, 29, 117] тип та серію вентилятора, який забезпечить необхідні режими роботи.

5.2. Виробничі випробування пневмосепаратора та визначення економічного ефекту від його застосування

З метою визначення ефективності запропонованого пневмосепаратора для багаторівневого введення зернового матеріалу, з урахуванням проведених експериментальних досліджень розроблений та виготовлений дослідний зразок живильного пристрою, який встановлений на серійні зерноочисні машини: А1-БМС-6, ЗСМ-20 та «РЕТКУС К 531 GIGANT».

Використовуючи результати досліджень, розроблено технічну документацію на виготовлення дослідного зразка живильного пристрою пневмосепаратора для багаторівневого введення зерна і передано на виробництво до ПП «Савицький М.І.» (м. Кропивницький) та впроваджено у навчальний процес на кафедрі сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ як лабораторну установку.

Проведено попередні випробування пневмосепаратора в господарстві ТОВ «Тіньки», Чигиринського району, Черкаської області в 2015 р., в господарстві ФГ «ЛПК» с. Нова Прага Олександрійського району, Кіровоградської області в 2015-2016 рр., та в ДП «ДГ «Ставидлянське» Кіровоградської державної дослідної станції Національної академії аграрних наук України» в 2016 р. (Додаток 3).

Для визначення техніко-економічних показників дослідного зразка пневмосепаратора, згідно представлених даних (табл. 5.1), користувалися методикою [118, 119]. Розрахунки проводили за допомогою пакету прикладної програми «Mathcad 15» [125] (Додаток Е).

Таблиця 5.1.

Техніко-економічні показники машин, що порівнюються

№ п.п.	Показники	Одиниця виміру	А1-БМС-6	Дослідна
1	2	3	4	5
1	Маса машини	кг	965	978
2	Маса покупних виробів	кг	325	312
3	Ціна машини	грн.	92650	123912

Продовження табл.5.1

4	Собівартість машини	грн.	58900	59583
5	Вартість покупних виробів	грн.	26100	25450
6	Продуктивність	т/год	25	32
7	Потужність електродвигуна	кВт	3,5	3,5
8	Коефіцієнт використання часу зміни: робочого експлуатаційного	—	0,82 0,76	0,83 0,78
9	Кількість обслуговуючого персоналу	чол.	1	1

Результати розрахунків показали наступне – підрахований економічний ефект станом на 07.03.2017 р. складає:

- для споживача машини – 20477 грн;
- для виробника машини – 27942 грн. з кожної машини при виробництві 50 шт. за рік.

Висновки по розділу

Розроблено методику і алгоритм інженерного розрахунку раціональних конструктивно-технологічних параметрів пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу.

Запропоновану методику інженерного розрахунку можна використовувати як при створення нових, так і для ефективного вдосконалення існуючих пневмосистем ЗОМ з вертикальними ПСК.

В результаті виробничих випробувань дослідних зразків ПСК з багаторівневим введенням зернового матеріалу визначено, що застосування живильного пристрою в дослідних сепараторах дозволяє підвищити якість очищення зерна на 14...22%.

Розрахований економічний ефект споживача при застосуванні вдосконаленого ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу станом на 07.03.2017 р. складає 20477 грн. на одну машину в рік.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі огляду та аналізу сучасних результатів досліджень пневмосепарації, конструкцій технічних засобів та живильних пристроїв ПСК визначено, що величина їх питомої продуктивності обмежена при забезпеченні відповідної якості очищення. Перспективи подальшого підвищення якості пневмосепарації пов'язано з пошуком нових принципів обробки зерна повітряним потоком, зокрема, на основі багаторівневого введення зернового матеріалу.

2. Для забезпечення раціональної швидкості введення зернового матеріалу в ПСК $v_e = 0,5 \dots 0,6$ м/с., параметри напрямних гравітаційних кривих живильного пристрою повинні мати наступні значення: довжина розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, кут її нахилу $\alpha = 33^\circ$, радіус дуги криволінійної ділянки $r = 0,15$ м.

3. Виділення домішок в осадову камеру залежить від часу та швидкості їх проходження через зернові шари, що змінюються залежно від кута контакту домішок з зерном та місця встановлення верхньої точки жалюзійної стінки. Так, при шестирівневому введенні з розміщенням зернових частинок за напрямком руху в ПСК з проміжком, рівним їх двом радіусам, місце встановлення верхньої точки жалюзійної стінки повинно знаходитись на висоті $h_{ж.в.} = 0,05 \dots 0,055$ м відносно І-го рівня введення.

4. Збільшення відстані між зерновими частинками понад два радіуса в горизонтальному напрямку сприяє підвищенню якості розділення матеріалу, але при цьому зменшується його продуктивність. При шестирівневому введенні з максимальною щільністю розташування зерна в ПСК ($f_p = 1$) повнота розділення становить $\varepsilon = 66,5\%$.

5. Застосування багаторівневого введення зернового матеріалу дозволяє суттєво вирівняти поле швидкостей в робочій зоні ПСК та наблизити середню швидкість повітряного потоку V_n до швидкості витання основного зерна $V_{в.з.}$, раціональне значення якої становить $V_n = 7,5 \dots 8$ м/с.

При цьому для забезпечення мінімальних втрат зерна в відходах $z \leq 2\%$, значення глибини каналу повинно бути в межах $C = 100 \dots 110$ мм, а раціональне значення міжрівневої відстані для питомих навантажень $q_{bi} = 250 \dots 350$ кг/дм·год знаходиться в межах $h_{m.p.} = 30 \dots 40$ мм.

6. Кількість рівнів n і питома подача на рівень живильного пристрою q_{bi} є взаємозалежними факторами. Для їх раціонального вибору необхідно виходити з умови: $q_B \rightarrow \max$ при $\varepsilon \rightarrow \text{opt}$, $n \rightarrow \text{opt}$. При цьому:

- для попереднього очищення ($\varepsilon \geq 50\%$) доцільно встановлювати $q_{bi} = 350$ кг/дм·год. ($q_B = 2100$ кг/дм·год) з кількістю задіяних рівнів $n = 6$;
- для первинного очищення ($\varepsilon \geq 60\%$) найбільш раціональним є шестирівневе введення при $q_{bi} = 300$ кг/дм·год ($q_B = 1800$ кг/дм·год);
- для вторинного очищення ($\varepsilon \geq 70\%$) доцільно застосовувати п'ятирівневе введення при $q_{bi} = 350$ кг/дм·год ($q_B = 1750$ кг/дм·год);
- для високоякісного очищення ($\varepsilon \geq 80\%$) найбільш раціональним є застосування чотирьох рівнів при $q_{bi} = 300$ кг/дм·год ($q_B = 1200$ кг/дм·год).

7. Використання багаторівневого способу введення зернового матеріалу порівняно з традиційним дає можливість збільшити якість пневмосепарації зерна в ПСК на $14 \dots 22\%$.

8. Підвищення вологості та засміченості зернового матеріалу призводить до зниження якості пневмосепарації. Але, застосування багаторівневого введення дозволяє отримати підвищення повноти розділення зернового матеріалу на $13 \dots 16\%$ (при вологості $W = 20\%$) та на $12 \dots 18\%$ (при засміченості $\tau = 40\%$) в порівнянні з традиційним способом введення.

9. Очікуваний економічний ефект споживача від застосування вдосконаленого пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу в машині А1-БМС-6 станом на 07.03.2017 р. складає 20477 грн. в рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Материнська О.А. Виробництво та експорт зерна в Україні. / О. А. Материнська // Економіка АПК. 2013. № 10. С. 49-53.
2. Гуржій Н. М. Світовий ринок зернових: тенденції та перспективи / Н. М. Гуржій, А. С. Свєрчкова // Сталій розвиток економіки. 2013. № 4. С. 303-307.
3. Злочевский В.Л. Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов: дис. ... докт. техн. наук. Барнаул, 1985, 490 с.
4. Нестеренко О.В. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / О.В Нестеренко, О.М Васильковський, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко, Д.В. Богатирьов // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград: КНТУ, 2012. Вип. 25; Ч.1. С.49-53.
5. Васильковський М.І. Дослідження роботи пневмосепаруючого каналу на фізичній моделі / М.І. Васильковський О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, О.В. Нестеренко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград, 2006. Вип.17. С. 44–48.
6. Нестеренко А. Теоретическое обоснование качественных показателей процесса пневмосепарации для многоуровневого введения зерна / А. Нестеренко, С. Лещенко, Д. Петренко, Д. Богатырёв, О. Кислун. // MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture 2013. Vol.15. No.2. S. 93 – 98.
7. Nesterenko O.V. Analytical study of separation efficiency of grain in vertical pneumatic separating channel / 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.

8. Нестеренко О.В. Обґрунтування параметрів живильного пристрою для багаторівневого введення зернового матеріалу у вертикальний пневмосепаруючий канал / О.В. Нестеренко, Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.Я. Гончарова // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. Луцьк: ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2016. Вип. 34. С. 92–103.
9. Нестеренко О.В. Дослідження безконтактного руху легких домішок у вертикальному пневмосепаруючому каналі / О. В. Нестеренко, Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.Я. Гончарова, Ю.В. Мельник // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 46. С. 271 – 279.
10. Нестеренко О.В. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введенні зерна / 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.
11. 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. : ред.-вид. відділ ЛНТУ. Луцьк, 2015. Вип. 32. С. 143–151.
12. Нестеренко О.В. Дослідження якісних показників роботи пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зерна // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2013. С. 135–137.
13. Нестеренко О.В. Аналіз руху зернової частки в повітряному потоці // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 108–110.

14. Нестеренко О.В. Дослідження якісних показників пневмосепарації при багаторівневому введенні зерна // Тези V всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційні технології в АПК». Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 84–86.
15. Нестеренко О.В. Дослідження основних параметрів направляючої поверхні живильного пристрою пневмосепаратора // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Крамаровські читання». К: НУБіП України, 2017. С. 129 – 131.
16. Безручкин И.П. Сепарация зерна воздушным потоком // Сельхозмашина. 1949. №5. С. 3–7.
17. Боцманов В.В. К расчёту вертикальных воздушных каналов в зерноочистительных машинах // Сельхозмашина. 1952. №9. С. 24-26.
18. Шкляр С.С., Хапанцев И.В. Исследование распределения зернового материала в аспирационном канале // Тр. / ВИСХОМ. М., 1973. С. 36-42.
19. Шкляр С.С. Исследование вертикального аспирационного канала прямоугольного сечения // Механизация и электрификация с.х. 1967. №1. С. 31-34.
20. Демский А.Д., Борискин М.А., Лесик Ю.А. Исследование пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов // Тр. ВНИЭКИ продмаш. 1970. №21. С. 49-54.
21. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарации на зернообрабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. С. 103-140.
22. Демский А.Г. Основные направления совершенствования пневмосепарирующего зерноочистительного оборудования / А.Г. Демский, В.Ф. Веденьев. М.: ЦНИИТЭИ легпищемаш., 1978. 73 с.
23. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.
24. Малис А.Я. Пневматический транспорт для сыпучих материалов при высоких скоростях. М.: Машиностроение, 1969. 183 с.

25. Нелюбов А.И., Ветров Е.Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1977. 196 с.
26. Веденьев В.Ф. Исследования процесса пневмосепарирования продуктов шелушения проса: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства». МТПП, 1972. 20 с.
27. Ямпилов С.С. Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. 262 с.
28. Ямпилов С.С. Сепараторы для предварительной очистки зерна // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1999. № 12. С. 17–21.
29. Ямпилов С. С. Технологии и технические средства для очистки зерна с использованием сил гравитации / С. С. Ямпилов, Ж. Б. Цыбенков. Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2006. 167 с.
30. Матвеев А.С. Сепарирование зерновой смеси вертикальным воздушным потоком. // Механизация и электрификация социалистического сел. хоз-ва. 1969. №11. С. 17-19.
31. Бабченко В.Д. Высокопроизводительные машины для очистки зерна / В.Д. Бабченко, А.М. Корн, А.С. Матвеев. М.: ВНИИТЭИСХ, 1982. 50 с.
32. Матвеев А.С. Исследование процесса сепарирования зерновой смеси вертикально-восходящим воздушным потоком: авторефер. дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. -29 с.
33. Матвеев А.С. Определение скорости семян. // Механизация и электрификация с. х. 1974. №9. С. 42-43.
34. Злочевский В.Л. Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов: дис. ... докт. техн. наук. Барнаул, 1985. 490 с.
35. Злочевский В.Л., Тейтельбаум А.Х. Теоретико-экспериментальное исследование вертикального пневмосепарационного процесса с развитой средней зоной сепарирования // Труды Алтайского политехн. ин-та им. И.И. Ползунова: Барнаул, 1975. Вып. 43. С. 110-123.

36. Злочевский В.Л. Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов. // Сибирский вестник с.-х. науки. 1984. №1. С. 73-79.
37. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов. / Под ред. З.Л. Тица. М.: Машиностроение, 1967. 447 с.
38. Бурков А.И., Сычугов Н.П. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание. Киров: НИИСХ Северо-Востока. 2000. 261 с.
39. Сычугов Н.П., Бурков А.И., Одинцов Н.И. Повышение производительности пневмосепарирующего канала машин для предварительной очистки зерна. // Тракторы и сельхозмашины. 1986. №2. С. 26-28.
40. Саитов В.Е. Повышение эффективности функционирования машин предварительной очистки зернового вороха совершенствованием основных рабочих элементов: дис.... канд. техн. наук. Киров, 1991. 168 с.
41. Петренко Н.Н. Исследование вращающегося воздушного канала для очистки зернового вороха: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.11. Кировоград, 1974. 120 с.
42. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Зернозбиральні машини. Харків : ОКО, 2004. Т.2; Ч. 2; Кн. 2. 404 с.
43. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна / Л.Н.Тищенко. Харьков: Основа. 2004. 224 с.
44. Тищенко Л.Н. Моделирование процессов зерновых сепараторов. Монография / Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, М.В. Пивень, С.О. Харченко, В. В. Бредихин, А. В. Мандрыка. – Харьков: «Міськдрук», 2010. – 360 с
45. Бакум М.В., Крекот М.М. Дослідження впливу основних параметрів пневматичного сепаратора на якість очищення насіння редиски // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. Луцьк: ЛНТУ, 2009. Вип. 18. С. 14-19.

46. Свірень М. О. Обґрунтування параметрів процесу підготовки посівного матеріалу / М. О. Свірень, М. В. Бакум, М. М. Крекот // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2012. Вип. 42(1). С. 128-133.
47. Котов Б. І. До теорії розділення зерна в повітряному потоці / 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.
48. Котов Б.І. Перспективи розвитку конструкцій зернонасі́ннеочисної техніки / Б.І. Котов, М.І. Волошин // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2001. Вип. 31. С. 110–111.
49. Котов Б.І. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів / Б.І. Котов, С.П. Степаненко, М.Г. Пастушенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2003. Вип. 33. С. 53-59.
50. Туров А.К. Пневмосепаратор зерна с предварительной подготовкой в плоско-параллельном воздушном поле // Сибирский вестник с.-х. науки. 1984. №2. С.86-90.
51. Туров А.К. Пневмосепарация зерна в вертикальном канале с подготовкой в струйном плоскопараллельном потоке: дис... канд. техн. наук. : 05.20.01. Новосибирск, 1984. 190 с.
52. Корнеев С.В. Интенсификация рабочего процесса зерноочистительной машины предварительной очистки путём фракционирования зернового материала: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Киров, 2002. 185 с.
53. Коваль В.Я., Єрмак В.П. Новий спосіб сепарування насінин у повітряних потоках. // Техніка в с.-г. машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. праць КДТУ. Кіровоград: КДТУ, 2005. Вип. 10. С.74-77.

54. Єрмак В.П. Обґрунтування способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.11 «Машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва» . Луганськ, 2003. 21 с.
55. Ковриков И.Т., Тавтилов И.Ш. Направления исследований и конструирования питателей для сепарирования зерна в вертикальном воздушном потоке. // Вестник ОГУ. 2003. №7. С. 198-201.
56. Ковриков И.Т. Обоснование конструктивных параметров устройств ввода зерна пневмосепараторов / И. Т. Ковриков, И. Ш. Тавтилов // Общероссийская конференция молодых ученых «Пищевые технологии». Казань: Издательство КГТУ, 2006. С. 58-59.
57. Тавтилов И.Ш. Совершенствование процесса работы пневмосепаратора за счет рациональной подачи зерновой смеси в воздушный поток: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.20.01 „Технологии и средства механизации сельского хозяйства”. Челябинск, 2008. 22 с.
58. Васильковський М.І., Васильковський А.М., Косинов М.М., Мороз С.М. К створенню нового покоління зерноочисних машин загального призначення // Вісник Харківського державного технічного університету сільськогосподарського. Харків: ХДТУСГ, 2003. Вип. 22. С. 28–32.
59. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Косинов М.М., Нестеренко О.В. Підвищення ефективності роботи пневмосепаруючих каналів зерноочисних машин // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2004. Вип. 34. С.84-88.
60. Васильковський О.М. Підвищення ефективності повітряного очищення зерна / О. М. Васильковський, Д. І. Петренко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2005. Вип. 35. С. 286–288.
61. Степаненко С. П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі / С. П. Степаненко //

- Механізація сільськогосподарського виробництва. Харків : ХНТУСГ, 2008. С. 59–65.
62. Петренко Д.І. Обґрунтування параметрів відцентрово-пневматичного сепаратора зерна: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Петренко Дмитро Іванович. Кіровоград, 2011. 157 с.
 63. Лещенко С.М. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючої системи інерційного прямооточного сепаратора зерна: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Сергій Миколайович Лещенко. Кіровоград, 2010. 192 с.
 64. Швидя В.О. Підвищення ефективності пневмовідцентрового сепаратора та обґрунтування параметрів робочих органів: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Швидя Віктор Олександрович. Глеваха, 2012. 163 с.
 65. Матвеев А.С. Изучение процесса взвешивания и сепарирования зернистого материала вертикально-восходящим воздушным потоком // Труды ВИМ. М., 1965. Т.37. С. 231–241.
 66. Матвеев А.С. Теоретический анализ разделения зерновой смеси восходящим потоком воздуха // Труды ВИМ. М., 1964. Т.36. С. 286–295
 67. Бушок Г.Ф., Є.Ф. Венгер. Курс фізики: Навч. посібник: У трьох книгах. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. К.: Вища школа, 2002. 375 с.
 68. Сыромятников Н.И., Волков В.Ф. Процессы в кипящем слое Свердловск: Metallurgizdat, 1959. 248 с.
 69. Малис А.Я. Исследование вертикальных воздушных каналов зерновых сепараторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1965. 21 с.
 70. Кубышев В.А. Пути интенсификации процессов послеуборочной обработки зерна.// Тр. / ЧИМЭСХ. Челябинск, 1974. Вып. 87. С. 6-13.
 71. Кубышев В.А. Технологические основы интенсификации процесса сепарации зерна. // Тр. / ЧИМЭСХ, Челябинск, 1969. Вып. 36. С. 102-129.
 72. Безручкин И.П. Исследование аэродинамических свойств зерен в вертикальном потоке / И.П. Безручкин // Сельскохозяйственная машина. 1936. № 3. С.16–22.

73. Безручкин И.П. Аэродинамические свойства зерна.// Тр. Московского дома учёных. Вып. 2. Сепарация сыпучих тел. М. – Л.: Изд. Акад. наук. 1937. С. 175-226.
74. Сычугов Н.П. Воздушные системы машин послеуборочной обработки зерна (технологические схемы, теория, расчет): дис. ... доктора техн. наук : 05.20.01. Ленинград–Пушкин, 1987. 293 с.
75. Бурков А.И. Изыскание и исследование рабочего процесса замкнутой пневмосистемы семяочистительной машины: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01. Киров, 1991. 217 с.
76. Лещенко С.М. Теоретичний аналіз розділення зернових сумішей багатоструменевим ділильником перед введенням матеріалу в зону пневмосепарації / В.І. Носуленко, С.М. Лещенко, В.В. Гончаров, [та ін.] // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2008. Вип. 38. С. 52–59.
77. Ковриков И.Т. Оптимизация конструкций устройств для ввода зерна в воздушных сепараторах / И. Т. Ковриков, И. Ш. Тавтилов // Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития пищевой промышленности России». Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005. С.18-21.
78. Перцовский Е.С. К теории очистки зерна в пневматическом сепараторе // Труды ВНИИЗ. 1970. Вып. 68. С. 55-86.
79. Перцовский В.С. Основы теории очистки зерна в пневматическом сепараторе // Тр. ВНИИЗ. М., 1974. Вып. 78. С. 105 - 118
80. Хамуев В.Г. Интенсивность выделения легкой примеси в вертикально восходящем воздушном потоке // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. №5. С. 12-16.
81. Кожуховский И.Э. Зерноочистительные машины. М.: Машиностроение, 1965. 220 с.

82. Матвеев А.С. К выбору формы сечения пневмосепарирующего канала // Тракторы и сельхозмашины. 1971. №9. С. 26-28.
83. А.с. 969335 СССР, МКИ В 07В4/02. Устройство для разделения зерновой смеси воздушным потоком/ Сычугов Н.П., Бурков А.И., Одинцов Н.И (СССР). №3232716/29-03; Заяв. 06.01.81; опубл. 30.10.82, Бюл. №40. 4с.
84. Аристов С.А., Косилов Н.И: Исследование характера разгона компонентов в ленточных питателях пневмоинерционных сепараторов.// Труды ЧИМЭСХ. Челябинск, 1981. Вып. 168. С. 18-20.
85. Методы Монте-Карло в статистической физике. – М.: Мир, 1982. – 400 с.
86. Ковриков И.Т. Оптимизация конструкций устройств для ввода зерна в воздушных сепараторах / И. Т. Ковриков, И. Ш. Тавтилов // Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития пищевой промышленности России». Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005. С.18-21.
87. А.с. 1542636 СССР, МКИ5 В07В 4/00. Пневмосепаратор / Н.П. Сычугов, Ю.П. Полунин, Н.И. Грабельковский, А.И. Бурков, В.Е. Саитов (СССР). № 4300013/29-03; заявл. 24.08.88; опубл. 15.02.90, Бюл. № 6. 3 с.
88. Пат. 18241 Рос. Федерация, МПК7 В07В 4/00. Пневмосепаратор / Саитов В.Е.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. № 2000131140/20; заявл. 13.12.00; опубл. 10.06.01. Бюл. № 16. 1 с.
89. Пат. 2153401 Рос. Федерация, МПК7 В07В 4/02, В07В 11/06. Пневмосепаратор / Болотов А.К., Саитов В.Е., Гатауллин Р.Г. ; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. № 99111010/03; заявл. 25.05.99; опубл. 27.07.2000, Бюл. № 21. 4 с.
90. Проспект фирмы «Petkus». Машины предварительной и интенсивной очистки К-527, К-526, К-560.
91. Пат. 2223829 Рос. Федерация, МПК7 В07В 11/06, В07В 4/02. Пневматический сепаратор / Саитов В.Е., Бурков А.И., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2002108084/03; заявл. 29.03.02; опубл. 20.02.04, Бюл. № 5. 5 с.

92. А.с. СССР №1165496, МКИ В 07 В 4/00. Пневмосепаратор / Корн А.М., Матвеев А.С., Зюлин А.С., Иванов Д.Л., Кремнев А.Н., Гехтман А.А., Хазанова Т.Д., Панкратов Н.К. №3616436/29-03 ; Заявл. 30.06.83; Опубл. 07.07.1985, Бюл. №25
93. Сабашкин В.А. Разделение зернового вороха в струйном воздушном потоке // Интенсификация процессов послеуборочной обработки зерна: ВАСХНИЛ. Сиб. отд. Новосибирск, 1985. С. 101-106.
94. Мякин В.Н., Урюпин С.Г. Совершенствование пневматических сепараторов семян // Техника в сельском хозяйстве. 2000. №4. С. 40-42.
95. Пат. 9586А Україна, МПК В 02 В 1/00. Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна). № а200500209; Заявл. 10.01.05; Опубл. 17.10.2005. Бюл. №10.
96. Пат. 9042 Україна, МПК В 02 В 1/00. Повітряний сепаратор. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В., Косінов М.М. (Україна). № 20041008509; Заявл. 19.10.2004; Опубл. 15.09.2005. Бюл. №9.
97. Пат. 8058А Україна, МПК В 02В1/00. Повітряний сепаратор. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна).- № u200500190; Заявл. 10.01.05; Опубл. 15.07.2005. Бюл. №7.
98. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев, 1960. 286 с.
99. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики: Навч. посібник: У трьох книгах. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. К.: Вища школа, 2002. 375 с.
100. Гладков Н.Г. Зерноочистительные машины. Конструкция, расчет, проектирование, эксплуатация: Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машгиз, 1961. 367 с.

101. ДСТУ ГОСТ 29144:2009 (ИСО 711-85) Зерно і зернопродукти. Визначання вологості (базовий контрольний метод) (ГОСТ 29144-91) (ИСО 711-85), IDT).
102. ДСТУ 4233:2003 (ISO7971-1:1986, MOD) Зернові культури. Визначення об'ємної щільності, так званої «маси на гектолітр». Частина 1. Контрольний метод.
103. Нестеренко О.В. До методики визначення швидкості введення зерна в пневмосепараційний канал. / Сабірзянов Т.Г., Васильковський М.І. Нестеренко О.В. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград: КНТУ, 2008. Вип. 21. С.263-267.
104. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рощин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1972. 186 с.
105. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М. : Наука, 1971. 312 с.
106. П'ятницька-Позднякова І.С. Основи наукових досліджень у вищій школі: Навч. Посібник. К.: Центр навчальної літератури, 2003. 116 с.
107. Основы научных исследований: Учебное пособие для студентов и магистров высших аграрных вузов III – IV уровней аккредитации по спец. 7.091902 «Механизация сельского хозяйства» / Л.Ф. Бабицкий, В.М. Булгаков, Д.Г. Войтюк и др. Киев: изд-во НАУ, 1999. 228 с.
108. Петренко М.М. Основи наукових досліджень в сільськогосподарському машинобудуванні. Кіровоград: Кіровоградське державне видавництво, 1997. 148 с.
109. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. М.: Горячая линия - Телеком, 2013. 288 с.
110. ДСТУ 3355-96 Продукція сільськогосподарська рослинна. Методи відбору проб у процесі карантинного огляду та експертизи.
111. Аэров О.М., Тодес М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 512 с.
112. Машина предварительной очистки МПО-50С. Каталог продукции ОАО

- Головное специализированное конструкторское бюро (ГСКБ) "ЗЕРНООЧИСТКА". URL : <http://zernoochistka.ru>.
113. Корн А.М., Матвеев А.С., Олейников В.Д., Грабельковский Н.И. Аэродинамика пневмосистемы семеочистительной машины. // Тракторы и сельхозмашины. № 2. 1969. С. 26-27.
 114. Шкляр С.С. Сопротивление аспирационного канала воздушному потоку. // Тракторы и сельхозмашины. № 2. 1970. С. 35 – 37.
 115. Боуманс Г. Эффективная обработка и хранение зерна / Г. Боуманс ; [пер. с англ. В. И. Дашевского]. – М. : Агропромиздат, 1991. – 608 с.
 116. Гриднева Г. А. Разработка и исследование аэродинамической схемы диаметрального вентилятора для зерноочистительных машин с замкнутым циклом воздушного потока : автореф. дисс. на соискание науч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.20.01 „Технологии и средства механизации сельского хозяйства” / Г. А. Гриднева. – Л., 1971. – 23 с.
 117. Соломахова Т. С. Центробежные вентиляторы : аэродинамические схемы и характеристики / Т. С. Соломахова, К. В. Чебышева. – М. : Машиностроение, 1980. – 176 с.
 118. Методичні вказівки для виконання курсової роботи по організації та плануванню виробництва і економічних розрахунків у дипломних проектах / Укл. В. М. Глух, Л. М. Романюк. – Кіровоград : КДТУ, 1996. – 36 с.
 119. Расчеты экономической эффективности новой техники : справочник / [Под общей ред. К. Н. Великанова]. – М. : Машиностроение, 1990 – 710 с.
 120. Panasiewicz M., Zawislak K., Kusińska E., Sobczak P. Purification and separation of loose materiale In pneumatic system with vertical air stream. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln., 2008. Vol. 8, P.171-176.
 121. Lukaszuk J., Molenda M., Horabik J., Szot B., Montross M.D. Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. Research in Agricultural Engineering. 2008. Vol.54, P.50-57.
 122. Kroulík M., Hůla J., Rybka A., Honzík I. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. Research in Agricultural

- Engineering. 2016. Vol.62, P.56-63.
123. Gorial B.Y. Aerodynamic Properties of Grain /Straw Materials / B.Y. Gorial, J.R. Ocallaghan // Journal of agricultural Engineers Research. 1990. Vol. 46. №1. P. 275-290.
 124. Wessel I. Vergleichende Untersuchungen Schwerkraftsichtern. // Grundlagen der Landtechnik. 1963. H.18. S. 27-25.
 125. Mathcad 15 User's Guide [Электронный ресурс] / Mathsoft Engineering & Education, Inc. USA, Cambridge, September 2005
URL: <http://www.mathcad.com/resources>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Моделювання руху зернової частки по направляючій поверхні живильного пристрою

$$Lp := 0.2 \quad g := 9.8 \quad v0 := 0.05 \quad r := 0.15 \quad f := 0.42$$

$$F(\phi, \alpha) := \begin{cases} \left[2 \cdot g \cdot \left(Lp - r \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \phi\right) \right) \cdot (\sin(\alpha) - f \cdot \cos(\alpha)) + v0^2 \right]^{\frac{1}{2}} & \text{if } \phi \leq \frac{\pi}{2} - \alpha \\ \left[2 \cdot g \cdot Lp \cdot (\sin(\alpha) - f \cdot \cos(\alpha)) + v0^2 \right] \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \left(\phi + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)} + \frac{2 \cdot g \cdot r}{1 + 4 \cdot f^2} \cdot \left[3f \cdot \cos(\phi) + \right. \\ \left. + (1 - 2 \cdot f^2) \cdot \sin(\phi) - [3f \cdot \sin(\alpha) + (1 - 2 \cdot f^2) \cdot \cos(\alpha)] \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \left(\phi + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} & \text{if } \phi > \frac{\pi}{2} - \alpha \end{cases}$$

$$\alpha0 := 30 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \phi0 := \frac{\pi}{2} - \alpha0 - \operatorname{atan}\left(\frac{Lp}{r}\right)$$

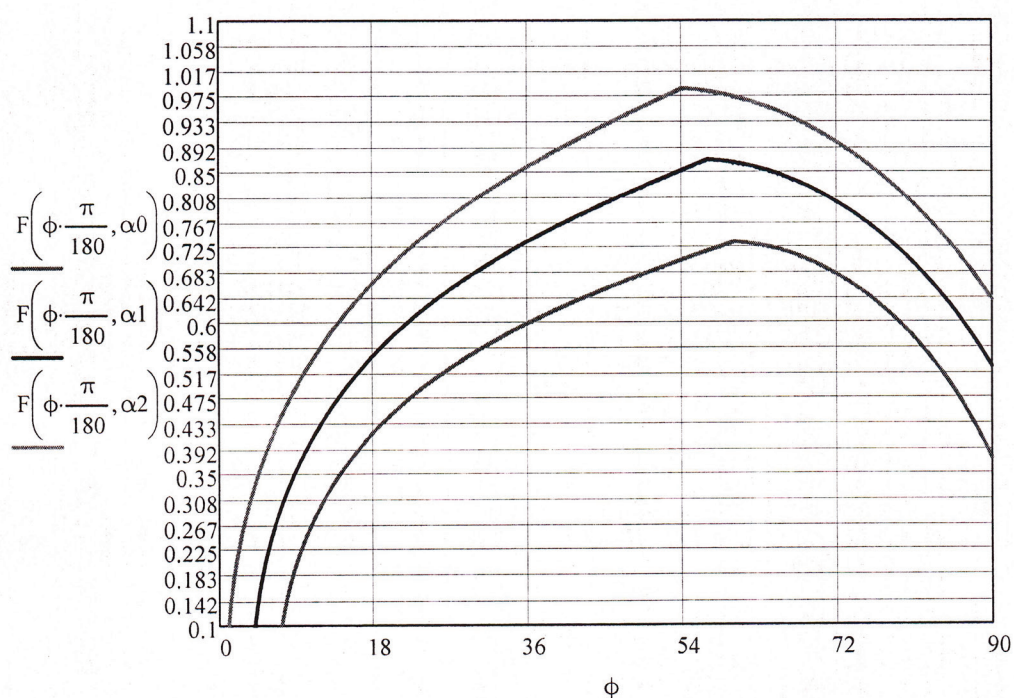
$$\phi0 \cdot \frac{180}{\pi} = 6.87$$

$$\alpha1 := 33 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \phi01 := \frac{\pi}{2} - \alpha1 - \operatorname{atan}\left(\frac{Lp}{r}\right)$$

$$\phi01 \cdot \frac{180}{\pi} = 3.87$$

$$\alpha2 := 36 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \phi02 := \frac{\pi}{2} - \alpha2 - \operatorname{atan}\left(\frac{Lp}{r}\right)$$

$$\phi02 \cdot \frac{180}{\pi} = 0.87$$

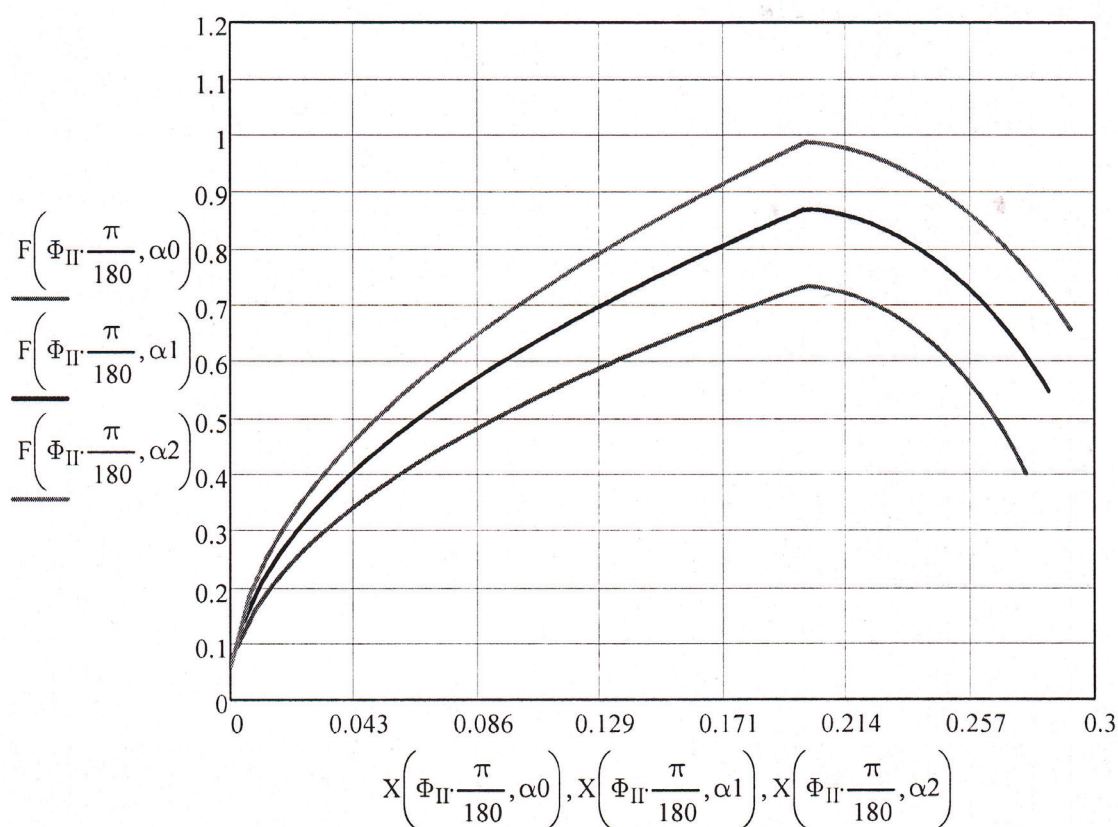


Залежність швидкості від пройденого шляху

$$X(\phi, \alpha) := \begin{cases} \phi_0 \leftarrow \frac{\pi}{2} - \alpha - \operatorname{atan}\left(\frac{Lp}{r}\right) \\ 0 & \text{if } \phi \leq \phi_0 \\ \sqrt{Lp^2 + r^2} \cdot \frac{\sin(\phi - \phi_0)}{\sin(\phi + \alpha)} & \text{if } \phi_0 < \phi \leq \frac{\pi}{2} - \alpha \\ Lp + r \cdot \left(\phi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) & \text{if } \phi > \frac{\pi}{2} - \alpha \end{cases}$$

$$\Pi := 1..100$$

$$\Phi_{\Pi} := \frac{90}{100} \cdot (\Pi - 1)$$



ДОДАТОК Б

Траєкторії руху зернових фракцій

Початкові дані

$$V_0 := 0.5$$

$$V_{\Pi} := 8$$

$$k := 0.075$$

$$t := 0, 0.001.. 0.3$$

$$V_{B3} := 11.4$$

$$\alpha := 0 \text{ deg}$$

$$V_y := V_0 \cdot \sin(\alpha)$$

$$V_x := V_0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$x(t) := \frac{V_x}{V_{\Pi} \cdot k} \cdot (1 - e^{-V_{\Pi} \cdot k \cdot t})$$

$$y(t) := k \cdot [(V_{\Pi})^2 - (V_{B3})^2] \cdot \frac{t^2}{2} + V_y \cdot t$$

$$V_y = 0$$

$$V_x = 0.5$$

$$k_1 := 0.12$$

$$t := 0, 0.001.. 0.3$$

$$V_{B31} := 9$$

$$\underline{\underline{V_y}} := V_0 \cdot \sin(\alpha)$$

$$\underline{\underline{V_x}} := V_0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$x_1(t) := \frac{V_x}{V_{\Pi} \cdot k_1} \cdot (1 - e^{-V_{\Pi} \cdot k_1 \cdot t})$$

$$y_1(t) := k \cdot [(V_{\Pi})^2 - (V_{B31})^2] \cdot \frac{t^2}{2} + V_y \cdot t$$

$$V_y = 0$$

$$V_x = 0.5$$

$$k_2 := 0.11$$

$$t := 0, 0.001.. 0.3$$

$$V_{B32} := 9.4$$

$$\underline{\underline{V_y}} := V_0 \cdot \sin(\alpha)$$

$$\underline{\underline{V_x}} := V_0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$x_2(t) := \frac{V_x}{V_{\Pi} \cdot k_2} \cdot (1 - e^{-V_{\Pi} \cdot k_2 \cdot t})$$

$$y_2(t) := k \cdot [(V_{\Pi})^2 - (V_{B32})^2] \cdot \frac{t^2}{2} + V_y \cdot t$$

$$V_y = 0$$

$$V_x = 0.5$$

$$k_3 := 0.14$$

$$t := 0, 0.001.. 0.3$$

$$V_{B33} := 8.4$$

$$\underline{\underline{V_y}} := V_0 \cdot \sin(\alpha)$$

$$\underline{\underline{V_x}} := V_0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$x_3(t) := \frac{V_x}{V_{\Pi} \cdot k_3} \cdot (1 - e^{-V_{\Pi} \cdot k_3 \cdot t})$$

$$y_3(t) := k \cdot [(V_{\Pi})^2 - (V_{B33})^2] \cdot \frac{t^2}{2} + V_y \cdot t$$

$$V_y = 0$$

$$V_x = 0.5$$

$$k4 := 0.125$$

$$t := 0, 0.001 \dots 0.3$$

$$VB34 := 8.8$$

$$\underline{V_y} := V0 \cdot \sin(\alpha) \quad \underline{V_x} := V0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$x4(t) := \frac{V_x}{V \pi \cdot k4} \cdot \left(1 - e^{-V \pi \cdot k4 \cdot t}\right)$$

$$y4(t) := k \cdot \left[(V \pi)^2 - (VB34)^2 \right] \cdot \frac{t^2}{2} + V_y \cdot t$$

$$V_y = 0$$

$$V_x = 0.5$$

$$k5 := 0.55$$

$$t := 0, 0.001 \dots 0.5$$

$$VB35 := 4.2$$

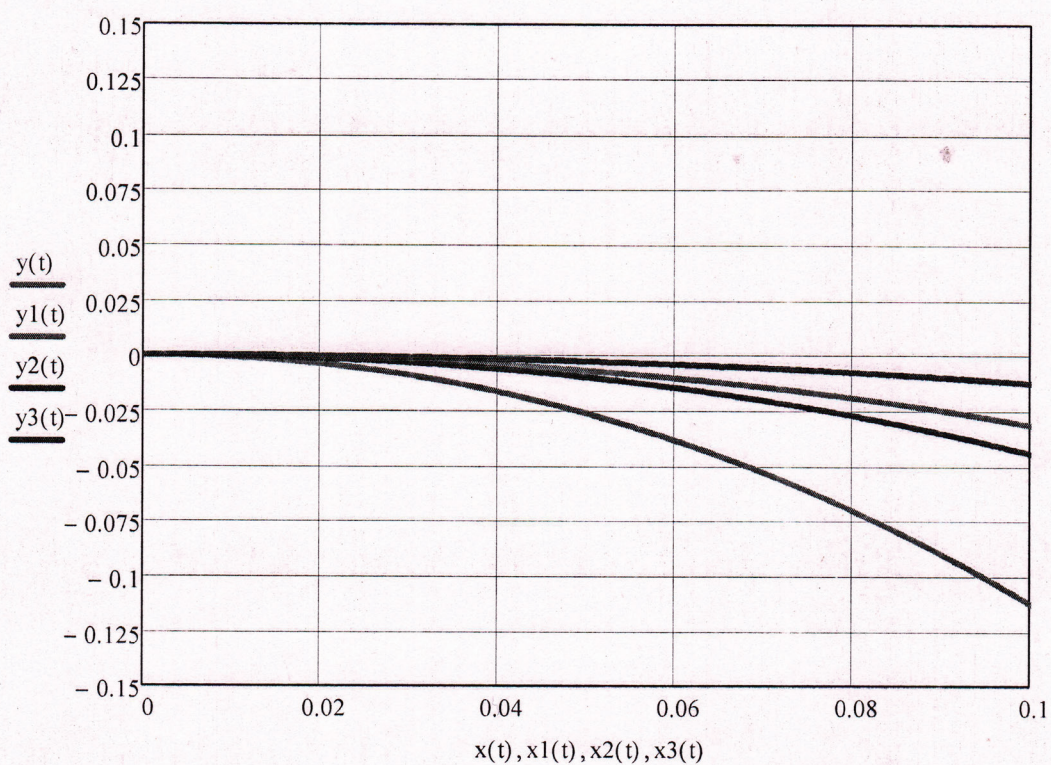
$$\underline{V_y} := V0 \cdot \sin(\alpha) \quad \underline{V_x} := V0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$x5(t) := \frac{V_x}{V \pi \cdot k5} \cdot \left(1 - e^{-V \pi \cdot k5 \cdot t}\right)$$

$$y5(t) := k \cdot \left[(V \pi)^2 - (VB35)^2 \right] \cdot \frac{t^2}{2} + V_y \cdot t$$

$$V_y = 0$$

$$V_x = 0.5$$



ДОДАТОК В

Траєкторії безконтактного руху легких часток в ПСК

$$V_{\Pi} := 8 \quad k := 2 \quad g := 9.81$$

$$V_{ВД} := \sqrt{\frac{g}{k}} \quad V_{ВД} = 2.215 \quad t := (0, 0.001..3)$$

$$V_{0Y} := 0 \quad e = 2.718$$

$$V_{x0} := 0.5 \quad x_0 := 0$$

$$x(t) := x_0 - \ln \left[\frac{e^{\sqrt{g \cdot k \cdot t} + \frac{(V_{ВД} - V_{\Pi} + V_{0Y})}{(V_{ВД} + V_{\Pi} - V_{0Y})}}}{e^{\sqrt{g \cdot k \cdot t} - \frac{(V_{ВД} - V_{\Pi} + V_{0Y})}{(V_{ВД} + V_{\Pi} - V_{0Y})}}} \right] - \ln \left[\frac{V_{ВД} + \sqrt{V_{ВД}^2 - (V_{\Pi} - V_{0Y})^2}}{V_{\Pi} - V_{0Y}} \right] \cdot \frac{V_{x0}}{k \cdot \sqrt{V_{ВД}^2 - (V_{\Pi} - V_{0Y})^2}}$$

$$y(t) := (V_{\Pi} - V_{ВД}) \cdot t - \frac{1}{k} \cdot \left(\ln \left(1 + \frac{V_{ВД} - V_{\Pi} + V_{0Y}}{V_{ВД} + V_{\Pi} - V_{0Y}} \cdot e^{-2\sqrt{g \cdot k \cdot t}} \right) - \ln \left(\frac{2 \cdot V_{ВД}}{V_{ВД} + V_{\Pi} - V_{0Y}} \right) \right)$$

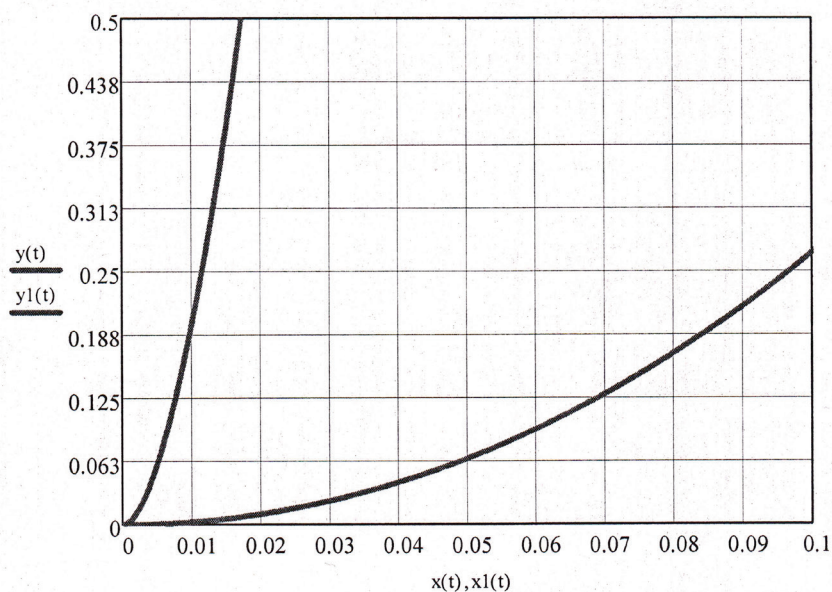
$$\tilde{x}(t) := x_0 - \left(\operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{V_{ВД} - V_{\Pi} + V_{0Y}}{V_{ВД} + V_{\Pi} - V_{0Y}}} \cdot e^{-\sqrt{g \cdot k \cdot t}} \right) - \operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{V_{\Pi} - V_{0Y} - V_{ВД}}{V_{\Pi} - V_{0Y} + V_{ВД}}} \right) \right) \cdot \frac{2 \cdot V_{x0}}{k \cdot \sqrt{(V_{\Pi} - V_{0Y})^2 - V_{ВД}^2}}$$

$$k_1 := 0.27 \quad V_{ВД1} := \sqrt{\frac{g}{k_1}}$$

$$V_{ВД1} = 6.028$$

$$y_1(t) := (V_{\Pi} - V_{ВД1}) \cdot t - \frac{1}{k_1} \cdot \left(\ln \left(1 + \frac{V_{ВД1} - V_{\Pi} + V_{0Y}}{V_{ВД1} + V_{\Pi} - V_{0Y}} \cdot e^{-2\sqrt{g \cdot k_1 \cdot t}} \right) - \ln \left(\frac{2 \cdot V_{ВД1}}{V_{ВД1} + V_{\Pi} - V_{0Y}} \right) \right)$$

$$x_1(t) := x_0 - \left(\operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{V_{ВД1} - V_{\Pi} + V_{0Y}}{V_{ВД1} + V_{\Pi} - V_{0Y}}} \cdot e^{-\sqrt{g \cdot k_1 \cdot t}} \right) - \operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{V_{\Pi} - V_{0Y} - V_{ВД1}}{V_{\Pi} - V_{0Y} + V_{ВД1}}} \right) \right) \cdot \frac{2 \cdot V_{x0}}{k_1 \cdot \sqrt{(V_{\Pi} - V_{0Y})^2 - V_{ВД1}^2}}$$



ДОДАТОК Г

Моделювання контактного руху легких часток в ПСК та визначення якісних показників сепарації при багаторівневому введенні зернового матеріалу

Початкові дані

$k_p := 0.267$	-- коефіцієнт парусності
$V_{\infty} := 8$	-- швидкість повітряного потоку
$g := 9.81$	-- прискорення земного тяжіння
$L_{\infty} := 0.11$	-- глибина каналу
$f_z := 0.4$	-- коефіцієнт тертя домішок по зерну
$R_{\infty} := 0.004$	-- радіус зерна
$dx_0 := 0.6$	-- швидкість введення зерна в ПСК
$h := 0.03$	-- відстань між рівнями
$\gamma := 760$	-- питома маса зерна
$z := 6$	-- кількість задіяних рівнів
$B := 0.1$	-- ширина ПСК
$k_{roz} := 1$	-- коефіцієнт розрідженості потоку (відстань між сусідніми зернами в шарі рівна $D \cdot k_{roz}$), він може приймати значення від 1 до нескінченності.

$$D := 2 \cdot R$$

$$roz := D \cdot k_{roz}$$

Продуктивність ПСК при багаторівневому введенні зерна:

Час перельоту зерна через канал

$$Q_{psk} := \left(\frac{\pi}{6} \right) \cdot (B \cdot dx_0 \cdot R \cdot z \cdot \gamma) \cdot 3600 \cdot \frac{2}{1 + k_{roz}}$$

$$TL := \frac{-1}{k_p} \cdot \ln \left(1 - \frac{L \cdot k_p}{dx_0} \right)$$

$$TL = 0.18797$$

$$Q_{psk} = 2.0629 \times 10^3$$

питоме навантаження на і-тий рівень живильного пристрою

$$q_{bi} := \frac{Q_{psk}}{z}$$

$$q_{bi} = 343.8159$$

$$dy_0 := 0$$

$$y_0 := 0$$

$$dt := 0.00001$$

$$X(t) := dx_0 \cdot t$$

$$Skp := \sqrt{\frac{g}{k_p}}$$

Вільний вертикальний політ

$$C1(Dy_0) := \begin{cases} x_2 \leftarrow Dy_0 - V \\ X \leftarrow \ln \left(\frac{x_2 + Skp}{x_2 - Skp} \right) \end{cases}$$

$$C2(Dy_0, C1D) := y_0 - \frac{1}{2 \cdot k_p} \cdot C1D + \frac{1}{k_p} \cdot \ln(1 - e^{C1D})$$

$$FY(t, Dy_0) := \begin{cases} C1D \leftarrow C1(Dy_0) \\ X \leftarrow (V - Skp) \cdot t + \frac{1}{2 \cdot k_p} \cdot C1D - \frac{1}{k_p} \cdot \ln \left(e^{-2 \cdot \sqrt{g \cdot k_p} \cdot k_p \cdot t + C1D} - 1 \right) + C2(Dy_0, C1D) \end{cases}$$

Час вільного вертикального польоту

$$DY(t, Dy_0) := \begin{cases} EC1 \leftarrow e^{-2 \cdot Skp \cdot k_p \cdot t + C1(Dy_0)} \\ X \leftarrow -Skp \cdot \frac{(1 + EC1)}{(1 - EC1)} + V \end{cases}$$

$$N := 99$$

$$I := 1 \dots N$$

$$\Delta l_I := I \cdot \frac{R}{N}$$

$$H_I := h - \sqrt{R^2 - (\Delta l_I)^2}$$

Rpz($\alpha_0, d\alpha_0$) := "рух домішок по зерну."

$$\alpha_{z_1} \leftarrow \alpha_0$$

$$d\alpha_{z_1} \leftarrow d\alpha_0$$

for $j \in 1 \dots 100000$

break if $\alpha_{z_j} \geq \frac{\pi}{2}$

$$dd\alpha_{z_{j+1}} \leftarrow \left[kp \cdot R \cdot \left(\frac{V}{R} - d\alpha_{z_j} \right)^2 - \frac{g}{R} \right] \cdot \sin(\alpha_{z_j})$$

$$d\alpha_{z_{j+1}} \leftarrow d\alpha_{z_j} + dd\alpha_{z_{j+1}} \cdot dt$$

$$\alpha_{z_{j+1}} \leftarrow \alpha_{z_j} + d\alpha_{z_{j+1}} \cdot dt$$

$$V_{z_{j+1}} \leftarrow d\alpha_{z_{j+1}} \cdot R$$

(V_{z_j})

$$Fh(t, Dy_0, HI) := FY(t, Dy_0) - HI$$

$$tl_I := \text{root}\left(Fh(t, dy_0, H_I), t, 0, 2\right)$$

$$N = 99$$

$$DY1_I := DY(tl_I, dy_0)$$

DY1 =

	1
1	0.12772
2	0.12772
3	0.12773
4	0.12774
5	0.12774
6	0.12775
7	0.12777
8	0.12778
9	0.1278
10	0.12782
11	0.12784
12	0.12786
13	0.12788
14	0.12791
15	0.12794
16	...

PLAST(Dy0, np) := for I ∈ 1..9

$$\Delta l_I \leftarrow (np \cdot 9 + I) \cdot \frac{R}{N}$$

$$\alpha_I \leftarrow \arcsin\left(\frac{\Delta l_I}{R}\right)$$

$$H_I \leftarrow h - \sqrt{R^2 - (\Delta l_I)^2}$$

"час вільного польоту"

$$t1_I \leftarrow \text{root}(Fh(t, Dy0, H_I), t, 0, 2)$$

"швидкість перед ударом"

$$DY1_I \leftarrow DY(t1_I, Dy0)$$

"швидкість після удару"

$$DY2_I \leftarrow DY1_I \cdot \max(0, \sin(\alpha_I) - fz \cdot \cos(\alpha_I))$$

$$d\alpha0_I \leftarrow \frac{DY2_I}{R}$$

"час руху по зерну і швидкість при сході з зерна"

$$FYZ_I \leftarrow Rpz(\alpha_I, d\alpha0_I)$$

"час проходження пласту"

$$T2_I \leftarrow t1_I + dt(FYZ_I)_{1,2}$$

"усереднений час проходження пласту"

$$T2S \leftarrow \frac{1}{9} \cdot \sum_{ii=1}^9 T2_{ii}$$

"усереднена швидкість після проходження пласту"

$$DY2S \leftarrow \frac{1}{9} \cdot \left[\sum_{ii=1}^{9-1} \left[(FYZ_{ii})_{1,1} \right] (FYZ_{ii})_{1,2} + DY2_9 \right]$$

"врахування розрідженості потоку"

if roz > D

"вільне проходження пласта"

"час проходження пласту"

$$Troz \leftarrow \text{root}(Fh(t, Dy0, h), t, 0, 2)$$

"швидкість на виході з пласта"

$$DY1roz \leftarrow DY(Troz, Dy0)$$

$$T2S \leftarrow \frac{T2S \cdot D + Troz \cdot (roz - D)}{roz}$$

$$DY2S \leftarrow \frac{DY2S \cdot D + DY1roz \cdot (roz - D)}{roz}$$

(T2S DY2S)

$$PLAST(dy0, 0) = (0.12192 \ 0.20447)$$

$$PLAST(0.41281, 0) = (0.12063 \ 0.20447)$$

$$PLAST(0.46743, 0) = (0.12047 \ 0.20447)$$

```

Nplast(dv0) := "розрахунок кількості пройдених пластів"
Vy1 ← dv0
TN ← 0
for J ∈ 1 .. 100
    Re ← PLAST(VyJ, 0)
    "швидкість при виході з пласта"
    VyJ+1 ← Re1,2
    "час проходження пласта"
    TyJ+1 ← Re1,1
    "загальний час при проходженні пластів"
    TN ← TN + TyJ
    "номер пласта"
    JjJ ← J
    break if TN > TL
JjJ+1 ← J + 1
(Jj Vy Ty)

```

Швидкість після удару домішки по зерну

$$FRE := Nplast(0)$$

перша колонка-- номер рівня введення

друга колонка-- швидкість домішки з першого рівня на виході з відповідного верхнього шару

третя колонка-- час проходження домішки з першого рівня між верхніми сусідніми шарами

$$FRE = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 \\ 0.20447 \\ 0.20447 \\ 0.20447 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 \\ 0.12192 \\ 0.12126 \\ 0.12126 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

Траекторія руху домішки з нижнього рівня:

чорна лінія -- вільний рух домішки (при відсутності верхніх рівнів);

червона лінія -- рух домішки при наявності верхніх рівнів

$$K := 1 \dots \text{rows}(FRE_{1,3})$$

$$YK_K := 0.035 \cdot (K - 1)$$

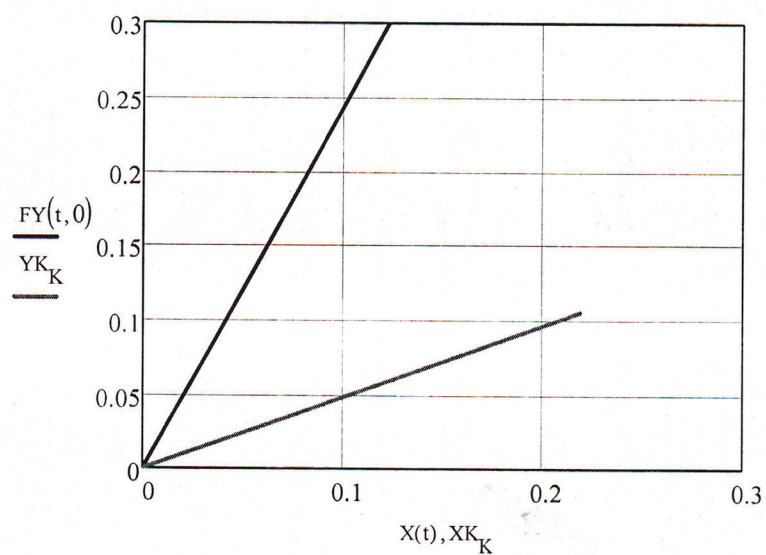
$$TK_K := \sum_{i=1}^K (FRE_{1,3})_i$$

$$XK_K := dx0 \cdot TK_K$$

$$TM := TK_{\text{rows}}(FRE_{1,3})$$

$$XM := XK_{\text{rows}}(FRE_{1,3})$$

$$YM := FY(TM, 0)$$



Розподіл Гауса

```

FYmM(ndx) := (Tpp dy1) ← (0 dy0)
for i ∈ 1..5
    (Tp dyi+1) ← PLAST(dyi, ndx)
    Tpp ← Tpp + Tp
    if Tpp ≥ TL
        y ← h · (i + (TL - Tpp) / Tp)
        break
    y ← 5 · h + FY(TL - Tpp, dyi+1) if Tpp < TL

```

```

FPLI(Ym, ΔY, Tpp, dyp, ix, nC, NG) :=
  (Tp dyp) ← PLAST(dyp, ix)
  Tpp ← Tpp + Tp
  if Tpp ≥ TL
    Yp ← h · (nC +  $\frac{TL - Tpp}{Tp}$ )
    k ← max(1, ceil( $\frac{Yp - Ym}{\Delta Y}$ ))
    NGk ← NGk + 1 · 5-nC
  (Tpp Yp dyp NG)

```

```

FPLI5(Ym, ΔY, Tpp4, dy04, nC, NG, Yp) :=
  if Tpp4 ≥ TL
    (Tpp4 Yp dy04 NG)
    break
  for ii5 ∈ 0..10
    (Tpp5 Yp dy05 NG) ← FPLI(Ym, ΔY, Tpp4, dy04, ii5, nC, NG)
    if Tpp5 < TL
      Yp ← 5 · h + FY(TL - Tpp5, dy05)
      k ← max(1, ceil( $\frac{Yp - Ym}{\Delta Y}$ ))
      NGk ← NGk + 1
    (Tpp5 Yp dy05 NG)

```

```

FPLI4(Ym, ΔY, Tpp3, dy03, nC, NG, Yp) :=
  return (Tpp3 Yp dy03 TL) if l = 0
  if Tpp3 ≥ TL
    (Tpp3 Yp dy03 NG)
    break
  for ii4 ∈ 0..10
    (Tpp4 Yp dy04 NG) ← FPLI(Ym, ΔY, Tpp3, dy03, ii4, nC, NG)
    (Tpp5 Yp dy05 NG) ← FPLI5(Ym, ΔY, Tpp4, dy04, nC + 1, NG, Yp)
  (Tpp5 Yp dy05 NG)

```

```

FPLI3(Ym, ΔY, Tpp2, dy02, nC, NG, Yp) :=
  if Tpp2 ≥ TL
    (Tpp2 Tpp2 dy02 NG)
    return (Tpp2 Yp Tpp2 TL) if l = 0
    break
  for ii3 ∈ 0..10
    (Tpp3 Yp dy03 NG) ← FPLI(Ym, ΔY, Tpp2, dy02, ii3, nC, NG)
    return (Tpp3 Yp dy03 NG) if l = 0

```

$\text{POZG5x}(n, N) := \text{POZG50}(n, N)$

$\text{REG0} := \text{POZG5}(0, 99)$

$\text{REG1} := \text{POZG5}(1, 99)$

$\text{REG2} := \text{POZG5}(2, 99)$

$\text{REG3} := \text{POZG5}(3, 99)$

$\text{REG4} := \text{POZG5}(4, 99)$

$\text{REG5} := \text{POZG5}(5, 99)$

$\text{REG6} := \text{POZG5}(6, 99)$

$\text{REG7} := \text{POZG5}(7, 99)$

$\text{REG8} := \text{POZG5}(8, 99)$

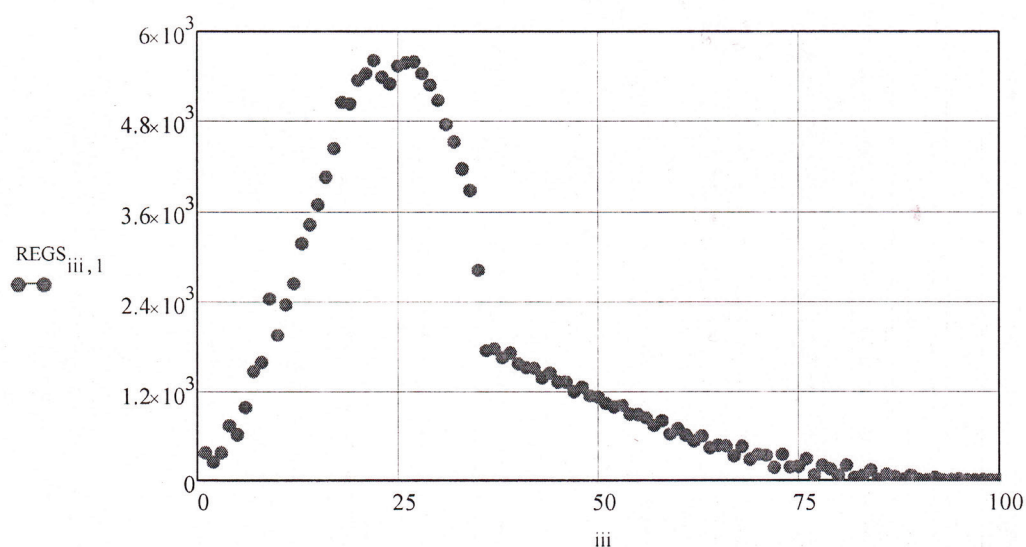
$\text{REG9} := \text{POZG5}(9, 99)$

$\text{REG10} := \text{POZG5}(10, 99)$

$\text{REGS} := \text{REG0} + \text{REG1} + \text{REG2} + \text{REG3} + \text{REG4} + \text{REG5} + \text{REG6} + \text{REG7} + \text{REG8} + \text{REG9} + \text{REG10}$

$\text{REGS} := \text{RRR}$

Розподіл Гауса для самого нижнього рівня.
Початок відліку сама нижня точка розподілу



$$\text{FYmM}(0) = 0.04634$$

$$\text{FYmM}(10) = 0.26055$$

$$\Delta Y := \frac{\text{FYmM}(10) - \text{FYmM}(0)}{100}$$

$$\Delta Y = 2.14212 \times 10^{-3}$$

$$\text{KK0x} := \text{ceil} \left[\frac{(5 \cdot h - \text{FYmM}(0))}{\Delta Y} \right]$$

$$\text{KK0x} = 49$$

Координати точки проходження домішки через самий верхній зерновий шар

$$\text{KK0} := \text{ceil} \left(5 \cdot \frac{h}{\Delta Y} \right)$$

$$\text{KK0} = 71$$

Координати початкової точки розподілу Гауса для нижнього рівня

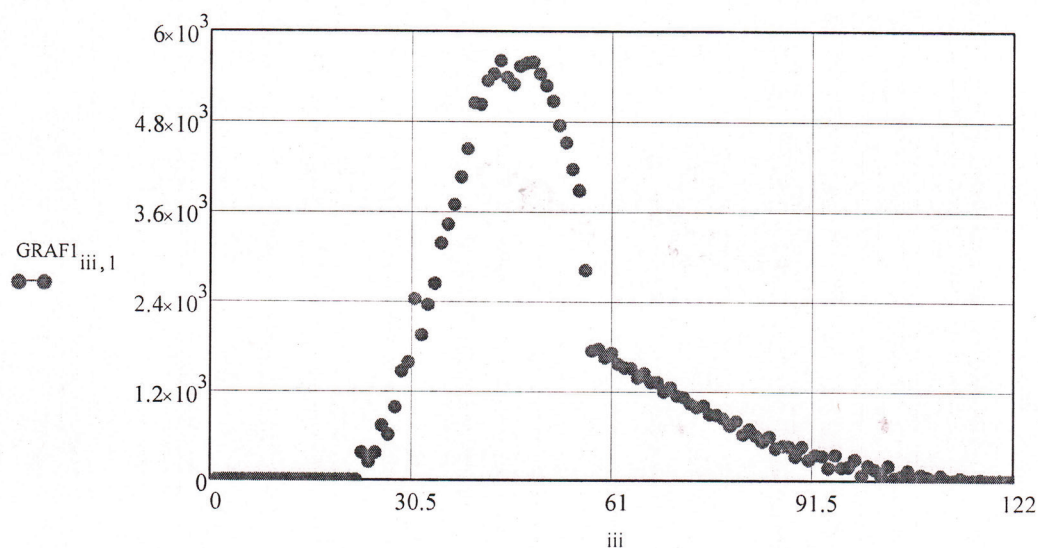
введення

$$KK1 := \text{ceil}\left(\frac{FYmM(0)}{\Delta Y}\right) \quad KK1 = 22$$

```

GRAFI := for k ∈ 1..100 + KK1
|
|   REREk ← 0 if k ≤ KK1
|   REREk ← REGSk-KK1,1 if k > KK1
| RERE

```



Координати початкової точки розподілу Гауса для другого з низу пласта рівня

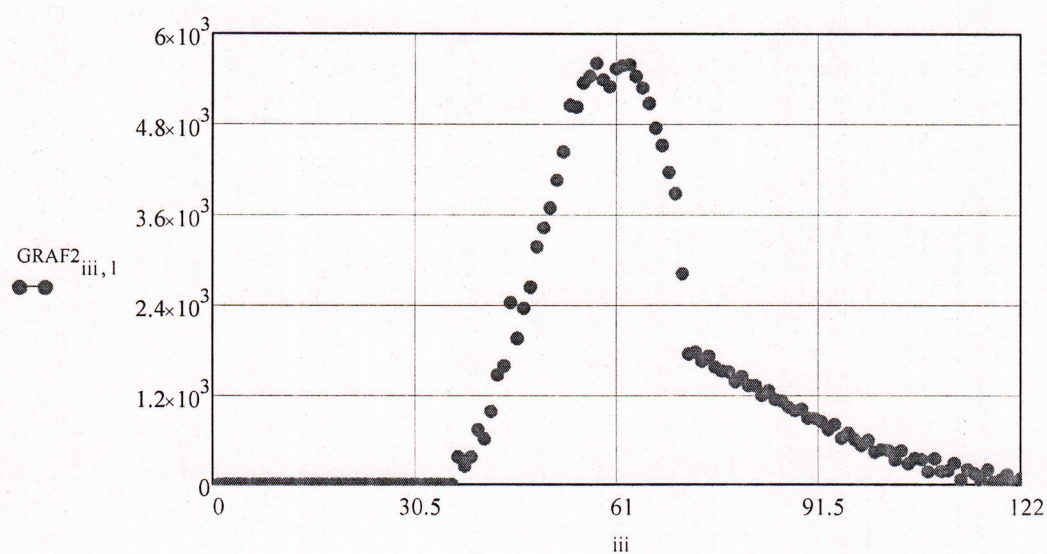
введення

$$KK2 := \text{ceil}\left(\frac{FYmM(0) + h}{\Delta Y}\right) \quad KK2 = 36$$

```

GRAFI2 := for k ∈ 1..100 + KK1
|
|   REREk ← 0 if k ≤ KK2
|   REREk ← REGSk-KK2,1 if k > KK2
| RERE

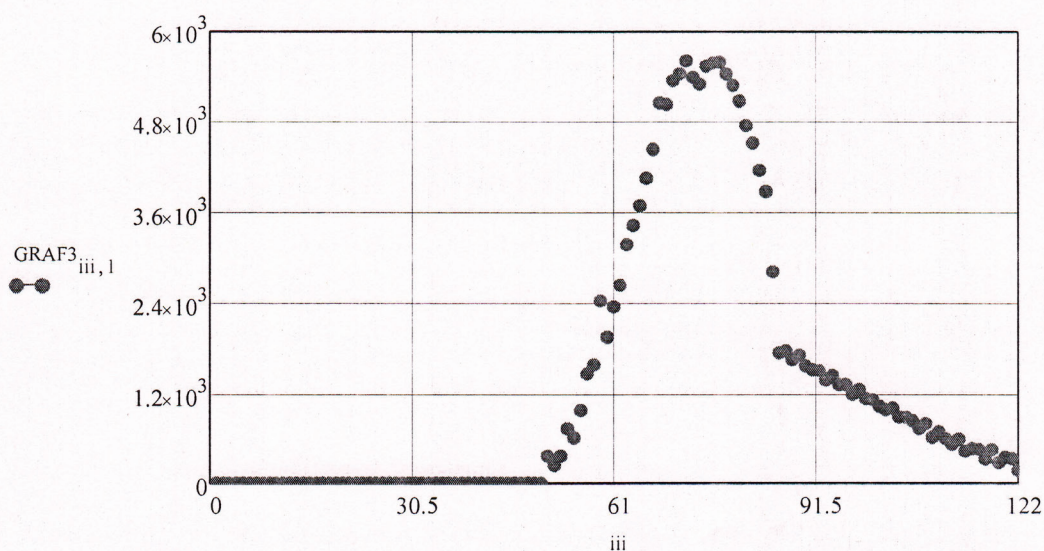
```

Координати початкової точки розподілу Гауса для третього з низу рівня введення

$$KK3 := \text{ceil}\left(\frac{FYmM(0) + 2 \cdot h}{\Delta Y}\right) \quad KK3 = 50$$

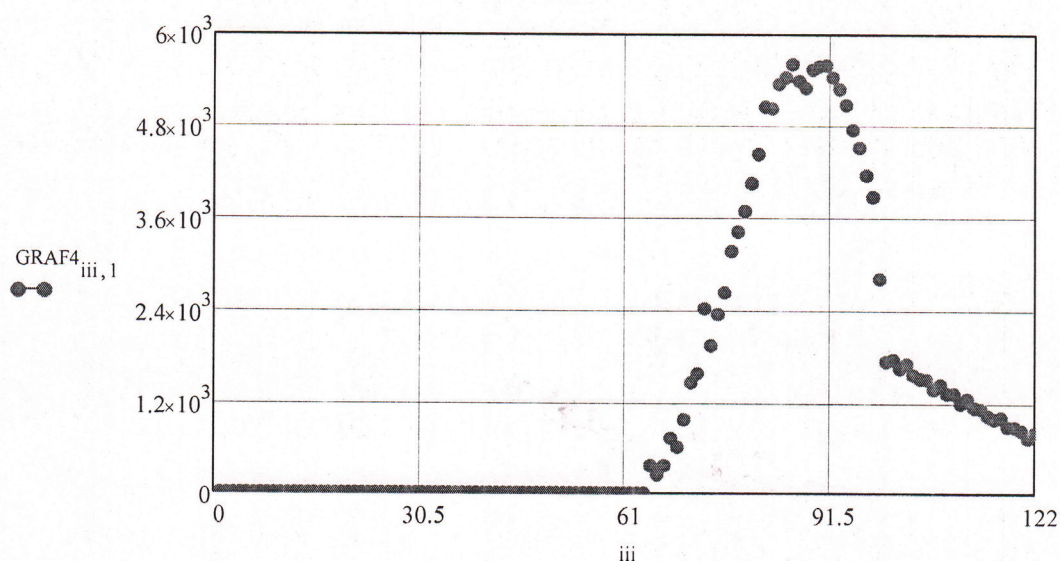
GRAF3 := $\begin{cases} \text{for } k \in 1..100 + KK1 \\ \left| \begin{array}{l} RERE_k \leftarrow 0 \text{ if } k \leq KK3 \\ RERE_k \leftarrow REGS_{k-KK3,1} \text{ if } k > KK3 \end{array} \right. \\ RERE \end{cases}$



Координати початкової точки розподілу Гауса для четвертого з низу рівня введення

$$KK4 := \text{ceil}\left(\frac{FYmM(0) + 3 \cdot h}{\Delta Y}\right) \quad KK4 = 64$$

$\text{GRAF4} := \begin{cases} \text{for } k \in 1 \dots 100 + \text{KK1} \\ \quad \text{RERE}_k \leftarrow 0 \text{ if } k \leq \text{KK4} \\ \quad \text{RERE}_k \leftarrow \text{REGS}_{k-\text{KK4},1} \text{ if } k > \text{KK4} \\ \text{RERE} \end{cases}$



Визначення процентного вмісту домішок в очищеному зерні

$$\sum_{i=1}^{100+\text{KK1}} \text{GRAF1}_{i,1} = 1.61051 \times 10^5$$

кількість домішок, яка була початково в кожному зерновому шарі

$$\sum_{i=1}^{\text{KK0}} \text{GRAF1}_{i,1} = 1.44487 \times 10^5 \quad \sum_{i=1}^{\text{KK0}} \text{GRAF2}_{i,1} = 1.24128 \times 10^5 \quad \sum_{i=1}^{\text{KK0}} \text{GRAF3}_{i,1} = 5.5231 \times 10^4$$

кількість домішок, яка не виділилась в осадову камеру, відповідно, з першого, другого і третього нижніх зернових шарів

усі домішок з 4-6 рівнів виділились в осадову камеру

Процентний вміст домішок в очищеному зерні, яке пройшло через ПСК

$$\frac{\sum_{i=1}^{\text{KK0}} (\text{GRAF1}_{i,1} + \text{GRAF2}_{i,1} + \text{GRAF3}_{i,1})}{6 \cdot 11^5} \cdot 100 = 33.51381$$

ДОДАТОК Д

Результати досліджень аеродинамічних характеристик легких домішок

Номер фракції	Інтервал швидкості витання V_n , м/с	Характеристика компонентів фракції	Номер фракції	Інтервал швидкості витання V_n , м/с	Характеристика компонентів фракції
8	0...5,1	полова, насіння бур'янів, частки подрібненого зерна (відходи III класу)	4	7,0...9,5	Продовольче зерно
7	4,2...6,6	соломисті частки, дрібне зерно (відходи II класу)	3	7,3...9,6	Насіння III класу
6	5,2...6,4	неочищене, дрібне зерно (відходи I класу)	2	7,4...9,8	Насіння II класу
5	6,8...8,7	щупле, бите, пошкоджене шкідниками (фуражне зерно)	1	7,7...11,4	Насіння I класу

ДОДАТОК Е

Оцінка техніко-економічного рівня розробленої машини

Вихідні дані до розрахунку:

- $D_{зд} := 135$ - загальна кількість найменувань деталей у дослідній машині, шт;
 $D_{од} := 34$ - кількість найменувань оригінальних деталей у дослідній машині;
 $D_{зс} := 149$ - загальна кількість найменувань деталей у серійній машині;
 $D_{ос} := 48$ - кількість найменувань оригінальних деталей у серійній машині;
 $D_{стд} := 101$ - кількість найменувань стандартних деталей у дослідній машині;
 $D_{стс} := 101$ - кількість найменувань стандартних деталей у серійній машині;
 $N_{зд} := 482$ - загальна кількість деталей у дослідній машині, шт;
 $N_{зс} := 468$ - загальна кількість деталей у серійній машині, шт;
 $C_c := 58900$ - собівартість виготовлення серійної машини, грн;
 $\Pi_{пс} := 26100$ - ціна покупних виробів у собівартості серійної машини, грн;
 $\Pi_{пд} := 25450$ - ціна покупних виробів у собівартості дослідної машини, грн;
 $M_c := 965$ - маса серійної машини, кг; $M_d := 978$ - маса дослідної машини, кг;
 $M_{пс} := 325$ $M_{пд} := 312$ - маси покупних виробів відповідних машин, кг;
 $\Pi_{ос} := 20$ - продуктивність машини за 1 год. основного часу, т/год;
 $\Pi_{од} := 32$ - продуктивність машини за 1 год. основного часу, т/год;
 $K_{екс} := 0.76$ - коефіцієнт використання експлуатаційного часу зміни;
 $T_{екс} := 8 \cdot 0.76 = 6.08$ - кількість годин експлуатаційного часу серійної машини у зміну;
 $T_{зм} := 8$ - тривалість робочої зміни, год;
 $T_{лп} := 6$ $T_{то} := 6$ - кількість хвилин у робочу зміну на ліквідацію поломок та ТО;
 $T_{врс} := 8 \cdot 0.82 = 6.56$ - кількість годин робочого часу серійної машини у зміну;
 $K_{врс} := 0.82$ - коефіцієнт використання робочого часу зміни;
 $K_{од} := 2$ $K_{ос} := 2$ - кількість операцій, які виконують відповідні машини;

Визначаємо коефіцієнт уніфікації конструкції

$$K_{уд} := \frac{D_{зд} - D_{од}}{D_{зд}}$$

$$K_{уд} = 0.748$$

$$K_{ус} := \frac{D_{зс} - D_{ос}}{D_{зс}}$$

$$K_{ус} = 0.678$$

Коефіцієнт стандартизації конструкції

$$K_{\text{сгд}} := \frac{D_{\text{сгд}}}{D_{\text{зд}}}$$

$$K_{\text{сгд}} = 0.748$$

$$K_{\text{сгс}} := \frac{D_{\text{сгс}}}{D_{\text{зс}}}$$

$$K_{\text{сгс}} = 0.678$$

Відносний показник рівня стандартизації конструкції

$$B_{\text{ст}} := \frac{K_{\text{сгд}}}{K_{\text{сгс}}} = 1.1$$

Коефіцієнт конструктивної повторюваності

$$K_{\text{кпд}} := \frac{H_{\text{зд}}}{D_{\text{зд}}} = 3.57$$

$$K_{\text{кпс}} := \frac{H_{\text{зс}}}{D_{\text{зс}}} = 3.141$$

Відносний показник конструктивної повторюваності

$$B_{\text{кп}} := \frac{K_{\text{кпд}}}{K_{\text{кпс}}} = 1.137$$

Собівартість дослідної машини, грн.

$$C_{\text{д}} := \frac{C_{\text{с}} - \Pi_{\text{пс}}}{M_{\text{с}} - M_{\text{пс}}} \cdot (M_{\text{д}} - M_{\text{пд}}) + \Pi_{\text{пд}} = 59582.5$$

Коефіцієнт використання експлуатаційного часу дослідної машини

$$K_{\text{екд}} := \frac{T_{\text{екс}} + \frac{T_{\text{лп}} + T_{\text{го}}}{60}}{T_{\text{зм}}} = 0.79$$

Коефіцієнт використання робочого часу дослідної машини

$$K_{\text{врд}} := \frac{T_{\text{врс}} + \frac{T_{\text{го}}}{60}}{T_{\text{зм}}} = 0.83$$

Продуктивність машини за 1 годину експлуатаційного та змінного часу, т/год.

$$\Pi_{\text{екд}} := \Pi_{\text{од}} \cdot K_{\text{екд}} = 25.1$$

$$\Pi_{\text{екс}} := \Pi_{\text{ос}} \cdot K_{\text{екс}} = 15.2$$

$$\Pi_{\text{змд}} := \Pi_{\text{од}} \cdot K_{\text{врд}} = 26.6$$

$$\Pi_{\text{змс}} := \Pi_{\text{ос}} \cdot K_{\text{врс}} = 16.4$$

Питома собівартість машини, грн/т/год

$$C_{\text{пд}} := \frac{C_{\text{д}}}{\Pi_{\text{екд}}} = 2371.9$$

$$C_{\text{пс}} := \frac{C_{\text{с}}}{\Pi_{\text{екс}}} = 3875$$

Відносний показник рівня питомої собівартості

$$B_{\text{сп}} := \frac{C_{\text{пс}}}{C_{\text{пд}}} = 1.634$$

Питома матеріаломісткість машини, кг/т/год.

$$M_{\text{мд}} := \frac{M_{\text{д}}}{\Pi_{\text{екд}}} = 38.9 \quad M_{\text{мкс}} := \frac{M_{\text{с}}}{\Pi_{\text{екс}}} = 63.5$$

Відносний показник рівня питомої матеріаломісткості

$$B_{\text{мп}} := \frac{M_{\text{пс}}}{M_{\text{мд}}} = 1.6$$

Відносний показник рівня універсалізації

$$B_{\text{пу}} := \frac{K_{\text{од}}}{K_{\text{ос}}} = 1$$

Узагальнений показник техніко-економічного рівня модернізованої машини

$$Y_{\text{тр}} := 0.1 \cdot B_{\text{ку}} + 0.05 \cdot B_{\text{ст}} + 0.05 \cdot B_{\text{кп}} + 0.35 \cdot B_{\text{сп}} + 0.25 \cdot B_{\text{мп}} + 0.2 \cdot B_{\text{пу}} = 1.402$$

Визначення економічної ефективності заходів по розробці машини

$N_{\text{ор}} := 18$ - кількість найменувань оригінальних деталей, що розробляються;

$T_{\text{кон}} := 100$ - сумарна трудомісткість розробки конструкторської документації, год;

$З_{\text{ст}} := 25.5$ - середньогодинна заробітна плата конструкторів, грн;

$B_{\text{с}} := 32$ - відрахування на соціальне страхування та спеціальні фонди, %;

$\Pi_{\text{св}} := 250$ - процент посередніх витрат, %;

$T_{\text{т}} := 70$ - сумарна трудомісткість розробки технологічної документації, год;

$N_{\text{м}} := 2$ - кількість машин у дослідній партії, шт;

$N_{\text{ср}} := 300$ - середньорічна програма випуску дослідної машини, шт;

$\Pi_{\text{с}} := 92650$ - оптова ціна серійної машини, грн;

$C_{\text{с}} := 58900$ - собівартість серійної машини, грн;

$K_{\text{р}} := 0.8$ - коефіцієнт розподілу економічного ефекту між виготовлювачем та споживачем дослідної машини;

$E_{\text{н}} := 0.16$ - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат;

Витрати на проектування конструкції, грн

$$B_{\text{п}} := N_{\text{ор}} \cdot T_{\text{кон}} \cdot З_{\text{ст}} \cdot \left(1 + \frac{B_{\text{с}}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{\text{св}}}{100}\right) = 212058$$

Витрати на розробку технології виготовлення дослідної машини, грн

$$B_{\text{т}} := N_{\text{ор}} \cdot T_{\text{т}} \cdot З_{\text{ст}} \cdot \left(1 + \frac{B_{\text{с}}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{\text{св}}}{100}\right) = 148441$$

Витрати на виготовлення технічного оснащення, необхідного для виробництва дослідної машини, грн

$$B_{\text{осн}} := 25 \cdot (0.3 \cdot 2 \cdot 3500 + 0.2 \cdot 3 \cdot 2000 + 0.3 \cdot 4 \cdot 1000 + 0.2 \cdot 4 \cdot 500 + 0.2 \cdot 3 \cdot 100) = 124000$$

Витрати на виготовлення дослідного зразка, грн

$$B_{дз} := 1.3 \cdot C_{д} = 77457$$

Витрати на виготовлення дослідної партії, грн

$$B_{дп} := 1.3 \cdot C_{д} \cdot H_{м} = 154915$$

Інші витрати на проектування та освоєння виробництва дослідної машини, грн

$$I_{нв} := \frac{15}{100} \cdot (B_{п} + B_{т} + B_{осн} + B_{дз} + B_{дп}) = 107531$$

Сума витрат на проектування та освоєння виробництва дослідної машини, грн

$$B_{осв} := B_{п} + B_{т} + B_{осн} + B_{дз} + B_{дп} + I_{нв} = 824401$$

Питомі витрати на проектування та освоєння виробництва дослідної машини, грн

$$B_{пос} := \frac{B_{осв}}{H_{ср}} = 2748$$

Рентабельність виробництва серійної машини, %

$$P_{с} := \frac{Ц_{с} - C_{с}}{C_{с}} \cdot 100 = 57$$

Оптова ціна дослідної машини, грн

$$Ц_{опд} := C_{д} \cdot \left(1 + \frac{P_{с}}{100}\right) \cdot \frac{П_{екд}}{П_{екс}} \cdot K_{р} = 123912$$

Річний економічний ефект заводу-виробника від впровадження дослідної машини у виробництво, грн

$$E_{гв} := (Ц_{опд} - C_{д}) - (Ц_{с} - C_{с}) - B_{пос} \cdot E_{н} = 30140$$

Визначення річного економічного ефекту споживача дослідної машини

$$P_{обд} := 1$$

$P_{обс} := 1$ - кількість робітників, виконуючих роботу і-го розряду, чол;

$\Gamma_{тс} := 23.5$ - годинна тарифна ставка і-го розряду роботи, грн;

$K_{п} := 1.4$ - коефіцієнт переводу оптової ціни у балансову вартість;

$H_{а} := 15$ - норма щорічних амортизаційних відрахувань на реновацію машини, %;

$K_{м} := 1$ - кількість машин, які входять до складу одного агрегату, шт;

$P_{з} := 260$ - нормативне річне завантаження машини, год;

$H_{р} := 7$ - норми на ремонт та технічний догляд за машиною, %;

$$H_{з} := 0.6$$

$$B_{пдд} := 3.5$$

- встановлена потужність електродвигунів та інших споживачів

$$B_{пдс} := 3.5 \text{ електроенергії, кВт;}$$

$Ц_{е} := 1.89$ - ціна 1 кВт-год електроенергії, грн;

$$K_{\text{КД}} := 0.85$$

- коефіцієнти корисної дії електродвигунів та мережі;

$$K_{\text{КМ}} := 0.96$$

Заробітна плата обслуговуючого персоналу, грн/т

$$З_{\text{ПД}} := \frac{P_{\text{обд}} \cdot \Gamma_{\text{ТС}}}{\Pi_{\text{ЗМД}}} = 0.88$$

$$З_{\text{ПС}} := \frac{P_{\text{обс}} \cdot \Gamma_{\text{ТС}}}{\Pi_{\text{ЗМС}}} = 1.433$$

Амортизація машини, грн/т

$$B_{\text{амд}} := \frac{K_{\text{П}} \cdot \Pi_{\text{опд}} \cdot H_{\text{а}} \cdot K_{\text{М}}}{100 \cdot \Pi_{\text{екд}} \cdot P_{\text{З}}} = 3.98$$

$$B_{\text{амс}} := \frac{K_{\text{П}} \cdot \Pi_{\text{с}} \cdot H_{\text{а}} \cdot K_{\text{М}}}{100 \cdot \Pi_{\text{екс}} \cdot P_{\text{З}}} = 4.92$$

Витрати на ремонт та технічний догляд за машиною, грн/т

$$B_{\text{рд}} := \frac{K_{\text{П}} \cdot \Pi_{\text{опд}} \cdot H_{\text{р}} \cdot K_{\text{М}}}{100 \cdot \Pi_{\text{екд}} \cdot P_{\text{З}}} = 1.86$$

$$B_{\text{рс}} := \frac{K_{\text{П}} \cdot \Pi_{\text{с}} \cdot H_{\text{р}} \cdot K_{\text{М}}}{100 \cdot \Pi_{\text{екс}} \cdot P_{\text{З}}} = 2.3$$

Витрати на збереження машин, які входять до складу агрегату, грн/т

$$B_{\text{зд}} := \frac{H_{\text{З}}}{\Pi_{\text{екд}}} = 0.02$$

$$B_{\text{зс}} := \frac{H_{\text{З}}}{\Pi_{\text{екс}}} = 0.04$$

Витрати на електроенергію, грн/т

$$B_{\text{ед}} := \frac{B_{\text{пдд}} \cdot \Pi_{\text{е}}}{\Pi_{\text{ЗМД}} \cdot K_{\text{КД}} \cdot K_{\text{КМ}}} = 0.3$$

$$B_{\text{ес}} := \frac{B_{\text{пдс}} \cdot \Pi_{\text{е}}}{\Pi_{\text{ЗМС}} \cdot K_{\text{КД}} \cdot K_{\text{КМ}}} = 0.49$$

Сума експлуатаційних витрат, які припадають на одиницю виробленої продукції, грн/т

$$E_{\text{ВД}} := З_{\text{ПД}} + B_{\text{амд}} + B_{\text{рд}} + B_{\text{зд}} + B_{\text{ед}} = 7.05$$

$$E_{\text{ВС}} := З_{\text{ПС}} + B_{\text{амс}} + B_{\text{рс}} + B_{\text{зс}} + B_{\text{ес}} = 9.19$$

Балансова вартість машин, грн

$$B_{\text{ВД}} := 1.4 \cdot \Pi_{\text{опд}} = 173477$$

$$B_{\text{ВС}} := 1.4 \cdot \Pi_{\text{с}} = 129710$$

Питомі капітальні витрати на одиницю виробленої продукції, грн/т

$$\Pi_{\text{КВД}} := \frac{1}{\Pi_{\text{екд}}} \cdot \frac{B_{\text{ВД}}}{P_{\text{З}}} = 26.56$$

$$\Pi_{\text{КВС}} := \frac{1}{\Pi_{\text{екс}}} \cdot \frac{B_{\text{ВС}}}{P_{\text{З}}} = 32.82$$

Річний економічний ефект споживача дослідної машини, грн

$$E_{\text{рсп}} := \left[(E_{\text{ВС}} + E_{\text{Н}} \cdot \Pi_{\text{КВС}}) - (E_{\text{ВД}} + E_{\text{Н}} \cdot \Pi_{\text{КВД}}) \right] \cdot \Pi_{\text{екд}} \cdot P_{\text{З}} = 20477$$

Додаток Ж

Документи про видачу патентів України



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 8058

(51) 7 B02B1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на корисну модель

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) u 2005 00190

(22) 10.01.2005

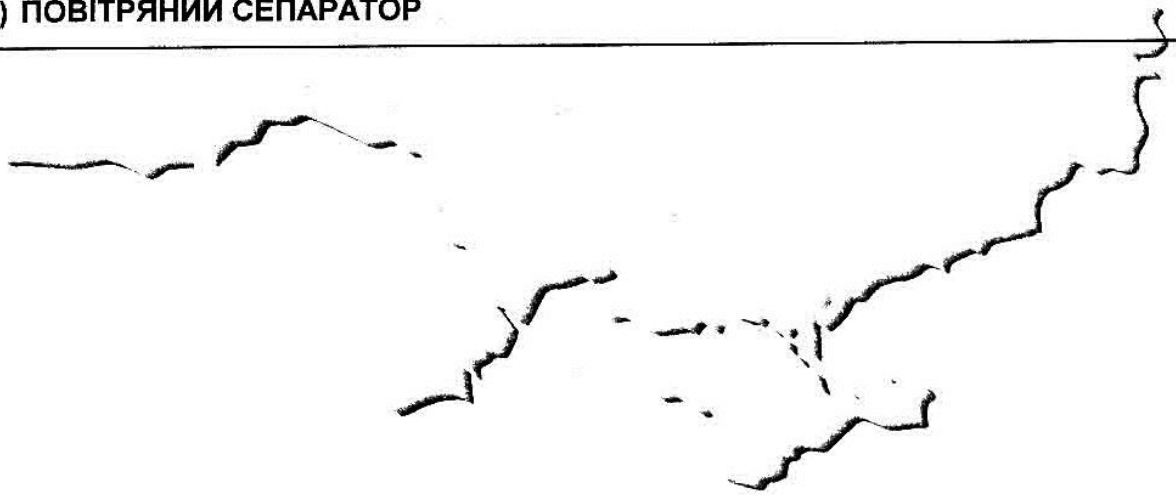
(24) 15.07.2005

(46) 15.07.2005. Бюл. № 7

(72) Васильковський Михайло Ігоревич, Васильковський Олексій Михайлович, Мороз
Сергій Миколайович, Лещенко Сергій Миколайович, Нестеренко Олександр
Вікторович

(73) Кіровоградський національний технічний університет

(54) ПОВІТРЯНИЙ СЕПАРАТОР





УКРАЇНА

(19) UA (11) 8058 (13) U
(51) 7 B02B1/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПОВІТРЯНИЙ СЕПАРАТОР

1

2

(21) u200500190

(22) 10.01.2005

(24) 15.07.2005

(46) 15.07.2005, Бюл. № 7, 2005 р.

(72) Васильковський Михайло Ігорович, Василь-
ковський Олексій Михайлович, Мороз Сергій Ми-
колайович, Лещенко Сергій Миколайович, Несте-
ренко Олександр Вікторович

(73) КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХ-

НІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Повітряний сепаратор, що містить бункер з
заслінкою, живильний і пневмосепаруючий канали
та осадову камеру, який відрізняється тим, що
живильний канал виконаний з декількома напрям-
ними поверхнями, встановленими одна над од-
ною, нижні кінці яких перетинаються з пневмосе-
паруючим каналом на різних рівнях по його висоті.

Корисна модель відноситься до області техні-
ки для розділення сипких зернових матеріалів, в
даному випадку для очищення і сортування зерна
повітряним потоком, і може бути використана в
інших областях для вказаних цілей.

Відомий повітряний сепаратор з вертикальним
пневмосепараційним каналом з введенням зерно-
вого матеріалу суцільним потоком, за допомогою
живильних вальців, або самопливом по похилій
напрямній поверхні [1].

Недоліком такого сепаратора є суттєве збіль-
шення опору повітряному потоку в зоні введення зі
збільшенням питомого навантаження на пневмо-
сепараційний канал, а також зниження якості pne-
восепарування, внаслідок погіршення умов роз-
шарування компонентів зернової суміші та
збільшення втрат основного зерна в відходах, що
обмежує його продуктивність.

Задачею даної корисної моделі є підвищення
продуктивності очищення зерна повітряним пото-
ком за рахунок покращення умов його сепарації,
шляхом розшарування зернового матеріалу перед
його введенням в пневмосепараційний канал.

Вирішення поставленої задачі досягається
тим, що живильний канал виконано з декількома
напрямними поверхнями, встановленими одна над
одною, нижні кінці яких перетинаються з пневмо-
сепаруючим каналом на різних рівнях по його ви-
соті.

Така конструкція повітряного сепаратора сут-
тєво зменшує питоме навантаження на попере-
чний переріз каналу та опір повітряному потоку в
робочій зоні пневмосепаруючого каналу, що по-

кращує умови виділення легких домішок та забез-
печує значне підвищення продуктивності пневмо-
сепарації.

Суть корисної моделі пояснюється креслен-
ням, на якому приведена схема роботи повітряно-
го сепаратора.

Він складається з бункера 1 з заслінкою 2, жи-
вильного 3 та пневмосепаруючого 4 каналів, оса-
дової камери 5 з вивантажувальним клапаном 6 та
повітряним каналом 7.

Бункер 1 має на своєму дні отвір, під яким
встановлено регульовальну заслінку 2, нижче якої
розташовано живильний канал 3. Живильний ка-
нал 3 виконано похилим з декількома напрямними
поверхнями 8, встановленими одна над одною,
нижні кінці яких перетинаються з пневмосепарую-
чим каналом 4 на різних рівнях по його висоті, а їх
верхні кінці виконано з можливістю регулювання
відстані між ними і нижньою напрямною стінкою
живильного каналу 3, наприклад, за допомогою
регульовальних пластин 9, які шарнірно закріплені
з напрямними поверхнями 8. Осадова камера 5
з'єднана з пневмосепаруючим каналом 4 і має
вивантажувальний клапан 6 та повітряний канал 7.

Сепаратор працює таким чином. Зерновий ма-
теріал, після відкриття регульовальної заслінки 2,
поступає із бункера 1 в похилий канал живильника
3, де спочатку рухається вниз по його нижній зов-
нішній стінці суцільним потоком, а потім, після зу-
стрічі з регульовальними пластинами 9, розподіля-
ється ними на декілька розташованих один над
одним зернових потоків. Далі кожен з них по від-
повідним напрямним поверхням 8 поступає в роз-

(13) U
(11) 8058
(19) UA

шарованому вигляді в пневмосепаруючий канал 4 в різні робочі зони по його висоті.

В пневмосепаруючому каналі 4 розшарований зерновий матеріал продувається вертикальним повітряним потоком, який відокремлює із нього легкі домішки і виносить їх в осадову камеру 5. Потім легкі домішки і відпрацьований повітряний потік виходять із осадової камери, відповідно, через вивантажувальний клапан 6 і повітряний канал 7. А очищене від легких домішок зерно, рухається вниз по пневмосепаруючому каналу, поки не вийде за його межі. Регулювання продуктивності сепаратора, здійснюється заслінкою 2, яка обмежує її максимальну величину.

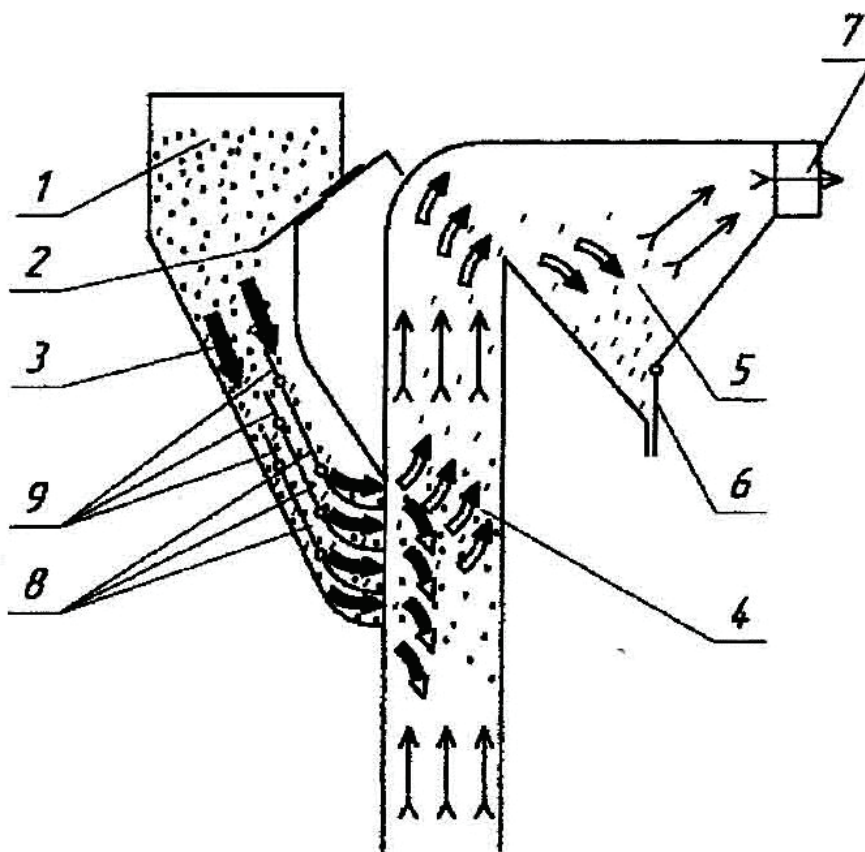
Регулювання питомого навантаження поперечного перерізу робочих зон пневмосепаруючого каналу 4, яке визначає якість сепарування зернового матеріалу, здійснюється регулювальними пластинами 9, зміною відстані між їх верхніми кінцями і зовнішньою (нижньою) напрямною стінкою живильного каналу 3. При цьому, зміна загальної

продуктивності сепаратора практично не впливає на питоме навантаження його поперечних перерізів робочої зони пневмосепаруючого каналу, розташованих на різних рівнях по його висоті, крім самої верхньої, на яку поступає зерновий матеріал по напрямним поверхням 8. Це забезпечує задану якість сепарування зерна в запропонованому сепараторі, незалежно від стабільності його завантаження в певних межах зміни його продуктивності.

Випробування запропонованого повітряного сепаратора показали, що його продуктивність в значній мірі залежить від кількості рівнів введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал і, порівняно з відомими аналогами, може бути збільшена в декілька разів.

Література:

1. Тиц Э.Л., Анискин В.И. Баснакьян Г.А. и др. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. - М.: Машиностроение, 1967, с.190.





УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 9586

(51) 7 B02B1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на корисну модель

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) а 2005 00209

(22) 10.01.2005

(24) 17.10.2005

(46) 17.10.2005. Бюл. № 10

(72) Васильковський Михайло Ігорович, Васильковський Олексій Михайлович, Мороз Сергій Миколайович, Лещенко Сергій Миколайович, Нестеренко Олександр Вікторович

(73) Кіровоградський національний технічний університет

(54) СПОСІБ ВВЕДЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ В ПНЕВМОСЕПАРУЮЧИЙ
КАНАЛ ПОВІТРЯНОГО СЕПАРАТОРА



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 9586

(13) U

(51) 7 B02B1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВВЕДЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ В ПНЕВМОСЕПАРУЮЧИЙ КАНАЛ ПОВІТРЯНОГО СЕПАРАТОРА

1

2

(21) а200500209

(22) 10.01.2005

(24) 17.10.2005

(46) 17.10.2005, Бюл. № 10, 2005 р.

(72) Васильковський Михайло Ігоревич, Васильковський Олексій Михайлович, Мороз Сергій Миколайович, Лещенко Сергій Миколайович, Нестеренко Олександр Вікторович

(73) КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора, що включає введення зернового матеріалу у вигляді зернового потоку, який відрізняється тим, що зерновий потік перед введенням в пневмосепаруючий канал розділяють на декілька, розташованих один над одним, зернових потоків, які поступають в канал в різні за рівнем його робочі зони.

Корисна модель відноситься до області техніки для розділення сипких зернових матеріалів, в даному випадку для очищення і сортування зерна повітряним потоком, і може бути використана в інших областях для вказаних цілей.

Відомий спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал суцільним потоком, за допомогою живильних вальців, або самопливом по похилій направляючій поверхні [1].

Недоліком відомого способу є суттєве зниження якості сепарації зі збільшенням зернового навантаження на пневмосепаруючий канал. Це пояснюється тим, що зі збільшенням питомого навантаження в зоні введення матеріалу в пневмосепаруючий канал збільшуються товщина шару зерна і його опір повітряному потокові, що погіршує умови відокремлення легких домішок і збільшує втрати основного зерна у відходах.

Відомий також спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал у вигляді багатоструменевого зернового потоку [2], який дозволяє поліпшити умови його сепарування завдяки наявності певної відстані між окремими струменями розділеного зернового потоку в горизонтальному напрямку. Це знижує опір зернового матеріалу повітряному потоку і сприяє більш ефективному відокремленню легких домішок, а також, дозволяє в певній мірі підвищити продуктивність і якість сепарації.

Недоліком цього способу також являється погіршення якості сепарації зі збільшенням за певними межами питомого навантаження на пневмо-

сепаруючий канал, що і обмежує його продуктивні можливості.

Задачею даної корисної моделі є подальше підвищення продуктивності повітряної сепарації зерна за рахунок вдосконалення способу його введення в пневмосепаруючий канал і покращення умов для відокремлення легких домішок.

Вирішення поставленої задачі досягається тим, що зерновий потік перед введенням в пневмосепаруючий канал розподіляється на декілька розташованих один над одним зернових потоків, які направляються і поступають в канал в різні за рівнем його робочі зони.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням. На кресленні наведена схема роботи багаторівневого введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал.

Здійснюється спосіб в повітряному сепараторі, який складається із бункера 1 з заслінкою 2, живильника 3, пневмосепаруючого каналу 4 та осадової камери 5 з вивантажувальним клапаном 6 та повітряним каналом 7.

Сепаратор працює таким чином. Зерновий матеріал, після відкриття регулювальної заслінки 2, поступає із бункера 1 в похилий канал живильника 3, де спочатку рухається вниз по його нижній зовнішній стінці суцільним потоком, а потім, після зустрічі з направляючими поверхнями 8 він розподіляється ними на декілька розташованих один над одним зернових потоків, які вводяться в пневмосепаруючий канал 4 в різні робочі зони по його висоті.

(13) U
(11) 9586
(19) UA

3

9586

4

В пневмосепаруючому каналі 4, зерновий матеріал продувається вертикальним повітряним потоком, який відокремлює із нього легкі домішки і виносить їх в осадову камеру 5. Потім легкі домішки і відпрацьований повітряний потік виходять із осадової камери, відповідно, через вивантажувальний клапан 6 і повітряний канал 7. А очищене від легких домішок зерно, рухається вниз по пневмосепаруючому каналу, поки не вийде за його межі. Регулювання продуктивності сепаратора, здійснюється заслінкою 2, яка обмежує її максимальну величину.

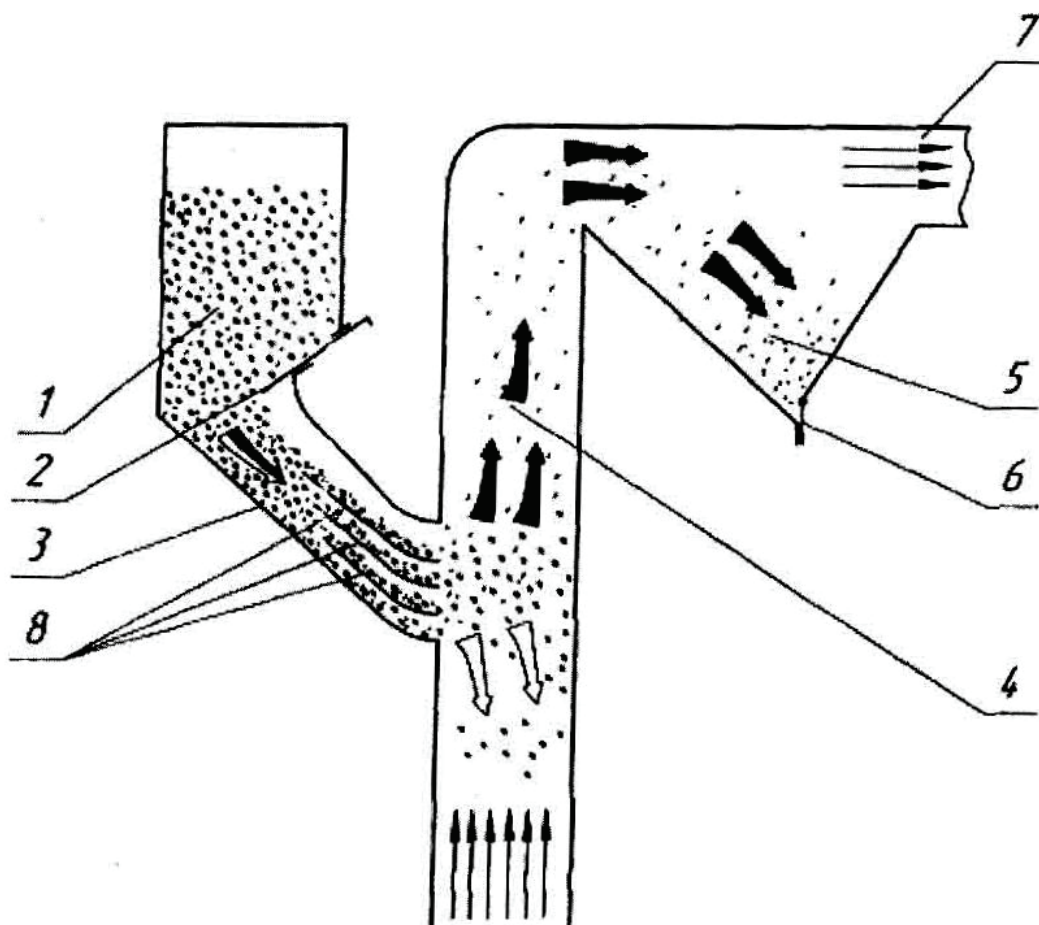
Випробування запропонованого повітряного сепаратора показали, що його продуктивність в

значній мірі залежить від кількості рівнів введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал і, порівняно з відомими аналогами, може бути збільшена в декілька разів.

Джерело інформації:

1. Тиц Э.Л., Анискин В.И., Баснакьян Г.А. и др. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. -М.: Машиностроение, 1967, с.190.

2. Деклараційний патент України на винахід №65057А, МКІ В02В1/00. Спосіб введення матеріалу в аспіраційний канал повітряного сепаратора /Васильковський М.І., Васильковський О.М., Кісільов Р.В., Лещенко С.М., Мороз С.М. (Україна).



Комп'ютерна верстка Л.Литвиненко

Підписне

Тираж 26 прим.

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 9042

(51) 7 B02B1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на корисну модель

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) 20041008509

(22) 19.10.2004

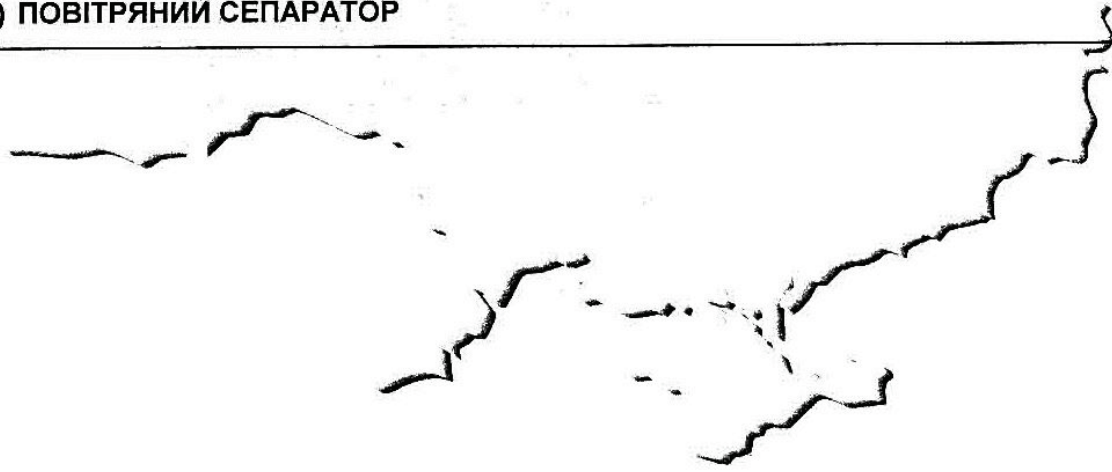
(24) 15.09.2005

(46) 15.09.2005. Бюл. № 9

(72) Васильковський Михайло Ігоревич, Васильковський Олексій Михайлович, Лещенко
Сергій Миколайович, Нестеренко Олександр Вікторович, Косінов Михайло
Михайлович

(73) Кіровоградський національний технічний університет

(54) ПОВІТРЯНИЙ СЕПАРАТОР





УКРАЇНА

(19) UA (11) 9042 (13) U

(51) 7 B02B1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПОВІТРЯНИЙ СЕПАРАТОР

1

2

(21) 20041008509

(22) 19.10.2004

(24) 15.09.2005

(46) 15.09.2005, Бюл. № 9, 2005 р.

(72) Васильковський Михайло Ігоревич, Василь-
ковський Олексій Михайлович, Лещенко Сергій
Миколайович, Нестеренко Олександр Вікторович,
Косінов Михайло Михайлович(73) КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХ-
НІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ(57) 1. Повітряний сепаратор, що містить бункер,
живильний пристрій, вертикальний пневмосепара-ційний і вивідний канали, які розміщені по різні
боки задньої стінки першого, та осадову камеру з
вивантажувальним клапаном та повітряним кана-
лом, який відрізняється тим, що пневмосепара-
ційний та вивідний канали з'єднані між собою жа-
люзійними отворами, направляючи поверхні яких
мають нахил зверху-вниз в бік останнього.2. Повітряний сепаратор за п.1, який відрізняєть-
ся тим, що вивідний канал виконано з вивантажу-
вальним клапаном.

Корисна модель відноситься до області техні-
ки для розділення сипких зернових матеріалів, в
даному випадку для очищення і сортування зерна
повітряним потоком, і може бути використана в
інших областях для вказаних цілей.

Найбільш близький по технічній сутності до
запропонованої корисної моделі є повітряний се-
паратор з вертикальним пневмосепараційним кана-
лом, який перетинає похила направляюча сітка
для виведення очищеного зерна через його задню
стінку [1].

Недоліком такого сепаратора є його незадові-
льна ефективність пневмосепарування внаслідок
погіршення умов розшарування компонентів зер-
нової суміші над сіткою, а також збільшення енер-
гоємності очищення зерна, внаслідок створення
сіткою додаткового опору повітряному потоку.

Метою запропонованої корисної моделі є під-
вищення якості ефективності очищення зерна по-
вітряним потоком за рахунок покращення умов
його сепарації шляхом виведення очищеного зер-
на через задню стінку пневмосепараційного кана-
лу, без похилої направляючої сітки.

Поставлена задача вирішується завдяки тому,
що повітряний сепаратор, який включає бункер,
живильний пристрій, вертикальний пневмосепара-
ційний і вивідний канали, які розміщені по різні
боки задньої стінки першого та осадову камеру з
вивантажувальним клапаном та повітряним кана-
лом, відрізняється тим, що пневмосепараційний та
вивідний канали з'єднані між собою жалюзійними

отворами, направляючи поверхні яких мають нахил
зверху-вниз в бік останнього, який має вивантажу-
вальний клапан.

Така конструкція повітряного сепаратора по-
кращує умови розшарування введеного в пневмо-
сепараційний канал зернового матеріалу і забез-
печує своєчасне виведення з нього очищеного
зерна, в місцях, де воно перетинає задню стінку.
За рахунок цього покращуються умови виділення
легких домішок, що підвищує якість очищення зер-
на, а також зменшується опір повітряному потоку в
пневмосепараційному каналі та енергоємність
сепарації.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням
(див. Фіг.), на якому приведена схема роботи пові-
тряного сепаратора. Він складається з бункера 1,
живильного пристрою 2, пневмосепараційного 3 і
вивідного 4 каналів та осадової камери 5.

Пневмосепараційний 3 та вивідний 4 канали
розміщені по різні боки задньої стінки 7 першого і
з'єднані між собою жалюзійними отворами 8, на-
правляючи поверхні яких мають нахил зверху-вниз
в бік останнього.

Вивідний канал 4, що розміщений за задньою
стіною 7 пневмосепараційного каналу 3, має кла-
пан 9. Осадова камера 5 з'єднана з пневмосепара-
ційним каналом 3 в його верхній частині і має
вивантажувальний клапан 10 та повітряний канал
11.

Сепаратор працює таким чином. Зерновий ма-
теріал, що підлягає очищенню, подається тонким

(19) UA (11) 9042 (13) U

3

9042

4

шаром з бункера 1 через живильний пристрій 2, в пневмосепараційний канал 3. При його русі від передньої стінки 6 до задньої 7, під дією висхідного повітряного потоку він поступово розширюється, утворюючи сприятливі умови для виділення легких домішок, які виносяться в осадову камеру 5. Очищене від легких домішок зерно в пневмосепараційному каналі 3, досягаючи задньої стінки 7, проходить через жалюзійні отвори 8 і поступає в вивідний канал 4. Під дією своєї ваги очищене зерно відчиняє клапан 9 вивідного каналу 4 і вивантажується із сепаратора, а легкі домішки і відпрацьований повітряний потік виходять із осадової камери 5 відповідно, через її вивантажувальний клапан 10 та повітряний канал 11.

Результати досліджень [2], запропонованого повітряного сепаратора показують, що він дозволяє суттєво підвищити рівномірність швидкості повітряного потоку в робочій зоні пневмосепаруючого каналу та зменшити його опір, що забезпечує

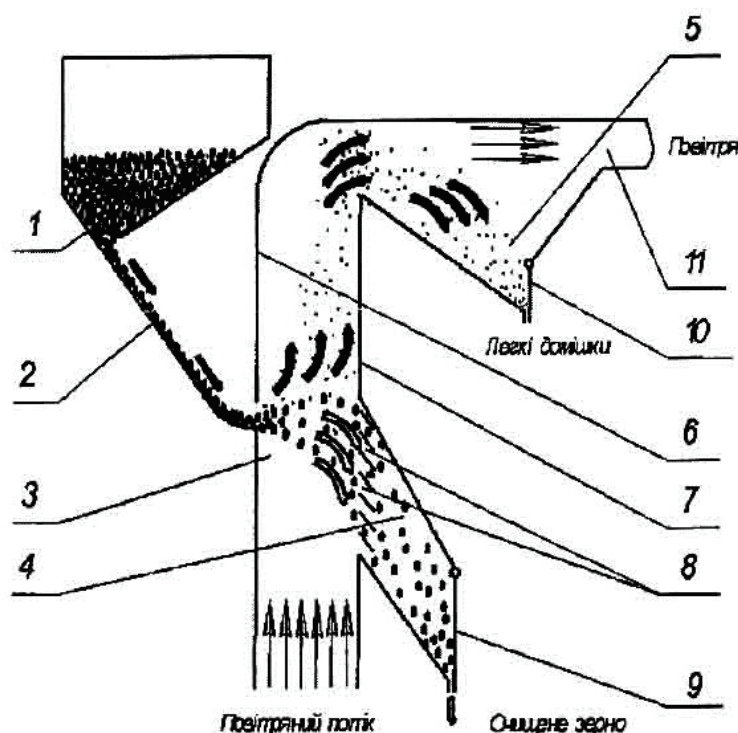
збільшення ефекту сепарації в порівнянні з традиційним виведенням зернового матеріалу як вниз по каналу, так і через задню стінку за допомогою направляючої сітки.

Це забезпечує підвищення як технологічної, так і економічної ефективності процесу сепарації за рахунок покращення якості розділення оброблюваного матеріалу та зменшення енерговитрат.

Джерело інформації:

1. А.Я. Малис, А.Р. Демидов. Машины для очистки зерна воздушным потоком, М., Машгиз, 1962, стр.47.

2. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Косинов М.М., Нестеренко О.В. Підвищення ефективності роботи пневмосепаруючих каналів зерноочисних машин // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 34. -Кіровоград: КНТУ, 2004. -с.84...88.



Фіг.

ДОДАТОК 3

Документи про впровадження результатів досліджень



АКТ

господарчих випробувань повітряного сепаратора з
багаторівневим введенням зернового матеріалу
в ФГ «ЛПК» в 2015-2016 рр.

В умовах ФГ «ЛПК» с. Нова Прага Олександрійського району, Кіровоградської області були проведені господарські випробування пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна, який був встановлений на зерноочисну машину ЗСМ-20.

Сепаратором проводилось очищення озимої та ярої пшениці, ячменю, гречки, соняшника та сої після прямого комбайнування з поля. Випробування проводились протягом липня-жовтня 2015 р. та липня-серпня 2016 р. на території складських приміщень господарства, з метою оцінки технологічної ефективності пневмосепаратора та якісних показників його роботи.

Загальний обсяг проведених робіт та технологічні показники пневмосепаратора приведені в таблиці.

Культура	Об'єм робіт	Середня продуктивність пневмосепаратора, т/год	Повнота розділення, %	Чіткість сепарації, %
2015 р.				
Озима пшениця	252	20...22	68...72	1,5...1,8
Яра пшениця	124	20...22	65...70	1,7...1,9
Ячмінь	78	18...20	63...66	1,8...2
Соняшник	56	12...14	64...68	1,8...2,2
Соя	42	22...24	66...70	1,2...1,6
2016 р.				
Озима пшениця	148	20...22	66...69	1,4...1,7
Яра пшениця	86	20...22	64...67	1,6...2
Ячмінь	62	18...20	62...65	1,6...1,9
Гречка	54	13...15	64...70	1,9...2,4

Під час експлуатації повітряний сепаратор з багаторівневим введенням матеріалу працював без відмов та не потребував додаткового позапланового обслуговування. Переналаштування живильного пристрою при зміні культури не потрібно. За допомогою регулювання ступеня відкриття заслінок бункера живильного пристрою та кількості задіяних рівнів встановлювалась необхідна продуктивність пневмосепаратора.

Використання запропонованого пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна дозволило підвищити якісні показники сепарації в порівнянні з базовою машиною на 16...19 % при попередньому очищенні та на 18...22% при первинному очищенні зернового матеріалу.

Доцент каф. СГМ КНТУ

Доцент каф. СГМ КНТУ

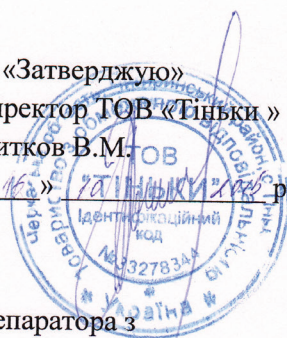
Асистент каф. СГМ КНТУ

О.М. Васильковський

Р.В. Кісільов

О.В. Нестеренко

«Затверджую»
 Директор ТОВ «Тіньки»
 Житков В.М.
 « 16 » жовтня 2015 р.



АКТ

Господарчих випробувань пневмосепаратора з
 живильним пристроєм для багаторівневого введення
 зернового матеріалу в ТОВ «Тіньки» в 2015 р.

Даний акт складений про те, що в господарстві ТОВ «Тіньки», Чигиринського району, Черкаської області проводились випробування пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу. Експериментальний зразок пневмосепаруючого каналу з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу був виготовлений на основі досліджень здобувача Нестеренка О.В. в лабораторії кафедри сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету та встановлений на зерноочисну машину А1-БСМ-6.

Випробування проводились з 04.07.2015 по 16.09.2015 р. в складських приміщеннях фермерського господарства ТОВ «Тіньки», при попередньому очищенні озимої пшениці та соняшника зібраних комбайнами «JOHN DEERE S670i», «JOHN DEERE W540» методом прямого комбайнування.

В результаті випробувань вдосконаленого сепаратора А1-БСМ-6 в господарстві ТОВ «Тіньки» визначено, що при попередньому очищенні зібраного зерна озимої пшениці засміченістю легкими домішками – 16...18 %; дрібними – 3,9...4,6 %; крупними – 2,7...3 %, при вологості (до 18%) дозволяє отримати повноту розділення – 53...55 % з кількістю повноцінного зерна відходах – 1,5...1,9%.

При попередньому очищенні соняшника засміченістю легкими домішками – 13...17 %; дрібними – 3,4...4,1 %; крупними – 3,6...4,2 %, при вологості (до 19%) дозволяє отримати повноту розділення – 54...56 % з кількістю повноцінного зерна відходах – 1,7...2 %;

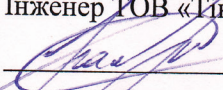
Середня продуктивність зерноочисної машини складала: при очищенні озимої пшениці – 28 т/год; при очищенні насіння соняшника – 14 т/год.

Застосування запропонованого пневмосепаруючого каналу з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу дозволило підвищити якісні показники пневмосепарації на 14...18%.

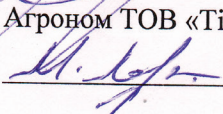
За період випробувань перероблено 1425 т зерна пшениці та 658 т насіння соняшника. Під час роботи відмов пневмосепаратора не виникало.

Акт складений « 15 » жовтня 2015 р.

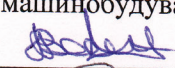
Інженер ТОВ «Тіньки»:

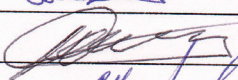
 Б.В. Касяненко

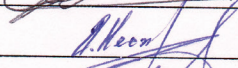
Агроном ТОВ «Тіньки»:

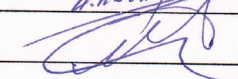
 М.П. Лободенко

Співробітники кафедри сільськогосподарського
 машинобудування КНТУ:

 О.М. Васильковський

 С.М. Мороз

 О.В. Нестеренко

 І.О. Гольша

«Затверджую»
Директор ДП «ДГ «Ставидлянське»
Кіровоградської державної дослідної
станції Національної академії аграрних
наук України»

« 19 » 09 2016 р. Бабак С.С.

АКТ

господарчих випробувань насіннеочисної машини «PETKUS K 531 GIGANT»
з ПСК для багаторівневого введення зерна
в ДП «ДГ «Ставидлянське» Кіровоградської державної дослідної
станції Національної академії аграрних наук України» в 2016 р.

Даний акт складений про те, що в господарстві ДП «ДГ «Ставидлянське» Кіровоградської державної дослідної станції Національної академії аграрних наук України» проводились випробування насіннеочисної машини «PETKUS K 531 GIGANT» з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна. Експериментальний зразок пневмосепаруючого каналу з живильним пристроєм був виготовлений на основі досліджень здобувача Нестеренка О.В. в лабораторії кафедри сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету.

Випробування проводились з 25.08.2016 по 14.09.2016 р. на ДП «ДГ «Ставидлянське» Кіровоградської державної дослідної станції Національної академії аграрних наук України».

Живильний пристрій експериментального пневмосепаратора був встановлений на насіннеочисну машину «PETKUS K 531 GIGANT», на якому проводилось первинне очищення насіння озимої пшениці сорту «Наталка» та насіння сої сорту «Ювілейна» врожаю 2016 року.

Виробничі випробування вдосконаленої машини «PETKUS K 531 GIGANT» показали, що його використання при первинному очищенні зерна пшениці засміченістю легкими домішками – 5...8 %; дрібними – 3,3...3,7 %; крупними – 2,0...2,2 %, при вологості до 17 % дозволяє отримати повноту розділення – 82...86 % з кількістю повноцінного зерна у відходах – 0,3...0,6%.

При первинному очищенні насіння сої засміченістю легкими домішками – 7...10 %; дрібними – 2,5...3,3 %; крупними – 1,6...2 %, при вологості до 18% дозволяє отримати повноту розділення – 80...84 % з кількістю повноцінного зерна у відходах – 0,4...0,7 %.

Середня продуктивність вдосконаленої зерноочисної машини складала 2,6...3,2 т/год.

В результаті застосування багаторівневого введення зернового матеріалу в насіннеочисній машині «PETKUS K 531 GIGANT» при первинному очищенні, якісні показники пневмосепарації підвищились на 16...19% в порівнянні з базовою машиною.

За період випробувань перероблено 165 т насіння пшениці та 86 т насіння сої. Під час роботи насіннеочисної машини з вдосконаленим живильним пристроєм відмов та відхилень від усталеного режиму роботи не виникало.

Акт складений « 19 » 09 2016 р.

Інженер ДП «ДГ «Ставидлянське»:

С.В.Приходько

Агроном ДП «ДГ «Ставидлянське»:

В.Г.Стаднік

Співробітники кафедри сільськогосподарського машинобудування КНТУ:

Доцент С.М. Лещенко

Доцент Д.І. Петренко

Асистент О.В. Нестеренко

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Левченко О.М.
(підпис)
« 21 » 04 2017 р.



А К Т

про використання результатів НДР у навчальному процесі
Центральноукраїнського національного технічного університету

Результати за темою: «Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з

багаторівневим введенням зернового матеріалу»
(вказати найменування результатів НДР)

виконані на кафедрі Сільськогосподарського машинобудування
(найменування кафедри)

за темою: «Підвищення ефективності роботи пневмосистем зерноочисних машин»,

№24.Д108, державний реєстраційний номер 0108U010432
(найменування НДР, № теми, реєстраційний № в УкрІНТЕІ)

Вказані результати включені до курсу лекцій: «Основи наукових досліджень»; «Теорія,
(назва: курсу лекцій, методичних рекомендацій та вказівок по
конструкція і розрахунок сільськогосподарських машин»; «Технологія післязбиральної обробки
сільськогосподарської продукції».
виконанню лабораторних, курсових та дипломних робіт,

МВ з курсу «Фізико-технологічні властивості зернових матеріалів»; МВ для виконання
наочних посібників; обґрунтуванні та написанні дисертаційних робіт і розділів до них аспірантами)

лабораторних робіт з курсу «Основи наукових досліджень»; МВ для виконання лабораторних
робіт з курсу «Теорія, конструкція і розрахунок сільськогосподарських машин».

Завідувач кафедри, у навчальному
процесі якої використовуються
результати НДР
« 21 » 04 2017 р.

(підпис)

Свірень М.О.
(ПІБ)

Декан факультету
« 21 » 04 2017 р

(підпис)

Сало В.М.
(ПІБ)

Начальник навчального відділу
« 21 » 04 2017 р.

(підпис)

Кондратець Л.І.
(ПІБ)

«Затверджую»

Проректор з наукової роботи

Центральноукраїнського
національного технічного
університету

О.М. Левченко

« 08 » 2017 р.

АКТ

передачі документації для виготовлення
повітряного сепаратора з живильним пристроєм
для багаторівневим введенням зернового
матеріалу

Для впровадження у виробництво пневмосепаратора з багаторівневим введенням зернового матеріалу в зону очищення, Центральноукраїнський національний технічний університет передає а ПП «Савицький М.І.» приймає копії креслень, запропонованого асистентом кафедри сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ Нестеренком О.В. повітряного сепаратора зерна з вдосконаленим живильним пристроєм.

Додаток:

1. Перелік та креслення складальних одиниць і деталей машини;
2. Інформацію про режими роботи сепаратора;
3. Інструкція з експлуатації та технічного обслуговування.

Документацію передав:

доц. каф. СГМ ЦНТУ

С.М. Лещенко

Документацію прийняв:

директор ПП «Савицький М.І.»



М.І. Савицький

ДОДАТОК І

Список публікацій здобувача

НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Васильковський М.І. Дослідження роботи пневмосепаруючого каналу на фізичній моделі / М.І. Васильковський О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, О.В. Нестеренко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград, 2006. Вип.17. С. 44–48.

2. Нестеренко О.В. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / О.В. Нестеренко, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко, Д.В. Богатирьов // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград: КНТУ, 2012. Вип. 25; Ч.1. С.49-53.

3. Нестеренко А. Теоретическое обоснование качественных показателей процесса пневмосепарации для многоуровневого введения зерна / А. Нестеренко, С. Лещенко, Д. Петренко, Д. Богатырёв, О. Кислун. // MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture. 2013. Vol.15. No.2. S. 93 – 98.

4. Нестеренко О.В. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введенні зерна / 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.

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. : ред.-вид. відділ ЛНТУ. Луцьк, 2015. Вип. 32. С. 143–151.

6. Nesterenko O.V. Analytical study of separation efficiency of grain in vertical pneumatic separating channel / 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.

7. Нестеренко О.В. Обґрунтування параметрів живильного пристрою для багаторівневого введення зернового матеріалу у вертикальний пневмосепаруючий канал / О.В. Нестеренко, Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.Я. Гончарова // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. Луцьк: ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2016. Вип. 34. С. 92–103.

8. Нестеренко О.В. Дослідження безконтактного руху легких домішок у вертикальному пневмосепаруючому каналі / О. В. Нестеренко, Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, С.Я. Гончарова, Ю.В. Мельник // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 46. С. 271 – 279.

НАУКОВІ ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Нестеренко О.В. Дослідження якісних показників роботи пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зерна // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2013. С. 135–137.

2. Нестеренко О.В. Аналіз руху зернової частки в повітряному потоці // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 108–110.

3. Нестеренко О.В. Дослідження якісних показників пневмосепарації при багаторівневому введенні зерна // Тези V всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційні технології в АПК». Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 84–86.

4. Нестеренко О.В. Дослідження основних параметрів направляючої поверхні живильного пристрою пневмосепаратора // Матеріали IV Міжнародної

науково-практичної конференції «Крамаровські читання». К: НУБіП України, 2017. С. 129 – 131.

**НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ДОДАТКОВО ОПУБЛІКОВАНІ
ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Пат. 8058А Україна, МПК В 02В1/00. Повітряний сепаратор. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна).- № u200500190; Заявл. 10.01.05; Опубл. 15.07.2005. Бюл. №7.
2. Пат. 9042 Україна, МПК В 02 В 1/00. Повітряний сепаратор. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В., Косінов М.М. (Україна). № 20041008509; Заявл. 19.10.2004; Опубл. 15.09.2005. Бюл. №9.
3. Пат. 9586А Україна, МПК В 02 В 1/00. Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна). № а200500209; Заявл. 10.01.05; Опубл. 17.10.2005. Бюл. №10.