МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бредихін Вадим Вікторович

УДК 631.363.3

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

Науковий консультант: **Алфьоров Олексій Ігорович**
Доктор технічних наук, професор

Кропивницький - 2023

АНОТАЦІЯ

Бредихін В.В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (Технічні науки). – Центральноукраїнський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Кропивницький, 2023.

В дисертації комплексно вирішено актуальну науково - практичну проблему підвищення продуктивності та якості процесу розділення насіннєвих матеріалів (НМ) за густиною насіння, яка є визначальною для ефективності завершального етапу післязбиральної обробки зерна при отриманні високоякісного НМ.

На підставі системного аналізу та комплексної оцінки підходів, машин та обладнання, що реалізують процес, обґрунтовано перспективний напрям підвищення ефективності процесу розділення НМ за густиною насіння у вібропневморозрідженому шарі насіння.

Створено дво- та тривимірні механіко-математичні моделі процесу розділення насіннєвих матеріалів, які базуються на концепції та аналогії гідродинаміки багатофазних середовищ. У механіко - математичній моделі насіннєвий матеріал представлено як вібропневморозріджений шар, що складається з двох фаз: дискретна фаза – утворена твердими частинками (зернівками) і неперервна фаза – газоподібне середовище (повітря) та враховано внутрішньошарові процеси і взаємозв’язки між частинками дискретної фази та газоподібного середовища, фізико-механічні властивості частинок (зернівок) та їх відмінність за власною густиною з конструктивними параметрами і кінематичними режимами сепаруючих машин.

Запропоновано новий метод визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості, що є базисом для побудови тримірної механіко-математичної моделі гідродинаміки багатофазного середовища, що рухається та розшаровується на плоскій або циліндричній повітропроникній робочій поверхні. Визначено, що відносна швидкість частинок дискретної фази змінюється гармонічно за часом з частотою коливань робочої поверхні, а її амплітуда складним чином залежить від фізико-механічних властивостей НМ, швидкості повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару і ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості.

Досліджено дотичні напруження, що виникають на твердій поверхні деки, з урахуванням прослизання частинок дискретної фази. Визначено граничні умови на межі розподілу дискретних фаз знаходяться у неперервній швидкості і неперервності напружень.

Імітаційним моделюванням обґрунтовано та експериментально підтверджено комплексний вплив на показник чистоти (*Purity*) основної фракції швидкості повітряного потоку (υ), частоти (ν) і амплітуди (A) коливань деки пневмосортувального столу, повздовжнього (α) й поперечного (β) кутів її нахилу, що дозволило встановити діапазони раціональних значень відмічених параметрів: пшениця: υ = 1,3 – 1,5 м/с, ν = 940 кол./хв, A = 5 мм, α = 5 – 7 град., β = 5 – 7 град.; кукурудза: υ = 1,3 – 1,6 м/с, ν = 940 кол./хв, A = 5 мм, α = 4 – 6 град., β = 3 – 6 град.; соняшник: υ = 1,2 – 1,4 м/с, ν = 940 кол./хв, A = 5 мм, α = 4 – 6 град., β = 5 – 6 град.; соя: υ = 1,2 – 1,4 м/, ν = 940 кол./хв, A = 6 мм, α = 5 – 7 град., β = 4 – 6 град. Ці значення справедливі за умови використання під час сепарування матеріалів відповідних раціональних значень частоти й амплітуди коливань деки пневмосортувального стола та поздовжнього й поперечного кутів її нахилу.

Розроблена механіко-математична модель розділення НМ за густиною насіння на циліндричній повітропроникній робочій поверхні моделює асиметричний, пошаровий, усталений рух НМ товщиною n -го кільцевого шару частинок. Імітаційним моделюванням обґрунтовано та

експериментально підтверджено залежність чистоти (*Purity*) основної фракції НМ від параметрів процесу, що дозволило визначити раціональні значення швидкості повітряного потоку (υ) та частоти коливань робочої поверхні (ν) вібропневмовідцентрових сепаруючих машин: пшениці υ = 1,2 – 1,5 м/с, ν = 4500 – 5100 кол./хв; соняшнику υ = 1,3 – 1,5 м/с, ν = 4500 – 5000 кол./хв; сої υ = 1,3 – 1,6 м/с, ν = 5000 – 5500 кол./хв.

Розкрито фізичну сутність та вдосконалено модельні підходи що до динамічної взаємодії компонентів НМ з повітряним потоком та робочими органами сепаруючих машин. На основі проведених експериментальних досліджень верифіковано результати розроблених теоретичних моделей та узгоджено технічне забезпечення розділення НМ пшениці, кукурудзи, соняшнику та сої з раціональними конструктивними параметрами та кінематичними режимами сепаруючих машин.

Визначено механіко-технологічні підстави збільшення інтенсивності технологічних процесів розділення НМ за густиною насіння вібропневматичними та вібропневмовідцентровими сепаруючими машинами і на цій основі розроблено нову сепаруючу машину та удосконалено технологічну лінію підготовки високоякісного НМ. Обґрунтовано раціональні конструктивні параметри інтенсифікаторів хвилеподібного типу, що встановлюють на робочі поверхні пневмосортувального столу: крок встановлення H = 350 – 450 мм; для пшениці: висота хвилеподібного інтенсифікатору h = 10 – 12 мм, висота прорізу хвилі h_H = 2 – 3,5 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм; для кукурудзи: h = 15 – 20 мм, висота прорізу хвилі h_H = 3 – 8,5 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм; для соняшнику: h = 10 – 15 мм, висота прорізу хвилі h_H = 3 – 4,5 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм; для сої: h = 15 – 20 мм, висота прорізу хвилі h_H = 5,5 – 7 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм, що уможливило підвищити на 25 % продуктивність машин та довести чистоту основної фракції до 96 %.

Основні результати досліджень використовуються у навчальному процесі підготовки здобувачів вищої освіти Державного біотехнологічного

університету (м. Харків) для підготовки фахівців на I, II та III рівнях вищої освіти за спеціальностями: «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування», «Агроінженерія».

Результати дослідження прийнято для модернізації і удосконалення ПСС-3,5 та розробки ПСС-10 шляхом впровадження інтенсифікаторів хвилеподібного типу, та впроваджено на ПрАТ ХМЗ (Хорольський механічний завод, м. Хорол). Результати досліджень використано підприємствами, що спеціалізуються на переробці зерна та науково-дослідними і проектними установами для розробки нових, і модернізації існуючих машин, обладнання, технологічних ліній з підготовки насіння: на ПрАТ «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків); ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ); ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп); ТОВ «Батьківщина» (Сумська обл., с. Карабутове); ФОП Знайдюк Василь Григорович (м. Чернігів); впроваджено у процес підготовки НМ для закладання в Національне сховище на довготривале зберігання «Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва» Національної академії аграрних наук України.

Розраховано техніко-економічну ефективність показників впровадження результатів досліджень у виробничі процеси підприємств переробної галузі. Визначено, що прогнозований рівень алокативної ефективності становить 40…60 млрд грн. в річному обчисленні в загальнодержавному масштабі. Сумарний річний економічний ефект від впровадження рекомендацій щодо раціональних режимів експлуатації сепаруючих машин становить 1,585 млн. грн. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень у підприємствах переробної галузі України становить з розрахунку на 1т НМ 98грн/т.

Ключові слова: насіннєвий матеріал, сепаруюча машина, пневмосортувальний стіл, вібропневмовідцентровий сепаратор, вібропневматичне розділення, робоча поверхня, густина насіння, псевдорозріджений шар, псевдорідина, внутрішньошарові процеси, частинка.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації:

монографії:

1. Тищенко Л.Н., Мазоренко Д.И., Пивень М.В., Харченко С.А., **Бредихин В.В.**, Мандрыка А.В. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография. Харьков, 2010. 359 с.

2. **Бредихін В.В.** Теоретичні основи вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння: монографія. Харків, 2017. 81 с.

3. Ольшанський В.П**., Бредихін В.В.**, Лук'яненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків, 2017. 802 с.

4. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Ольшанський О.В., **Бредихін В.В.** Динаміка імпульсно навантажених нелінійних осциляторів: монографія. Харків, 2022. 262 с.

5. **Бредихін В.В.**, Богомолов О.В., Кісь-Коркіщенко Л.В., Сліпченко М.В., Іващенко С.Г., Ірклієнко В.І., Черняєв О.О., Тікунов С.Р. Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом: монографія. Харків, Диса+, 2023. 401 с.

Статті у фахових виданнях України, інших держав та у виданнях включених до міжнародних наукометричних баз:

6. Тищенко Л.Н., **Бредихин В.В.**, Харченко С.А. Вибропневмоцентробежное разделение семенной смеси с учетом влияния рифлей. Вісник ХНТУСГ. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв. 2008. Вип. 74. С. 12 – 18.

7. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., Харченко С.А. **Бредихин В.В.** Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решетами. Вісник ХНТУСГ: Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. 2009. Вип. 88. С. 34 – 44.

8. **Бредихін В.В.**, Тіщенко Л.М., Півень М.В. До питання математичного моделювання процесу вібропневматичного розділення зернових сумішей. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2013. № 140. С. 45 – 59.

9. **Бредихин В.В.**, Тищенко Л.Н., Пивень М.В. Определение эффективного коэффициента динамической вязкости зерновой смеси на рабочей поверхности пневмосортировального стола. MOTROL. 2013. Vol. 15. №7. P. 191 – 198.

10. **Бредихин В.В.** К уравнению движения зерновой смеси. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. № 148. С. 254 – 257.

11. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., **Бредихин В.В.** Исследование внутрислоевого движения частиц зерновых смесей. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. №. 152. С. 5 – 11.

12. **Бредихин В.В.**, Пивень М.В. К уравнению послоевого движения псевдоожиженной зерновой смеси. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2015. № 156. С. 204 – 208.

13. **Бредихін В.**, Шевченко В. К математической модели разделения зерновой смеси по плотности семян цилиндрическими рабочими поверхностями. MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. 2015. Т. 17. № 7. P. 39 – 44.

14. **Бредихин В.В.** К уравнению движения частиц при моделировании процесса сепарации зерновых смесей. Вісник ХНТУСГ. 2016. Вип. 143. С. 45 – 47.

15. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., **Bredykhin V.**, Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Т. 2. № 7. P. 63 – 69. ***(Scopus)*** *(авторський внесок полягає в обґрунтування оптимальних параметрів процесу сепарування циліндричними робочими поверхнями).*

16. **Бредихин В.В.**, Харченко С.А. К уравнению движения частиц при моделировании процесса сепарации зерновых смесей вибропневматическими сепараторами. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2017. Вип. 47/2. С. 21 – 25.

17. **Vadym Bredykhin**, Petro Gurskyi, Oleksiy Alfyorov, Khrystyna Bredykhina, Andrey Pak. Improving the mechanical-mathematical model of grain mass separation in a fluidized bed. European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 3/1. № 111. P. 79 – 86. ***(Scopus)*** *(авторський внесок полягає у моделюванні процесу сегрегації НМ за густиною насіння).*

18. **Bredykhin Vadim**, Pak Andrey, Gurskyi Petro, Denisenko Sergey, Bredykhina Khrystyna. Improving the mechanical mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. Improving the Mechanical Mathematical Model of Pneumatic Vibration Centrifugal Fractionation of Grain Materials Based on Their Density. 2021. Т. 4/1. № 112. P. 54 – 61. ***(Scopus)*** *(авторський внесок полягає у моделюванні процесу сегрегації НМ за густиною насіння).*

19. **Бредихін В.В.** Шляхи підвищення економічної ефективності процесу підготовки насіннєвого матеріалу. *Український журнал прикладної економіки та техніки.* Західноукраїнський національний університет, 2023. № 3. С. 109 – 144. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-2-15

20. **Bredykhin Vadym**, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyy Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018 (***Scopus***) (*авторський внесок полягає у розробці математичної моделі калібрування насіннєвих матеріалів*).

21. Slipchenko Maksym, **Bredykhin Vadym**, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Alfyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425 ***(Scopus)*** *(авторський внесок полягає у дослідженні нестаціонарні коливання осциляторів при дії тривалих і короткочасних імпульсів).*

22. Slipchenko M., **Bredykhin V.**, Pak A., Gurskyi P., Alfyorov O., Pak A. (2023). Constructing f physical-mathematical model of grain mass self-heating by a rod site of rectangular cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/8 №125, P. 24 – 30. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287391 ***(Scopus)*** (авторський внесок полягає у розробці математичної моделі розділення насіннєвих матеріалів).

Праці, що відображають практичні результати роботи:

23. **Бредихін В.В.**, Мезенцев В.О., Черняєв О.О. Прилад для розділення насіннєвих матеріалів за густиною: пат. UA 127393 Україна: МПК (2018.01) B03B 4/00 B*07*B *4/08* (2006.01) B*07*B *9/02* (2006.01); заявл. 16.03.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 4 с.

24. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р., Мезенцев В.О. Решето для очищення зернового вороху з отворами у вигляді овалу Кассіні: пат. UA

133625 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 10.12.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. №7. 4 с.

25. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р., Мезенцев В.О. Жолобчасте сито з отворами у вигляді овалу Кассіні: пат. UA 145733 Україна: МПКB07B 1/46 (2006.01); заявл.31.08.2020; опубл.29.12.2020, Бюл. № 24. 4 с.

26. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р., Мезенцев В.О. Сито для калібрування сипких матеріалів: пат. UA 150092 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 16.08.2021; опубл. 30.12.2021, Бюл. № 52. 4 с.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ЯКІ ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ:

Монографії:

27. F. Peretsevoy, P. Gurskyi, V. ladyka, M. Ianchyk. I. Krapivnytska, S. Omelchenko, **V. Bredykhin**, V.Kis, T. Marenkova, Z. Garncarec Food technology using structurants: The monograph. Sumy-Kharkiv-Kyiv-Wroclaw, 2021. 250 p.

28. Кунденко М.П., Єгорова Ю.О., **Бредихін В.В.**, Єгоров О.Ю. Метрологічне забезпечення електронних систем вимірювання електрофізичних параметрів: монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2021. 198 с.

Матеріали і тези конференцій:

29. **Бредихин В.В.** Исследование влияния распределения и силы воздушного потока на параметры процесса пневматического разделения зерновых смесей. Матеріали IX-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Кіровоград: КНТУ. 2013. Вип. 1. С. 103 – 115.

30. **Бредихін В.В.** Перспективи розвитку машинних технологій та обладнання для розділення зернових матеріалів за густиною насіння. *The 9th international youth conference* (New York, 10 may), 2019. P. 14 – 20.

31. Тікунов С.Р., Сметанкіна Н.В., **Бредихін В.В.**, Мезенцев В.О. Раціональне проектування решіт сепараторів із замкненим перерізом отвору. *Dynamics, strength and modelling in mechanical engineering:* тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 05-08 жовтня 2020 р.). Харків, 2020. С. 283 – 284.

32. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р. Перфоровані поверхні з отворами у формі овалу Кассіні. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції.* (Харків, 13 листопада 2020 р.). Харків: ХНТУСГ. 2020. С. 52 – 53.

33. Тікунов С.Р., **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В. Дослідження пропускної спроможності сепаруючих робочих поверхонь. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 25-26 листопада 2021 р.). Харків: ДБТУ, 2021. С. 76 – 77.

34. Тікунов С.Р., **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В. Класифікація робочих поверхонь з отворами у формі овалу Кассіні: *Digital transformations of modernity:* multidisciplinary international scientific-practical conference. (Coimbra, Portugal, 24 january 2022.). Portugal, 2022. P. 110 – 111.

35. **Bredykhin V.** Improving the quality of the seed production process. *Innovations and prospects in modern science.* (Stocholm, 13 – 15 March 2023 y.). Stocholm, 2023. P. 64 – 67.

36. **Бредихін В.В.**, Макаренко О.В., Повассар Г.С. До процесу ощадливого розділення насіннєвого матеріалу для отримання насіння з підвищеним біологічним потенціалом. Підвищення ефективності процесу підготовки насіннєвого матеріалу зернових культур. *Технічний прогрес в АПВ*: матеріали наук.-практ. конф. (Харків, 9 – 10 травня 2023 р.). Харків: ДБТУ, 2023. С. 21 – 23.

37. **Бредихін В.В.** До питання підвищення надійності процесу виробництва насіння. *Проблеми надійності та міцності машин і споруд:*

матеріали Всеукраїнської наук.- практ. конф. (Харків, 11 – 12 травня 2023 р.) Харків, 2023. С. 7 – 9.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

38. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., **Бредихин В.В.** Обоснование процесса сегрегации зерновых смесей при просеивании виброцентробежными решетами. MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. 2013. Vol. 15. P. 104 – 111.

39. Харченко С.О., Ольшанський В.П., Харченко Ф.М., **Бредихін В.В.** Визначення динаміки зернової суміші гречки при її просіюванні через отвори плоских віброрешет. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2017. Т. 47(1). С. 240 – 248.

40. Мезенцев В.А., **Бредихин В.В.**, Черняев А.А., Ильина Н.А., Кобызева Л.Н., Безуглая О.Н. Влияние размерных характеристик частиц на толщину семенной оболочки у семян нута. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. Харків, 2018. Вип. 194. С. 90 – 100.

ANNOTATION

Bredykhin V.V. Scientific basis of processes of vibropneumatic separation of seed materials by seed density. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

The dissertation on competition the f scientific degree of doctor of technical sciences on the specialty 05.05.11 – machines and means of mechanization of agricultural production. Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

In the dissertation solves an important scientific and technical problem of intensification and increasing the efficiency of the process of separating seed material by seed density in a fluidized bed.

On the basis of the system analysis and comprehensive assessment of the approaches, machines and equipment that implement the process, the prospective

direction of increasing the efficiency of the process of separation of SM by seed density in the vibro-pneumo-thinned layer of seeds is substantiated.

Two-dimensional and three-dimensional mechano-mathematical models of the process of separation of seed materials have been created, which are based on the concept and analogy of hydrodynamics of multiphase media. In the mechano-mathematical model, the seed material is represented as a vibro-pneumofluidized layer consisting of two phases: a discrete phase - formed by solid particles (grains) and a continuous phase - a gaseous medium (air). The mechano-mathematical model takes into account intralayer processes and relationships between particles of the discrete phase and the gaseous medium, physical and mechanical properties of particles (grains) and their difference in terms of their own density and structural parameters and kinematic modes of separating machines. A new method for determining the effective coefficient of dynamic viscosity is proposed, the determination of which is the basis for building a three-dimensional mechano-mathematical model of the hydrodynamics of a multiphase medium that moves and stratifies on a flat or cylindrical air-permeable working surface. It was determined that the relative speed of the particles of the discrete phase changes harmonically over time with the frequency of oscillations of the working surface, and its amplitude depends in a complex way on the physical and mechanical properties of the SM, the speed of the air flow on the free surface of the fluidized bed and the effective coefficient of dynamic viscosity. To obtain an equation that connects the coefficient of dynamic viscosity and the physical and mechanical properties of SM, we will use the principle of equivalence of pulses of forces of resistance to particle motion in different media.

It was determined that, considering the continuous phase of SM as a fluidized layer of particles, the movement of discrete phase particles mainly occurs in the direction of the air flow through the channels that are formed in the fluidized layer.

The tangential stresses arising on the solid surface of the deck were studied, taking into account the slippage of particles of the discrete phase. It was determined

that the boundary conditions at the boundary of the distribution of discrete phases are continuous velocity and continuity of stresses.

The analysis of the developed mechano-mathematical model of SM separation by seed density on a flat working surface made it possible to establish: when the angle of inclination of the working surface to the horizontal plane is close to zero, terms with a quadratic dependence on the x_3 coordinate can be neglected; with the friction coefficient f due to the working surface approaching zero, the dominant term will be the term with a quadratic dependence on the coordinate x_3; at $f \to 0$ and $\alpha \to 0$, the velocities of discrete phase particles become so small that they can be neglected. It should also be noted that the term with a quadratic dependence on the coordinate x_3 depends only on the physical parameters of the particles of the corresponding discrete and continuous phases.

Simulation modeling substantiated and experimentally confirmed the complex influence on the indicator of purity (*Purity*) of the main fraction of air flow speed (υ), frequency (ν) and amplitude (A) of oscillations of the deck of the pneumatic sorting table, longitudinal (α) and transverse (β) angles of its inclination, which made it possible to establish the ranges of rational values of the noted parameters: wheat: υ = 1,3 – 1,5 m/s ν = 940 fl./min, A = 5 mm, α = 5 – 7 deg., β = 5 – 7 deg.; corn: υ = 1,3 – 1,6 m/s, ν = 940 fl./min, A = 5 mm, α = 4 – 6 deg., β = 3 – 6 deg.; sunflower: υ = 1,2 – 1,4 m/s, ν = 940 fl./min, A = 5 mm, α = 4 – 6 deg., β = 5 – 6 deg.; soy: υ = 1,2 – 1,4 m/s, ν = 940 fl./min, A = 6 mm, α = 5 – 7 deg., β = 4 – 6 deg. These values are valid under the condition of using appropriate rational values of the frequency and amplitude of oscillations of the pneumosorting table deck and the longitudinal and transverse angles of its inclination during the separation of materials.

The developed mechano-mathematical model of separation of SM by seed density on a cylindrical air-permeable working surface simulates asymmetric, layer-by-layer, steady movement of SM of the thickness of the nth annular layer of particles. Simulation modeling substantiated and experimentally confirmed the dependence of the purity (*Purity*) of the main fraction of SM on the process

parameters, which made it possible to determine the rational values of the speed of the air flow (υ) and the frequency of oscillations of the working surface (ν) of vibro-pneumocentrifugal separating machines: wheat: υ = 1,2 – 1,5 m/s, ν = 4500 – 5100 fl./min; sunflower: υ = 1,3 – 1,5 m/s, ν = 4500 – 5000 fl./min; soy: υ = 1,3 – 1,6 m/s, ν = 5000 – 5500 fl./min.

The rational design parameters of the wave-type intensifiers installed on the working surfaces of the pneumatic sorting table are substantiated. The technical and economic efficiency of the indicators of the implementation of research results into the production processes of enterprises in the processing industry has been calculated.

The main results of the research are given in the monographs, which are used in the educational process of students of higher education of the State Biotechnology University (Kharkiv city) for the training of specialists at the I, II and III levels of higher education in the specialties: "Applied Mechanics", "Industrial Mechanical Engineering", "Agroengineering".

The results of studies on the intensification of the process of preparing high-quality SM were used by grain processing, SM preparation enterprises and research and design institutions for the development of new and modernization of existing machines, equipment, technological lines for SM preparation, introduced into the process of preparing SM for depositing in the National repository for long-term storage of the "Institute of plant breeding named after V.Y. Yuryev" of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine.

The total annual economic effect of the implementation of the recommendations on rational modes of operation of separating machines is 1.585 million UAH. The expected annual economic effect from the implementation of the results of dissertation research in enterprises of the processing industry of Ukraine amounts to UAH 98 based on 1 ton of SM.

Keywords: seed material, separating machine, pneumatic sorting table, vibro-pneumocentrifugal separator, vibropneumatic separation, working surface, seed density, fluidized bed, fluid, intra-bed processes, particle.

LIST OF PUBLISHED PAPERS ON THE DISSERTATION

Scientific papers in which the main results of the dissertation are published:

monographs:

1. Tyshchenko L.N., Mazorenko D.Y., Pyven M.V., Kharchenko S.A., **Bredykhin V.V.**, Mandryka A.V. Modeling of grain separator processes: monograph. Kharkiv, 2010. 359 p.
2. **Bredykhin V.V.** Theoretical foundations of vibro-pneumocentrifugal separation of seed materials by seed density: monograph. Kharkiv, 2017. 81 p.
3. Olshansky V.P., **Bredykhin V.V.**, Lukyanenko V.M., Piven M.V., Slipchenko M.V., Kharchenko S.O. Theory of grain separation: monograph. Kharkiv, 2017. 802 p.
4. Olshanskyi V.P., Slipchenko M.V., Olshanskyi O.V., **Bredykhin V.V.** Dynamics of pulse-loaded nonlinear oscillators: monograph. Kharkiv, 2022. 262 p.
5. **Bredykhin V.V.**, Bogomolov O.V., Kis-Korkishchenko L.V., Slipchenko M.V., Ivashchenko S.G., Irklienko V.I., Chernyaev O.O., Tikunov S.R. Scientific basis of thrifty preparation of seeds with improved biological potential: monograph. Kharkiv, Disa+, 2023. 401 p.

Articles in professional publications of Ukraine and other countries and in publications included in international scientometric databases:

6. Tyshchenko L.N., **Bredykhin V.V.**, Kharchenko S.A. Vibropneumocentrifugal separation of the seed mixture taking into account the influence of the grooves. Herald of KHNTUSG. Modern directions of technology and mechanization of processing and food production processes. 2008. V. 74. P. 12 – 18.
7. Tyshchenko L.N., Pyven M.V., Kharchenko S.A. **Bredykhin V.V.** Study of regularities of vibroviscosity of grain mixtures during separation by cylindrical vibrocentrifugal sieves. Bulletin of KHNTUSG: Modern directions of technology and mechanization of processing and food production processes. 2009. Vol. 88. P. 34 – 44.

8. **Bredykhin V.V.**, Tishchenko L.M., Piven M.V. To the issue of mathematical modeling of the process of vibro-pneumatic separation of grain mixtures. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. 2013. No. 140. P. 45 – 59.

9. **Bredykhin V.V.**, Tyshchenko L.N., Pyven M.V. Determination of the effective coefficient of dynamic viscosity of the grain mixture on the working surface of the pneumatic sorting table. MOTROL. 2013. P. 180 – 191.

10. **Bredykhin V.V.** To the equation of motion of grain mixture. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. 2014. № 148. P. 254 – 257.

11. Tyshchenko L.N., Pyven M.V., **Bredykhin V.V.** Investigation of intralayer movement of particles of grain mixtures. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. 2014. No. 152. P. 5 – 11.

12. **Bredykhin V.V.**, Pyven M.V. To the equation of the layer-by-layer motion of a fluidized grain mixture. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. 2015. № 156. P. 204 – 208.

13. **Bredikhin V.**, Shevchenko V. K mathematical model of grain mixture separation by seed density by cylindrical working surfaces. MOTROL. Motorizacja i Energetyka Rolnictwa. 2015. Vol. 17. № 7. P. 39 – 44.

14. **Bredykhin V.V.** To the equation of motion of particles in modeling the process of separation of grain mixtures. Herald of KHNTUSG. 2016. Vol. 143. P. 45 – 47.

15. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., **Bredykhin V.**, Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. T. 2. № 7. P. 63 – 69. ***(Scopus)*** (*the author's contribution consists in substantiating the optimal parameters of the process of separation of seed materials on working surfaces of a cylindrical shape*).

16. **Bredykhin V.V.**, Kharchenko S.A. To the equation of motion of particles when modeling the process of separation of grain mixtures by vibro-

pneumatic separators. All-state interdepartmental scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines. 2017. Vol 47/2. P. 21 – 25.

17. **Vadym Bredykhin**, Petro Gurskyi, Oleksiy Alfyorov, Khrystyna Bredykhina, Andrey Pak. Improving the mechanical-mathematical model of grain mass separation in a fluidized bed. European Journal of Enterprise Technologies. 2021. T. 3./1. № 111. P. 79 – 86. ***(Scopus)*** (*the author's contribution consists in modeling the process of NM segregation by seed density*).

18. **Bredykhin Vadim**, Pak Andrey, Gurskyi Petro, Denisenko Sergey, Bredykhina Khrystyna. Improving the mechanical mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. Improving the Mechanical Mathematical Model of Pneumatic Vibration Centrifugal Fractionation of Grain Materials Based on Their Density. 2021. T. 4/1. № 112. P. 54 – 61. ***(Scopus)*** (*the author's contribution consists in modeling the process of SM segregation by seed density*).

19. **Bredykhin V.V.** Ways of increasing the economic efficiency of the seed preparation process. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology. Western Ukrainian National University, 2023. No 2. P. 109 – 144. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-2-15

20. **Bredykhin Vadym**, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyy Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018 (***Scopus***) (the author's contribution consists in the development of a mathematical model for the calibration of seed materials).

21. Slipchenko Maksym, **Vadym Bredykhin**, Liliia Kis-Korkishhenko, Andrey Pak, Oleksiy Alfyorov. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98.

https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425 ***(Scopus)*** (*the author's contribution consists in the study of non-stationary oscillations of oscillators under the action of long and short-term pulses*).

22. Slipchenko M., **Bredykhin V.,** Pak A., Gurskyi P., Alfyorov O., Pak A. (2023). Constructing f physical-mathematical model of grain mass self-heating by a rod site of rectangular cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/8 №125, P. 24 – 30. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287391 (***Scopus***) (*the author's contribution consists in the development of a mathematical model for the separation of seed materials*).

Works reflecting the practical value of the work:

23. **Bredykhin V.V.**, Mezentsev V.O., Chernyaev O.O. Device for separating seed materials by density: pat. UA 127393 Ukraine: IPC (2018.01) B03B 4/00 B07B *4/08* (2006.01) B*07*B 9/*02* (2006.01); statement 16.03.2018; published 25.07.2018, Bul. № 14. 4 p.

24. **Bredykhin V.V.**, Smetankina N.V., Tikunov S.R., Mezentsev V.O. Sieve for cleaning a grain pile with holes in the form of an oval Cassini: pat. UA 133625 Ukraine: IPC B07B 1/46 (2006.01); statement 10.12.2018; published 10.04.2019, Bul. № 7. 4 p.

25. **Bredykhin V.V.**, Smetankina N.V., Tikunov S.R., Mezentsev V.O. A grooved sieve with openings in the form of an oval Cassini: pat. UA 145733 Ukraine: IPC B07B 1/46 (2006.01); statement 31.08.2020; published 29.12.2020, Bul. № 24. 4 p.

26. **Bredykhin V.V.**, Smetankina N.V., Tikunov S.R., Mezentsev V.O. Sieve for calibrating loose materials: pat. UA 150092 Ukraine: IPC B07B 1/46 (2006.01); statement 16.08.2021; published 30.12.2021, Bul. № 52. 4 p.

LIST OF SCIENTIFIC WORKS WHICH ADDITIONALLY DISPLAY SCIENTIFIC RESULTS:

monographs:

27. F. Peretsevoy, P. Gurskyi, V. ladyka, M. Ianchyk. I. Krapivnytska, S. Omelchenko, **V. Bredykhin**, V.Kis, T. Marenkova, Z. Garncarec Food

technology using structurants: The monograph. Sumy-Kharkiv-Kyiv-Wroclaw, 2021. 250 p.

28. Kundenko M.P., Yehorova Y.O., **Bredykhin V.V.**, Yehorov O.Y. Metrological support of electronic systems for measuring electrophysical parameters: monograph. Kharkiv: KHNTUSG named after P. Vasylenko, 2021. 198 p.

Conference materials and theses:

29. **Bredykhin V.V.** Investigation of the influence of air flow distribution and strength on the parameters of the process of pneumatic separation of grain mixtures. Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference. Problems of design, production and operation of agricultural machinery. Kirovohrad: KNTU. 2013. Vol. 1. P. 103 – 115.

30. **Bredykhin V.V.** Prospects for the development of machine technologies and equipment for separating grain materials by seed density. *The 9th international youth conference* (New York, May 10), 2019. P. 14 – 20.

31. Tikunov S.R., Smetankina N.V., **Bredykhin V.V.**, Mezentsev V.O. Rational design of sieve separators with a closed section of the opening. *Dynamics, strength and modeling in mechanical engineering*: abstracts of reports of the II International Scientific and Technical Conference (Kharkiv, October 05 – 08, 2020). Kharkiv, 2020. P. 283 – 284.

32. **Bredykhin V.V.**, Smetankina N.V., Tikunov S.R. Perforated surfaces with holes in the shape of the Cassini oval. *Modern directions of technology and mechanization of processing and food production processes*: materials of the 21st international scientific and practical conference. (Kharkiv, November 13, 2020). Kharkiv: KHNTUSG. 2020. P. 52 – 53.

33. Tikunov S.R., **Bredykhin V.V.**, Smetankina N.V. Study of the throughput capacity of separating working surfaces. *Modern engineering of agro-industrial and food production*: materials of the International Scientific and Practical Conference. (Kharkiv, November 25-26, 2021). Kharkiv: DBTU, 2021. P. 76 – 77.

34. Tikunov S.R., **Bredykhin V.V.**, Smetankina N.V. Classification of working surfaces with holes in the shape of an oval Cassini: *Digital transformations of modernity*: multidisciplinary international scientific-practical conference. (Coimbra, Portugal, January 24, 2022.). Portugal, 2022. P. 110 – 111.

35. **Bredykhin V.** Improving the quality of the seed production process. *Innovations and prospects in modern science.* (Stocholm, 13 – 15 March 2023 y.). Stocholm, 2023. P. 64 – 67.

36. **Bredykhin V.V.**, Makarenko O.V., Povassar G.S. To the process of thrifty separation of seed material to obtain seeds with increased biological potential. Increasing the efficiency of the process of preparation of seed material of grain crops. Technical progress in waste disposal: scientific and practical materials. conf. (Kharkiv, May 9-10, 2023). Kharkiv: DBTU, 2023. P. 21 – 23.

37. **Bredykhin V.V.** To the question of increasing the reliability of the seed production process. Problems of reliability and durability of machines and structures: materials of All-Ukrainian science and practice. conf. (Kharkiv, May 11-12, 2023) Kharkiv, 2023. P. 7 – 9.

Published works of approbation nature:

38. Tyshchenko L.N., Pyven M.V., **Bredykhin V.V.** Justification of the process of segregation of grain mixtures during sieving with vibrocentrifugal sieves. MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. 2013. 104 – 111.

39. Kharchenko S.O., Olshansky V.P., Kharchenko F.M., **Bredykhin V.V.** Determination of the dynamics of the buckwheat grain mixture during its sieving through the holes of flat vibroscreens. All-state interdepartmental scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines. 2017. T. 47(1). P. 240 – 248.

40. Mezentsev V.A., **Bredykhin V.V.**, Chernyaev A.A., Ilyina N.A., Kobyzeva L.N., Bezuglaya O.N. The influence of particle size characteristics on the thickness of the seed coat in chickpea seeds. Modern directions of technology and mechanization of processing and food production processes: Bulletin of KHNTUSG. Kharkiv, 2018. Vol. 194. P. 90 – 100.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ, АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ……. 39

1.1. Аналіз сучасного стану проблеми підготовки насіннєвого матеріалу шляхом вібропневматичного розділення за густиною насіння……. 39

1.1.1. Стан і особливості післязбиральної обробки насіння пшениці……. 42

1.1.2. Стан і особливості післязбиральної обробки насіння кукурудзи……... 48

1.1.3. Стан і особливості післязбиральної обробки насіння соняшнику……. 51

1.1.4. Стан і особливості післязбиральної обробки насіння сої……... 53

1.1.5. Аналіз проблеми підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу…….. 57

1.2. Аналіз стану досліджень процесу вібропневматичного розділення насіннєвого матеріалу…….. 79

1.3. Перспективи підвищення ефективності процесу вібропневматичного розділення насіннєвого матеріалу за густиною насіння…….. 94

1.4. Висновки за розділом……. 100

РОЗДІЛ 2. МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ ПЛОСКИМИ ПОВІТРОПРОНИКНИМИ ВІБРАЦІЙНИМИ ПОВЕРХНЯМИ…… 102

2.1. Основні рівняння гідродинаміки багатофазної системи, які моделюють псевдорозріджений шар насіннєвого матеріалу……... 104
2.2. Теоретичний метод визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості псевдорозрідженого насіннєвого матеріалу……... 109
2.3. Гідродинамічні моделі пошарового руху насіннєвого матеріалу по плоским повітропроникним робочим поверхням, що вібрують…….. 118
2.3.1. Одномірні гідродинамічні моделі руху насіннєвого матеріалу……... 119
2.3.2. Багатомірні гідродинамічні моделі руху насіннєвого матеріалу……... 132
2.4. Аналіз результатів механіко-математичного моделювання процесу розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння плоскими вібруючими повітропроникними робочими поверхнями…….. 148
2.5. Висновки за розділом…….. 164
РОЗДІЛ 3. МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІБРОПНЕВМОВІДЦЕНТРОВОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ… 167
3.1 Гідродинамічна модель пошарового руху насіннєвого матеріалу по повітропроникній робочій поверхні циліндричної форми……. 167
3.2. Розв'язок системи рівнянь, що моделює кільцевий, асиметричний, пошаровий, усталений рух насіннєвого матеріалу……... 178

3.3. Аналіз результатів механіко-математичного моделювання процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння…… 215
3.4. Висновки за розділом……. 226
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ……... 228
4.1. Характеристика об’єктів досліджень…… 228
4.1.1. Пневмосепарувальний стіл……. 228
4.1.2. Вібропневмовідцентровий сепаратор…… 243
4.2. Програма та методика досліджень…… 248
4.3.Дослідження розроблених інтенсифікаторів хвилеподібного та шиповидного типів……... 256
4.3. Висновки за розділом……. 260
РОЗДІЛ 5. ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ…….. 262
5.1. Дослідження ефективності процесу вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння…… 262
5.1.1. Насіннєві матеріали……. 262
5.1.2. Місце проведення експериментальних досліджень……. 265
5.2. Перевірка ефективності розроблених механіко-математичних моделей процесу вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння…… 269
5.2.1. Аналіз ефективності застосування механіко-математичної моделі розділення насіннєвих матеріалів за

густиною насіння плоскими повітропроникними вібраційними поверхнями…… 269
5.2.2. Аналіз ефективності застосування механіко-математичної моделі процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння…….. 282
5.3. Висновки за розділом……. 286
РОЗДІЛ 6. ІДЕНТИФІКАЦІЯ РІВНЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕННЯ СЕПАРУЮЧИХ МАШИН ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ…… 288
6.1. Методологічні засади визначення економічної ефективності технічних та технологічних інноваційних рішень……. 289
6.2. Визначення організаційно-технічних та організаційно-економічних умов застосування удосконалених сепаруючих машин і технологій…… 294
6.3. Оцінка очікуваних результатів економічних ефектів впровадження удосконалених технічних засобів та технологій…….. 300
6.4. Висновки за розділом……. 302
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……... 303
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 308
ДОДАТКИ…….. 341

ВСТУП

Актуальність теми. Національна харчова безпека України залежить від стратегічних запасів харчових ресурсів, які, в свою чергу, пов'язані зі збільшенням виробництва насіння основних зернових культур. Оскільки площі для вирощування є обмеженим ресурсом, актуальності набирає проблема збільшення урожайності зернових культур.

Урожайність пшениці в України у 2022 році в середньому складає 40,5 ц/га, соняшника – 21,7 ц/га, що значно нижче відповідних показників провідних Європейських країн, де для пшениці вона може сягати 75 ц/га [78, 80, 242, 285]. Основною причиною низької урожайності є низька якість насіннєвого матеріалу.

Для щорічної сівби у межах 15 – 16 млн. га зернових культур необхідно мати близько 3 млн. тон високопродуктивного насіння [54, 81, 86]. В країнах ЄС щорічно виробляється понад 200 млн. тон зернових, з яких 3,5%, або близько 6 – 7 млн. тон використовується як посівний матеріал. В Україні в результаті нижчого врожаю та вищих норм висіву, кількість насіння зернових, що використовується для посіву, майже у двічі вища, ніж в ЄС, і становить близько 2,5 – 3,0 млн тон, або близько 6%.

Насіннєва промисловість та фермерські господарства не задовольняють попит держави та фермерських господарств у насіннєвому матеріалі, закордонне насіння має високу вартість, яка коливається у межах 14000 – 15000 грн/тону та може давати якісну репродукцію один рік.

Експорт насіння вітчизняної селекції знаходиться на низькому рівні і користується попитом лише в країнах колишнього СНД. У структурі українського експорту насіння домінує кукурудза, частка якої у вітчизняному експорті складає близько 99%. За 2022 рік продано близько 10 тон насіннєвої пшениці та 20 тон ячменю [78]. Це, в першу чергу, пов'язано з низькою якістю матеріалу, оскільки лише 30% вітчизняного насіннєвого матеріалу відповідає кондиціям першого класу [109].

Якість насіння залежить від багатьох факторів: комплексу агротехнологічних операцій (сівба, обробка посівів то що), технологічних операцій збирання урожаю, транспортування, післязбиральної обробки та зберігання. Визначальними, за впливом на насіннєвий матеріал, є технологічні операції з післязбиральної обробки матеріалу [41, 42, 56, 82, 118].

Однак, одним з найважливіших етапів у технологічному процесі післязбиральної обробки зерна та отримання високоякісного насіннєвого матеріалу (НМ) є процес сепарування (ПС) зернового матеріалу (ЗМ), шляхом розділення його на фракції, що відрізняються за фізико-механічними властивостями частинок [17, 18, 124, 160].

Очищення ЗМ та розділення його на фракції для перспективного одержання високоякісного НМ дозволяє, по-перше: отримати насіння з підвищеним біологічним потенціалом [163], по-друге: убезпечити НМ від засміченості насінням не основної культури, яка при проростанні, погіршує умови росту основної культури (ускладнює насичення рослини вологою, сприяє розмноженню шкідників та хвороб тощо) та засмічує домішками іншого характеру. Домішки, які необхідно виділити з основної культури, розділяються на легковідокремлювані (домішки, що легко виділяються від основної культури решітними сепараторами та трієрами) і важковідоремлювані (домішки, що за своїми геометричними та аеродинамічними характеристиками не відрізняються від основної культури) [47, 75, 77, 92, 93, 109].

На етапі первинної очистки ЗМ розділяють переважно сепараторами, які використовують у якості ознаки ділимості геометричні розміри та аерогравітаційні характеристики зерна [118, 120, 164, 212].

Найвищу ефективність та ощадливість на етапі точного розділення НМ при виділенні повноцінного, біологічно активного та високопродуктивного оригінального насіння (ОН) і елітного насіння (ЕН) показали машини, що поділяють НМ за густиною насіння [213, 214]. Використовуючи густину насіння як ознаку ділимості, ефективно виділяються домішки у основній

культурі, а саме: хворе або уражене шкідниками зерно та зерно з мікро- і макротравмами, проросле, недозріле, або фузаріозне зерно [49, 51, 56].

Під час проведення повного комплексу технологічних операцій з підготовки НМ на зернівку відбувається багаторазовий механічний вплив від взаємодії з робочими органами машин та обладнання, що реалізують процес, порушуючи природній захист – оболонку зернини [41].

До макротравмування слід віднести: травмування або відбиття частини зернини (зародка, ендосперму); частково, або повністю втрачена захисна оболонка. До мікротравмування відноситься: виникнення внутрішніх тріщин (невідповідність температурного режиму під час нагрівання/охолодження, ударний, зсувний або абразивний вплив), вм'ятини зернини, то що [59, 60].

Травмоване насіння при лабораторних умовах досліджень, може дати якісні сходи. Однак, при польовій схожості травмоване та хворе насіння дає кволі сходи, які не життєздатні, що значно знижує урожайність основної культури. Так, різниця між лабораторною та польовою схожістю досягає 20 – 25% , в залежності від культури [83]. Під час висіву травмованого насіння за нормою 200 т/га не проростає до 40 кг. насіння [85].

Використання біологічно активного насіння з підвищеним біологічним потенціалом та густиною дозволяє збільшити урожайність до 60% [118].

Насіннєочисні та сепаруючі машини, які використовуються, за своїми експлуатаційними показниками не в повній мірі відповідають сучасним вимогам. Наведену невідповідність можна пояснити недостатніми науковими дослідженнями сутності і стану процесу розділення НМ за густиною насіння.

Найбільше поширення отримали два способи сепарації за густиною насіння: «вологий» та «сухий». «Вологий» спосіб розділення має високу чіткість виконання процесу, але потребує значно більшу кількість енергозатрат на додаткове висушування матеріалу після завершення процесу сепарації [49].

«Сухий» спосіб навпаки більш енергоощадливий. Для розділення НМ «сухим» способом використовуються пневмосортувальні столи (ПСС) та вібропневмоцентрифуги.

Найбільше поширення набув «сухий» спосіб розділення НМ, при якому сепарація відбувається за рахунок одночасній дії на НМ коливань робочої поверхні (деки), сили повітряного потоку, що проходить крізь шар НМ і в залежності від конструктивних особливостей сепаратора, відцентрової сили. Такий процес представляє собою складне фізичне явище [16, 41].

Комплексною оцінкою досліджень вібраційного, пневматичного, вібропневматичного та вібропневмовідцентрового розділення НМ встановлено ефективність вібропневматичного та вібропневмовідцентрового способів розділення. Виявлено відсутність систематизації технічних рішень, які покращують якісні показники процесу. Визначено недосконаліть наукового обґрунтування процесів розділення НМ за густиною насіння.

Основні наукові дослідження процесів сепарації ЗМ на плоских та циліндричних робочих поверхнях (поверхнях обертання) за геометричними розмірами частинок проведено: А.В. Міняйло [120], В.П. Єрмаком [73], В.М. Цециновським [212], В.П. Ольшанським [128 – 130], Д.І. Мазоренко [114], Є.С. Гончаровим [47, 48], Л.М. Тіщенко [173 – 192,], М.В. Бакумом [11], О.І. Завгороднім [75], О.М. Васильковським [36, 37], П.М. Василенко [34, 35], П.М. Заїкою [76 – 79], П.С. Берником [12], С.О. Харченко [202 – 207], Ю.О. Манчинським [116], Ф.М. Абдуєвою [1] та інш.

Науковим дослідженням машин, обладнання та процесам розділення НМ за густиною насіння присвячено роботи: Алієва Ельчіна Бахтіяр огли [5 – 8], А.І. Буркова [31], А.М. Прилуцького [146, 147], А.Ф. Ульянова [195 – 197], Б.І. Котова [97 – 104], В.Я. Коваля [89, 90], Д.В. Богатирьова [14, 15], М.І. Полуектова [143], М.М. Петренка [135 – 138], М.М. Ульриха [194], С.І. Малюти [115], С.П. Степаненка [160 – 165] та інш.

Системні наукові дослідження з розділення НМ зернових культур за комплексом фізико-механічних властивостей НМ наведено в роботах

закордонних авторів: Abderrahim F [221], Adolf V.I. [222], Aiwize E.A. [223], Aigbodion A.I. [224, 225], Aigbodion A.I. [225], Awulu J.O. [230], Babatunde G.M. [231, 232], Bhargava A. [241], Cao Y. [243], Clark B. [246, 247], Day P.R. [248], Dursun I. G. [249], Issa J.P.M. [264], Johnston P.R. [267], Mahdi Z. [275], Mendonça R.J. [276], Mishra R.K. [277, 278], Ogunjimi L. A. O. [284], Olajide J. O. [284, 285], Russo R., & Reggiani R. [292], Salemi E. [295].

Результати наукових досліджень з розділення НМ олійних культур за густиною насіння наведено у роботах закордонних авторів: Asioli D. [229], Aydın C. [229], Balkose D. [233], Baryeh E. A. [234], Bolger Z. [235], Chakraborty P. [244], Cheng N. [246], Dutta S. K. [252], Dziki, D. [253], Emami S. [260], Irawan C. [263], Jacob C.K. [265], Jiang J.-S. [266], Joseph R. [268], Kadan, R.S., [269], Komariyah S. [270], Law-Ogbomo K.E. [271], Lee S.W. [272], Lourith N. [273], Lu Q. [274], Mohanty P. [280], Mridul Das [281], Munawaroh E. [282], Nadarajah R.Y. [283], Pinton M. B. [288, 289], Rahabi-Layachi H. [290], Resconi V. C. [291], Roz M. [293], Sanjeewaa T. W. G. [294], Salemi E. [295].

Системний аналіз теоретичних досліджень математичного моделювання процесів, машин та обладнання, що реалізують процес сепарації НМ, дозволив встановити, що математичні моделі сепарування НМ мають спрощений вигляд, оскільки не враховують процеси внутрішношарової взаємодії частинок матеріалу, що призводить до зниження ефективності робіт з проектування нових робочих поверхонь та оптимізації кінематичних параметрів сепаруючих машин.

Таким чином, робота за наукового обґрунтування машинних технологій і обладнання вібропневматичного та вібропневмовідцентрового розділення НМ за густиною насіння вирішує проблему з покращення якості насіння та забезпечує сталу продовольчу безпеку України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що складають основу дисертації, проведено відповідно до: НДР, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету України:

«Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом» (ДР 0122U000810, 2021 – 2023 рр., ***здобувач є керівником і виконавцем проекту***); «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованних технологій збереження, обробки врожаю і одержання високоякісних насіннєвих матеріалів» (ДР 0116U004624, 2016 – 2017 рр., ***здобувач був співвиконавцем проекту***); Державної цільової програми розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року; комплексної державної цільової програми «Зерно України – 2008 – 2015 рр.»; Державної цільової програми «Розвиток Українського села до 2015 р.»; регіональних програм: «Стратегія сталого розвитку Харківської області на 2021 – 2027 рр.», «Найважливіші проблеми АПК на період до 2023 року»; комплексних тем наукових досліджень: НДР Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, Державного біотехнологічного університету «Підвищення ефективності, продуктивності та надійності машин для розділення зернових матеріалів» на період 2018 – 2022 рр.» та спрямована на реалізацію Проекту ЄС «Підтримка впровадження сільськогосподарської та продовольчої політики в Україні».

Роботу присвячено вирішенню практично важливої для галузі виробництва та переробки зерна **науково-технічної проблеми** – підвищення ефективності процесів післязбиральної обробки НМ. Вирішення цієї проблеми ґрунтується на **науковій гіпотезі**, яка полягає в тому, що існують такі техніко-технологічні рішення, реалізація яких уможливить інтенсифікацію процесу вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесів післязбиральної обробки зерна завдяки науковому обґрунтуванню вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння для підготовки високоякісного насіння.

Для досягнення мети, що поставлена, необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- розробити та вдосконалити технологічні процеси, які інтенсифікують та підвищують ефективність вібропневматичного і вібропневмовідцентрового розділення НМ за густиною насіння;
- розробити механіко-математичні моделі процесу розділення НМ за густиною насіння на робочих поверхнях вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах з урахуванням моделей процесів гідродинаміки багатофазних середовищ;
- на основі теоретичних досліджень псевдорозрідженого шару визначити фізико-механічні властивості НМ, на яких базуються режими й параметри вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машин;
- на основі розробленої механіко-математичної моделі процесу розділення НМ за густиною насіння на робочих поверхнях вібропневматичних сепаруючих машин визначити закономірності та обґрунтувати раціональні кінематичні режими машин, що виконують процес;
- на основі розробленої механіко-математичної моделі процесу розділення НМ за густиною насіння на робочих поверхнях вібропневмовідцентрових сепаруючих машин, обґрунтувати раціональні кінематичні режими машин, що виконують процес;
- з урахуванням визначених характеристик НМ розробити імітаційні моделі процесу розділення НМ за густиною насіння, інтенсифікатори хвилеподібного типу, які придатні для використання у вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах;
- експериментально дослідити технологічні процеси вібропневматичного і вібропневмовідцентрового розділення НМ з метою перевірки адекватності розроблених механіко-математичних моделей;

- оцінити технологічну і техніко-економічну ефективність впровадження результатів досліджень інтенсифікації процесу вібропневматичного розділення НМ та модернізації технологічних ліній з підготовки насіння.

Об’єкт дослідження: процеси вібропневматичного розділення НМ, їх зв’язок з конструктивними параметрами і кінематичними режимами зернових сепараторів для розділення матеріалу за густиною насіння.

Предмет дослідження: наукове обґрунтування інтенсифікації процесів вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння.

Методи дослідження. Методологічною базою роботи є використання дослідницького системного підходу. Теоретичні дослідження базуються на використанні положень теоретичної механіки і гідродинаміки багатофазних середовищ, методів теорії ймовірностей випадкових процесів, математичної статистики, основних положень теорії коливань. Використано методики математичного та імітаційного моделювання процесів розділення НМ за густиною насіння, регресійного та кореляційного аналізів. Чисельне моделювання процесів розділення НМ за густиною насіння проведено з використанням автоматизованих обчислювальних систем: «FreeMat», «SALOME», «SMath Studio», «GNU/Octave», «GNU/Maxima» та інш.

Експериментальні дослідження та обробку результатів проведено з застосуванням методики натурних випробувань і фізичного-імітаційного моделювання, які виконані в лабораторних умовах за допомогою універсального випробувального обладнання на елементній базі пневмосепарувальних столів та вібропневмоцентрифуг, що випускаються серійно, з використанням методів планування експериментів та статистичного аналізу і обробки одержаних даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розв’язанні науково-прикладної проблеми, обґрунтуванні та подальшому розвитку наукових основ вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння.

Вперше:

- системно обґрунтовано математичні моделі руху псевдорозрідженого шару НМ як частинок різної густини і повітряного потоку, якими враховано відміни технологічних процесів розділення, зумовлених внутрішньошаровою взаємодією дискретної (частинок) та неперервної (повітря) компонентів шару НМ з робочими поверхнями (плоскою/циліндричною) сепаруючих машин;

- запропоновано нову концепцію моделювання процесів внутрішньошарової взаємодії шарів частинок НМ різної густини, повітряного потоку і робочої поверхні для розрахунку та керування технологічними показниками продуктивності та якості процесу підготовки насіння;

- з урахуванням моделей процесів гідродинаміки багатофазних середовищ розроблено метод та обґрунтовано раціональні режими роботи вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машин, якими враховано особливості фізичних процесів переміщення та розділення на фракції шару НМ по плоскій/ циліндричній робочій поверхні;

- аналітично обґрунтовано та верифіковано експериментальними дослідженнями комплексний вплив фізико-механічних властивостей НМ, конструкційних параметрів та режимів роботи сепаруючих машин на якісні показники процесу розділення НМ за густиною насіння, який зумовлюється його взаємодією з робочими поверхнями (плоскою/ циліндричною) сепаруючих машин.

Одержали подальший розвиток:

- науково-методичні засади імітаційного моделювання процесу розділення НМ за густиною насіння з використанням ефективного коефіцієнту динамічної в’язкості, якими враховано взаємодію дискретної та неперервної компонент псевдорозрідженого шару НМ.

Удосконалено:

- технологічний процес переміщення та розділення НМ плоскими/циліндричними повітропроникними і вібруючими робочими поверхнями на основі розроблених нових теоретичних положень моделювання руху псевдорозріджених шарів НМ як багатофазних структур.

Розроблено нову методологію моделювання процесів внутрішньошарової взаємодії шарів частинок НМ різної густини, повітряного потоку і робочої поверхні для розрахунку та керування технологічними показниками продуктивності та якості процесу підготовки насіння.

Наукова новизна одержаних результатів лягла в основу технічних рішень, які захищено патентами України на корисну модель (№127393; 133625; 145733; 150092).

Практичне значення одержаних результатів. полягає в тому, що на основі комплексних аналітичних і експериментальних досліджень визначено та обґрунтовано раціональні конструктивні параметри і кінематичні режими сепаруючих машин, та характеристики робочих поверхонь для розділення НМ за густиною насіння. Розроблено рекомендації з удосконалення конструкцій сепаруючих машин для розділення НМ за густиною насіння плоскими/циліндричними робочими поверхнями. Технічна новизна запропонованих рішень підтверджена патентами України на об’єкти права інтелектуальної власності. Розроблені аналітичні залежності для обґрунтування нових конструкційно-технологічних схем сепараторів у вигляді науково-технічної документації, яку використано науковими та науково-проектними організаціями для модернізації, удосконалення та створення нових технічних засобів для підготовки насіння. Результати досліджень використано підприємствами, що спеціалізуються на переробці зерна та науково-дослідними і проектними установами для розробки нових, і модернізації існуючих машин, обладнання, технологічних ліній з підготовки насіння: на ПрАТ ХМЗ дослідження прийнято для модернізації, і удосконалення ПСС-3,5 та розробки ПСС-10, шляхом впровадження

інтенсифікаторів хвилеподібного типу («Хорольський механічний завод» м. Хорол); ПрАТ «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків); ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ); ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп); ТОВ «Батьківщина» (Сумська обл., с. Карабутове); ФОП Знайдюк Василь Григорович (м. Чернігів); впроваджено у процес підготовки НМ для закладання в Національне сховище на довготривале зберігання «Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва» Національної академії аграрних наук України.

Результати досліджень знайшли відображення у наукових звітах: Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка (м. Харків), Державного біотехнологічного університету (м. Харків); звітах з виконання НДР, що фінансуються за рахунок коштів Державного бюджету України: «Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом» (ДР 0122U000810, 2021 – 2023 рр.) ***здобувач є керівником і виконавцем проекту***; «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованних технологій збереження і обробки врожаю і одержання високоякісних насіннєвих матеріалів» (ДР 0116U004624, 2016 – 2017 рр.) ***здобувач був співвиконавцем проекту.***

Основні результати досліджень наведено у монографіях: «Моделювання процесів зернових сепараторів»; «Теорія сепарування зерна»; «Теоретичні основи вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння»; «Динаміка імпульсно навантажених нелінійних осциляторів»; «Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом», які використовуються у навчальному процесі здобувачів вищої освіти Державного біотехнологічного університету для підготовки фахівців на І, ІІ та ІІІ РВО за спеціальностями: «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування», «Агроінженерія».

Особистий внесок здобувача. . Основні результати роботи здобувачем одержані самостійно. У наукових працях, що виконано у співавторстві, особистий внесок наступний: [1, 5, 17, 18, 22] – теоретичне моделювання процесу розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння; [3] – моделювання параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння; [4] – нестаціонарні коливання осциляторів при дії тривалих і короткочасних імпульсів; [6, 7, 8, 9] – постановка задачі дослідження, планування випробувань та обробка результатів; [11, 12, 13, 20, 21] – постановка задачі дослідження внутрішньошарових процесів, розробка математичної моделі процесу; [15, 16] – обґрунтування оптимальних параметрів процесу сепарування циліндричними робочими поверхнями; [24] – розробка конструктивної схеми приладу для розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння; [23, 24, 25, 34] – планування і проведення експериментальних досліджень та обробка результатів; [26, 27, 28] – постановка задачі, розробка методів проведення визначальних випробувань у комбінованих режимах роботи сепаруючої машини з обробкою результатів; [31, 32, 33, 36] – чисельне моделювання та експериментальні дослідження процесів; [38, 39, 40] – розрахунок конструктивних параметрів, експериментальна апробація.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на конференціях: IX та XIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2013 р., 2017 р.); Multidisciplinary international scientific-practical conference «Digital transformations of modernity» (Coimbra, Portugal, 2022 у.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (НАНУ, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного, 2020 р.); III International Scientific and Practical Conference «Innovations and prospects in modern science» (Stocholm,

2023 у.); 12th International Conference «System safety: Human-technical facility-environment» (Ченстоховський політехнічний університет, Польща, 2023 р.); щорічних конференціях та Міжнародних науково-практичних конференціях: «Технічний прогрес в АПВ» (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків, 2005 – 2023 рр.); «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Державний біотехнологічний університет, м. Харків, 2005 – 2023 рр.); Всеукраїнській науково – практичній конференції «Проблеми надійності та міцності машин і споруд» (Державний біотехнологічний університет, м. Харків, 2023 р.).

Публікації. Отримані результати наукових досліджень за обраним напрямом дисертаційної роботи опубліковано після захисту кандидатської дисертації у 40 наукових працях, в тому числі: 7 монографіях (з них – 1 одноосібна; 3 – одноосібні розділи у колективній монографії); 11 статтях у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (з них 5 – без співавторів); 6 – у наукових виданнях, проіндексованих у базах даних **Scopus**; 3 статті у наукових періодичних виданнях інших країн; 9 тез у збірниках доповідей наукових конференцій; отримано 4 патенти.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота включає вступ, 6 розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Повний обсяг дисертації складає 451 сторінку, у тому числі додатки на 110 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 282 сторінки, містить 102 рисунки, 19 таблиць. Список використаних джерел нараховує 300 найменувань на 32 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ, АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

1.1. Аналіз сучасного стану проблеми підготовки насіннєвого матеріалу шляхом вібропневматичного розділення за густиною насіння

Підготовка насіння – складний агротехнологічний процес до якого входять етапи: сівби, вирощування, збирання, первинного очищення, сушіння, вторинного очищення, пакування та зберігання матеріалу [17]. Згідно агротехнологічних вимог до зернозбиральних комбайнів, чистота зернового матеріалу має бути не нижче ніж 95% при прямому комбайнуванні та не нижче ніж 96% при роздільному [156].

Після взаємодії з комбайном, матеріал потрапляє до технологічної лінії підготовки НМ відповідних кондиційних якостей [31]. На первинному етапі зерновий ворох (ЗВ) обробляється сепаруючими машинами попередньої очистки (сепаратори-ворохоочисники). Очищення ЗВ для отримання високоякісного НМ відбувається за комплексом або окремими фізико-механічними властивостями. До основних фізико-механічних властивостей, згідно [56] слід віднести: форму, геометричні розміри, густину, щуплість, сипучість, парусність, гігроскопічність, теплопровідність та теплоємність, пружність насіння та ін. Кожен з вказаних показників змінюється на протязі усього періоду дозрівання та зберігання культури.

Як правило, технологічні операції з первинного очищення відбуваються за розмірними характеристиками частинок матеріалу, до яких відносяться товщина, ширина та довжина. Відповідно до [48], довжина частинки – розмір від основи до верхівки, товщина – розмір від спинної до черевної частинки, ширина – розмір між боками частинки.

ЗВ, що потрапляє на обробку, має вологість до 40% та вміст сміттєвої домішки до 20%. Домішки у ЗВ складаються з двох видів: легковідокремлювані і важковідокремлювані. На етапі первинного очищення частково видаляються легковідокремлювані домішки, шляхом розділення матеріалу за комплексом фізико-механічних властивостей: геометричними розмірами, формою, аеродинамічними параметрами та пружними характеристиками.

На етапі вторинного розділення та точного доочищення, у якості ознаки роздільності, використовують: пружність, колір, характер поверхні (шорсткість, зморшкуватість тощо), густину, парусність. На цьому етапі підготовки, НМ калібрується на сходову та проходову фракції відповідних розмірних характеристик, в залежності від отворів решета, що встановлено на сепаруючу машину.

Калібруванням одержується матеріал відповідних кондиційних якостей, який буде використано для харчування, або для підготовки НМ, шляхом подальшого розділення та очищення.

Спосіб розділення НМ за густиною насіння посідає провідне місце серед відомих способів відділення домішок від насіння основної культури. До домішок, які важко відокремлюються слід віднести: насіння бур’янів; частинки основного матеріалу, які уражені шкідниками, травмовані та мінеральні домішки, що мають характеристики, які за більшістю фізико-механічних характеристик практично збігаються з відповідними характеристиками основної культури [60].

Для вирішення поставлених задач було проведено аналіз літературних джерел та визначено основні культури, які найбільш поширені у виробництві в Україні та світі. Аналіз даних USDA що до структури посівних площ України під поширені зернові культури, дозволив визначити, що найбільшій об’єм виробництва має пшениця (30%), а друге місце посідає соняшник (26%), третє – кукурудза (21%), четверте – соя (7%) (рис. 1.1).

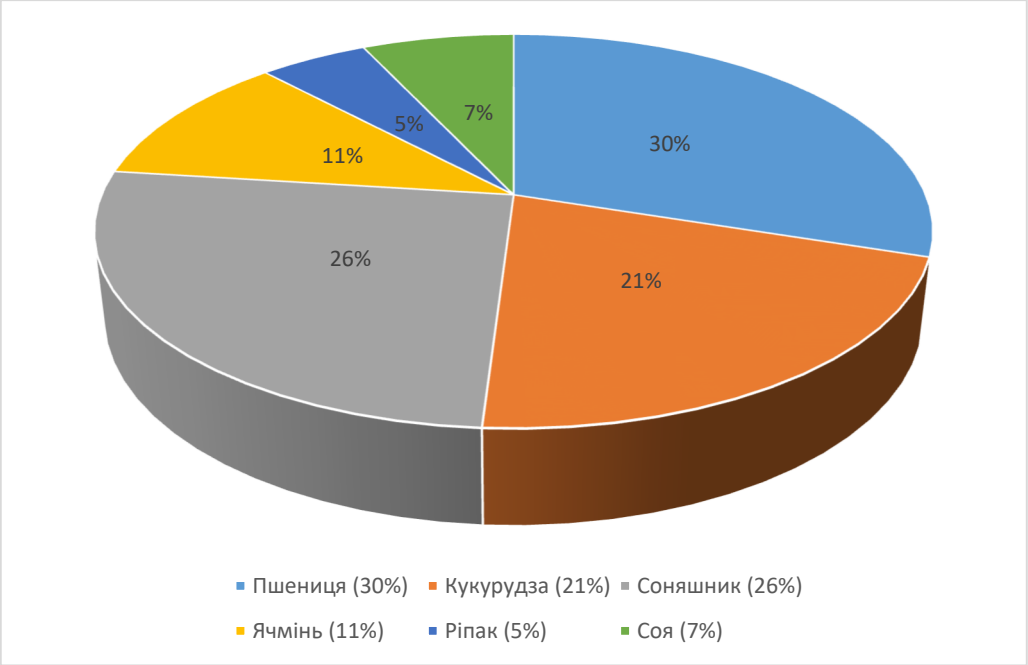


Рис.1.1. Інфографіка узагальненої інформації найбільш поширених в Україні зернових культур

За офіційними даними «Продовольчої та сільськогосподарської організації об'єднаних націй» (FAO) за період з 2012 по 2022 роки в світі відбувається стале зростання виробництва (рис.1.2) та вживання зерна пшениці.

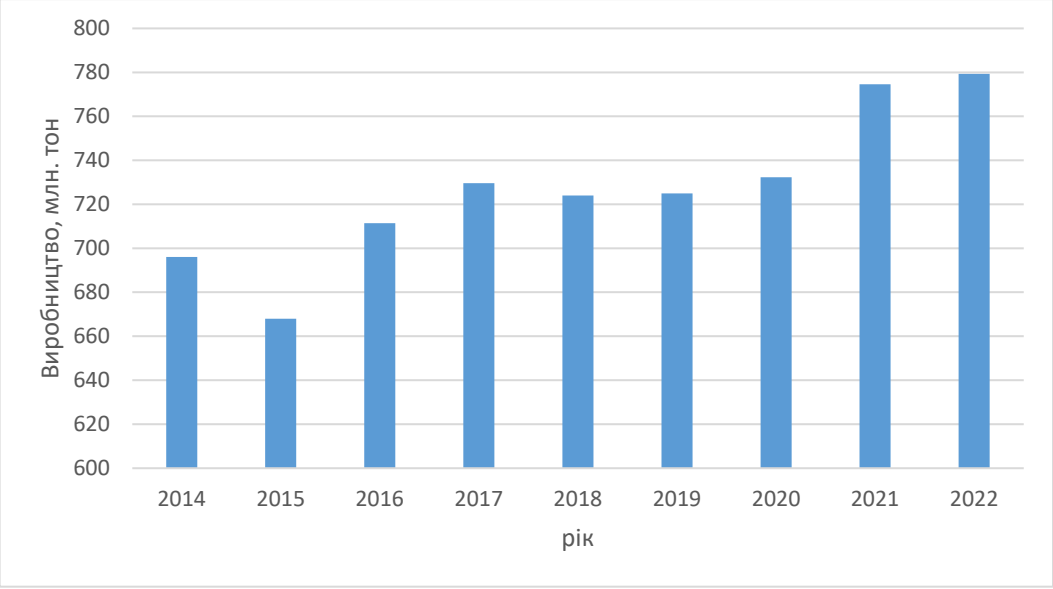


Рис.1.2. Інфографіка динаміки зростання виробництва пшениці в світі

Україна входить до ТОП – 10 світових лідерів з виробництва зернових культур і стало збільшує свою долю на світовому ринку (рис. 1.3).

Рис.1.3. Інфографіка збільшення світового виробництва зернових культур

Об’єми площ під зернові культури – стала величина і збільшення їх можливо лише у незначних відсотках [2]. Збільшення об’єму зернових культур можливо лише при збільшенні урожайності. При вирішенні цієї задачі ключовим питанням є підготовка високоякісного насіннєвого матеріалу.

Науковцями доведено та обґрунтовано, що якісне насіння збільшує можливість формування зернівок з високою біологічною активністю, високою енергією проростання і, відповідно, покращує урожайність культури до 50% [55, 57, 60]. І навпаки, сівба неякісним насінням збільшує норми висіву, знижує схожість та урожайність [59]. Відповідно, використання неякісного НМ призводить до значних економічних втрат [50].

1.1.1. Стан і особливості післязбиральної обробки насіння пшениці

За підсумками 2022 року Україна, з показником 20,5 млн. тон., посіла дев’яте місце в світі з виробництва пшениці, випередивши Аргентину

(17,5 млн. тон), Туреччину (17,25 млн. тон), Велику Британію (14,6 млн. тон), Іран (13,2 млн. тон), Казахстан (13 млн. тон), Єгипет (9,8 млн. тон), Бразилію (9,2 млн. тон) та Узбекистан (6,6 млн. тон). Світовими лідерами з виробництва пшениці є – Китай (138 млн. тон), країни ЄС (134,7 млн. тон), Індія (103 млн. тон), США (44, 9 млн. тон), Канада (35 млн. тон), Австралія (33 млн. тон) та Пакистан (26,4 млн. тон) [284] (рис. 1.4).

За останні десять років, починаючи з 2012 року, найбільший приріст площ під пшеницю зафіксовано у господарствах:

Харківської області збільшення на 294,3 тис. га;

Одеської збільшення на 186,4 тис. га;

Запорізької збільшення на 179,4 тис. га;

Херсонської збільшення на 105,7 тис. га;

Миколаївської збільшення на 69,6 тис. га.

Тим часом, порівнюючи дані за звітний період, найбільше скорочення площ під пшеницею зафіксовано у господарствах Сумської, Вінницької та Черкаської областей. Де у період з 2010 по 2019 роки, посівні площі під культуру там скоротились на 61,2; 59,2 та 52,8 тис. га відповідно [241, 243, 245].

В Україні розповсюдження набули сорти пшениці: вітчизняні – «Подолянка», «Шестопалівка», «Зоря», «Недра», «Гардемарин», «Таврида», «Босфор», «Конка», «Одеська – 50», «Миронівська – 80»; Канадської селекції – «Квебек – 117», «Прейри – 109», «Альберта»; Європейські – «Леннокс», «НС 40 С», «Емерино», «Міда», «Балатон» [242, 244].

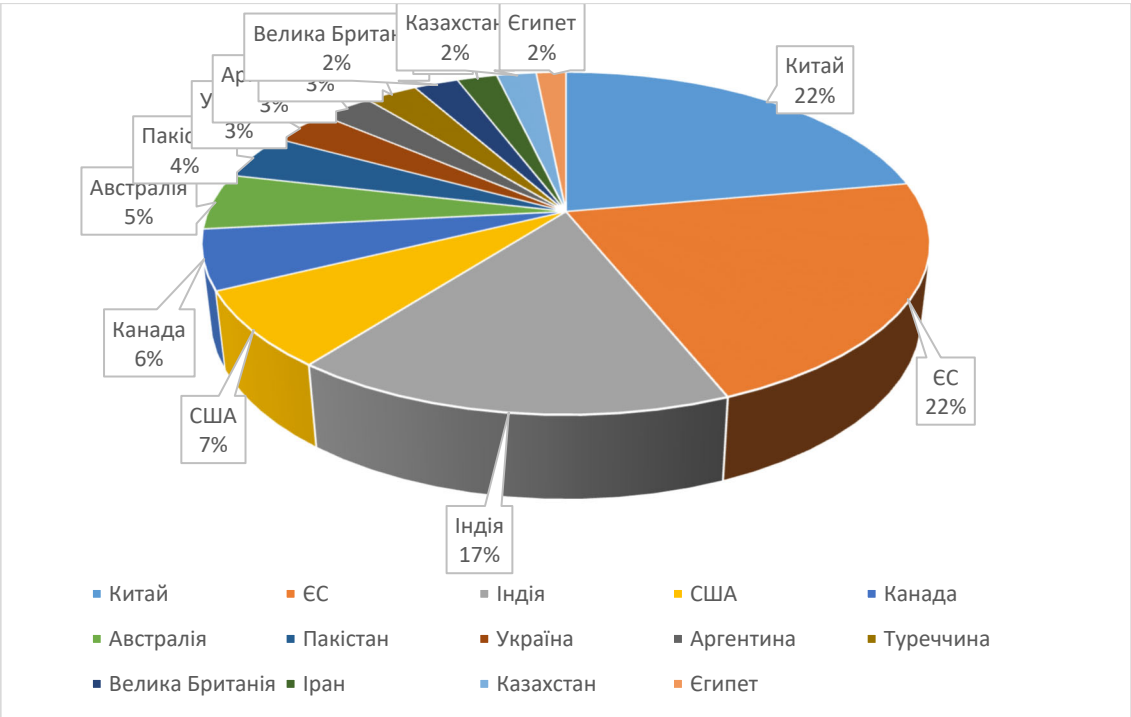


Рис.1.4. Інфографіка світових лідерів з виробництва пшениці

Динаміку посівних площ під пшеницю у співвідношенні 1990 – 2020 роки наведено на рис.1.5.

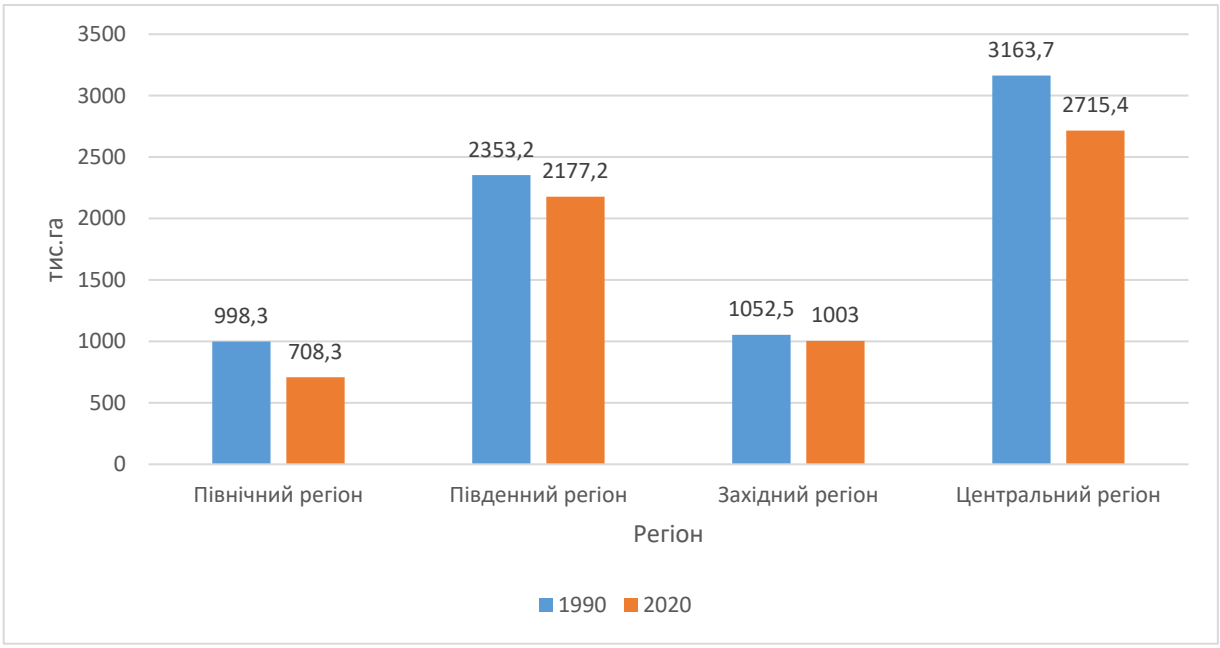


Рис.1.5. Динаміка посівних площ по регіонам України під пшеницю у співвідношенні 1990 – 2020 роки

Будову зернівки пшениці наведено на рис.1.6.

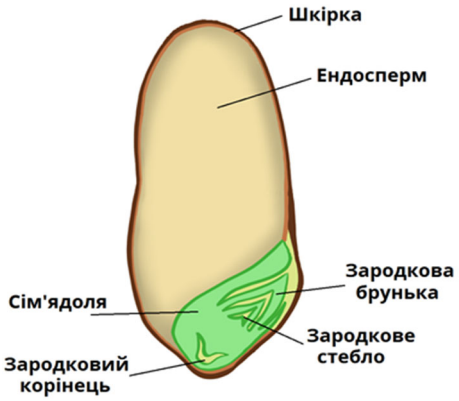


Рис.1.6. Будова зернівки пшениці

Згідно [149], широкого поширення набуває сорти плівчастої пшениці, які відрізняються підвищеним вмістом поживних речовин. До таких сортів відносяться, зокрема, спельта. Маса 1000 зерен спельти знаходиться у межах від 102 до 117 г., а обрушеного – від 41,5 до 57,5 г.

В залежності від якості матеріалу, зерно пшениці ділиться на чотири класи, а зерно твердої пшениці – на п’ять класів.

Узагальнені показники якості зерна м’якої пшениці зведено до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Узагальнені показники якості зерна м’якої пшениці

Показник	Характеристика та норма за класами			
	1	2	3	4
Натура, г/л	775	740	730	Не обмежено
Склоподібність, %	50	40	Не обмежено	Не обмежено
Вологість, %	14			
Зернова домішка, % З НЕЇ:	5	8	8	15
биті зерна	5	8	5	-
зерна злакових культур	3	4	4	-

проростлі зерна	2	3	3	-
Сміттєва домішка, % З НЕЇ:	1	2	2	3
мінеральна домішка	0,15			
галька	0,3	0,5	0,5	1
зіпсовані зерна	0,3	0,3	0,5	1
фузаріозні зерна	0,1	0,1	0,2	0,2
сажа	0,05			
триходерма сива	Вміст не дозволено			
кукіль	0,05			
Сажкове зерно, %	5	5	8	10
Масова частка білку, %	14	12,5	11	Не обмежено
Масова частка сирої клейковини, %	28	23	18	-
Число падіння, сек	220	220	180	-

Узагальнені показники якості зерна твердої пшениці зведено до таблиці. 1.2.

Таблиця 1.2

Узагальнені показники якості зерна твердої пшениці

Показник	Характеристика та норма для твердої пшениці за класами				
	1	2	3	4	5
Вміст зерна м’якої пшениці, %	4	4	8	10	Не обмежено
Натура, г/л	750	750	730	710	-
Вологість, %	14,5				
Склоподібність, %	70	60	50	40	Не обмежено

Зернова домішка, % з неї:	5	5	8	10	15
пророслі зерна, %	1	1	3	3	15
Сміттєва домішка, % з неї:	2	2	2	5	5
мінеральна домішка, %	0,3	0,3	0,5	0,5	1
галька, %	0,15	0,15	0,2	0,3	1
травмоване зерно, %	0,2	0,2	0,5	1	1
фузаріозне зерно, %	0,2	0,2	0,5	1	1
шкідлива домішка, %	0,2	0,3	0,5	0,5	0,5
сажка, %	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1
триходесма сива, %	Вміст не дозволено				
кукіль, %	0,2	0,3	0,5	0,5	0,5
інші види токсичного насіння, %	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1
Сажкове зерно, %	5	5	5	5	10
Масова частка білку, %	14	13	12	11	Не обмежено
Число падіння, сек	220	200	150	100	-

Технологічний процес підготовки високоякісного НМ передбачає розділення матеріалу за густиною насіння, застосовуючи відповідні машини та використовуючи обладнання і механізми, з неухильним дотримуванням технологій, розроблених для технологічного процесу [60].

Таким чином, наукові дослідження, що мають на меті підвищення ефективності процесу підготовки високоякісного НМ пшениці [65], удосконалення машин та обладнання, що реалізують процес, шляхом механіко-математичного моделювання процесу та оптимізації кінематичних

режимів сепаруючих машин, свідчать про актуальність обраного напрямку досліджень.

1.1.2. Стан і особливості післязбиральної обробки кукурудзи

Кукурудза посідає друге місце з виробництва в Україні, оскільки має низку переваг по відношенню до інших зернових культур. Культура використовується у якості продуктів харчування людей та тварин, а також як сировину для глибокої переробки та одержання крохмалю, етилового спирту, сиропу, олії, аскорбінової, та глутамінової кислоти, для виробництва біопалива, та фільтруючих елементів.

За даними USDA протягом останніх десяти років посівні площі під виробництво кукурудзи збільшилось на 35% (на 44,5 млн. га). До ТОП – 10 світових лідерів з виробництва кукурудзи слід віднести: США – 307142 тис. тон, КНР – 165900 тис. тон, Бразилія – 51000 тис. тон, Мексика – 24226 тис. тон, Індія – 19290 тис. тон, Аргентина – 12600 тис. тон, ПАР – 12576 тис. тон, Україна – 11400 тис. тон, Канада – 10592 тис. тон, Індонезія – 8700 тис. тон, Нігерія – 7900 тис. тон, Філіппіни – 6846 тис. тон, Єгипет – 6217 тис. тон, Сербія – 6130 тис. тон, країни Європейського Союзу – 62701 тис. тон (рис. 1.7.).

У зв’язку з військовою агресією, урожай кукурудзи 2022 року в Україні складає близько 26 млн. тон, що на 33% нижче урожаю 2021 року. Близько 75 – 85% вітчизняної кукурудзи [80, 82] експортується на світові ринки. Близько 90% кукурудзи, що залишається в Україні.

Насіння кукурудзи розділяється на: дзьобоподібного, кремнистого, напівдзьбоподібного та полопаного типів.

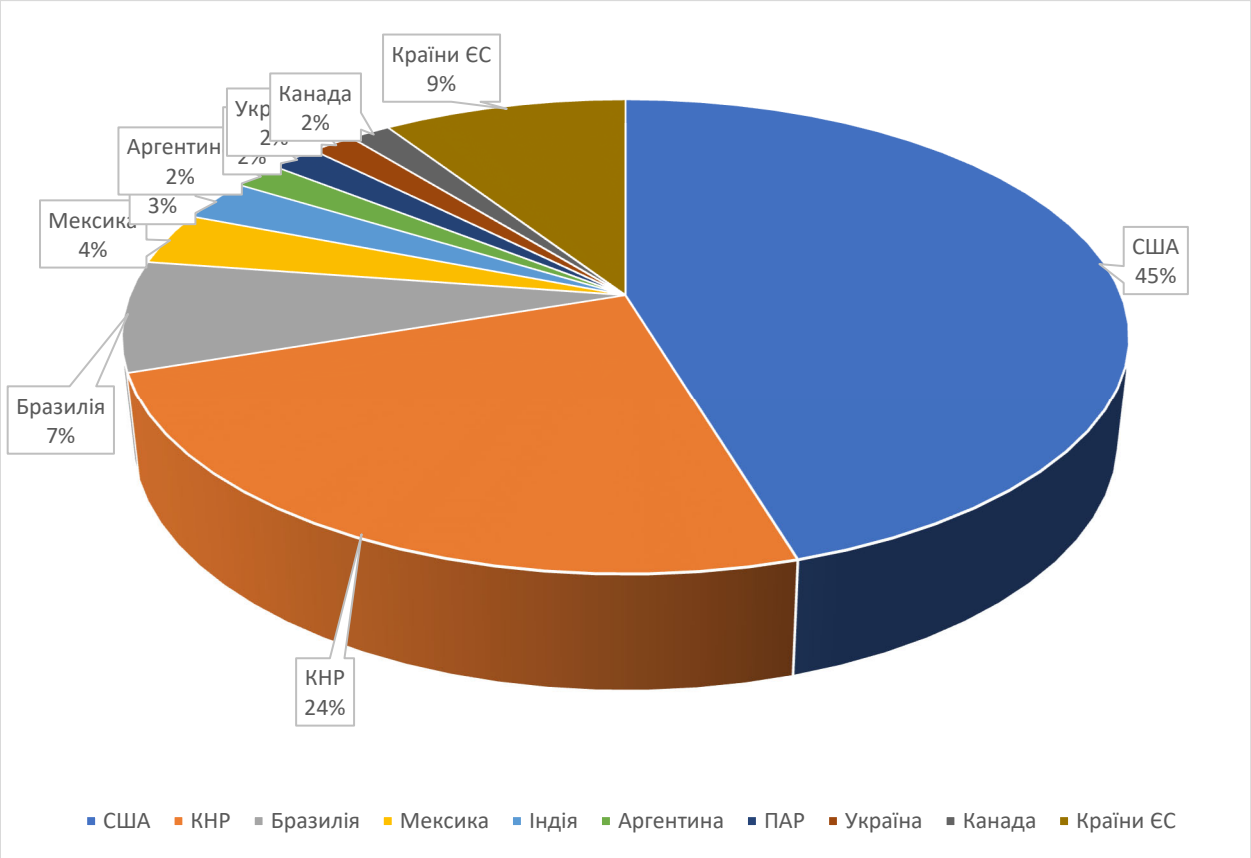


Рис. 1.7. Інфографіка узагальненої інформації ТОП - 10 лідерів з виробництва кукурудзи

В Україні широкого поширення набули сорти та гібриди кукурудзи [64]: «Дніпровська 172 МВ» (337 МВ, 347 СВ); «Одеська 10»; «Одма 310 МВ»; «Одеський 297 МВ» (346 МВ, 508 МВ); «Харківський 294 МВ» (311 МВ); «Колективний 225 МВ», «ТОС 230 МВ»; «Борисфен 191 МВ» (490 АМВ); «Наддніпрянська 50»; «Колективний 111 СВ»; «ТОСС 218 МВ»; «Дніпровський 177 СВ» (203 МВ, 345 МВ) та ін.

Динаміку посівних площ під кукурудзу у співвідношенні 1990 – 2020 роки наведено на рис. 1.8.

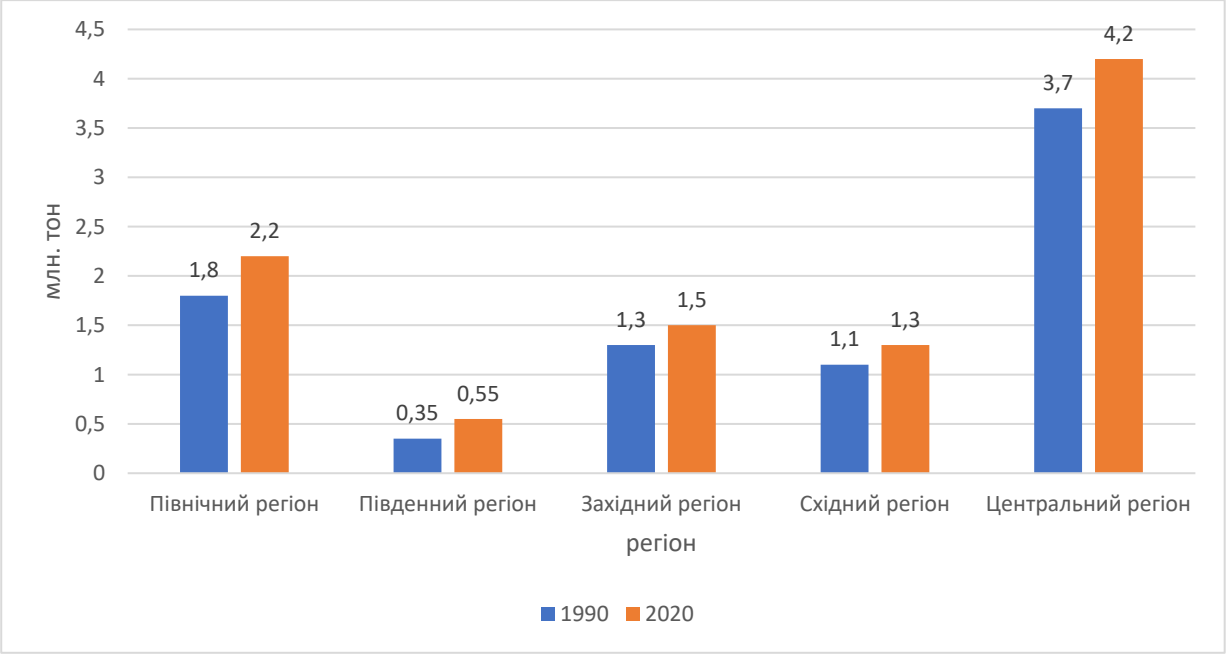


Рис. 1.8. Динаміка посівних площ за регіонами України під кукурудзу у співвідношенні 1990 – 2020 роки

Загальний вид зернівки кукурудзи наведено на рис. 1.9.

Рис. 1.9. Загальний вид зернівки кукурудзи

Відповідно до вимог ДСТУ 2240-93 «Кукурудза. Технічні умови» [64] вологість кукурудзи повинна бути не більше 15%; вміст зернової домішки – не більше 3 – 15%; вміст сміттєвої домішки – не більше ніж 1 – 5%; крупність – не менше 80%; зараженість шкідниками – не дозволено.

Таким чином, наукові дослідження, що мають на меті підвищення ефективності процесу підготовки високоякісного НМ кукурудзи [65],

удосконалення машин та обладнання, що реалізують процес, шляхом механіко-математичного моделювання та оптимізації кінематичних режимів сепаруючих машин, свідчать про актуальність обраного напрямку досліджень.

1.1.3. Стан і особливості післязбиральної обробки насіння соняшнику.

Соняшник є другою за обсягом з виробництва олійних культур у світі, із загальною часткою майже 10%. Результати світового виробництва соняшнику у 2021/2022 роках становлять 57,2 млн тон. В України виробляється 17,5 млн т або 31% від світового об'єму.

У 2021/2022 роках у світі збиральна площа склала 28,75 млн га, що на 7% більше попереднього сезону і найбільший результат приросту за останні 5 років [79]. В Україні збиральна площа склала 7,1 млн га або 25% від загальної кількості у світі. За останніми даними USDA, за десять сезонів – з 2011/2012 по 2021/2022 роки – загальний обсяг торгівлі соняшником збільшився більш ніж у півтора рази.

ТОП-10 лідерів з виробництва соняшнику: Україна (17,50 млн. тон), Аргентина (3,35 млн. тон), Китай (2,90 млн. тон), Румунія (2,90 млн. тон), Болгарія (2,00 млн. тон), Франція (1,92 млн. тон), Угорщина (1,83 млн. тон), Туреччина (1,75 млн. тон), Казахстан (1,03 млн. тон) [80]. Динаміку виробництва соняшнику наведено на рис. 1.10.

До ТОП-10 гібридів соняшнику, найбільш поширених Україні в сезоні 2021/2022 років, увійшли переважно ранньо- та середньостиглі сорти закордонного походження [66]. Їх сумарна частка у загальній площі насінницьких посівів під культуру становила 34,61% (3783,78 га). Найбільші площі при цьому зайняли середньоранній гібрид «64ЛЕ25» – 664,8 га та «НК Неома» – 620,0 га. Лідером ринку в сезоні 2020/2021 залишається «Syngenta», яка охоплює 40% ринку [78]. До ТОП також увійшли «Lidea», «MAS Seeds» та «Pioneer».

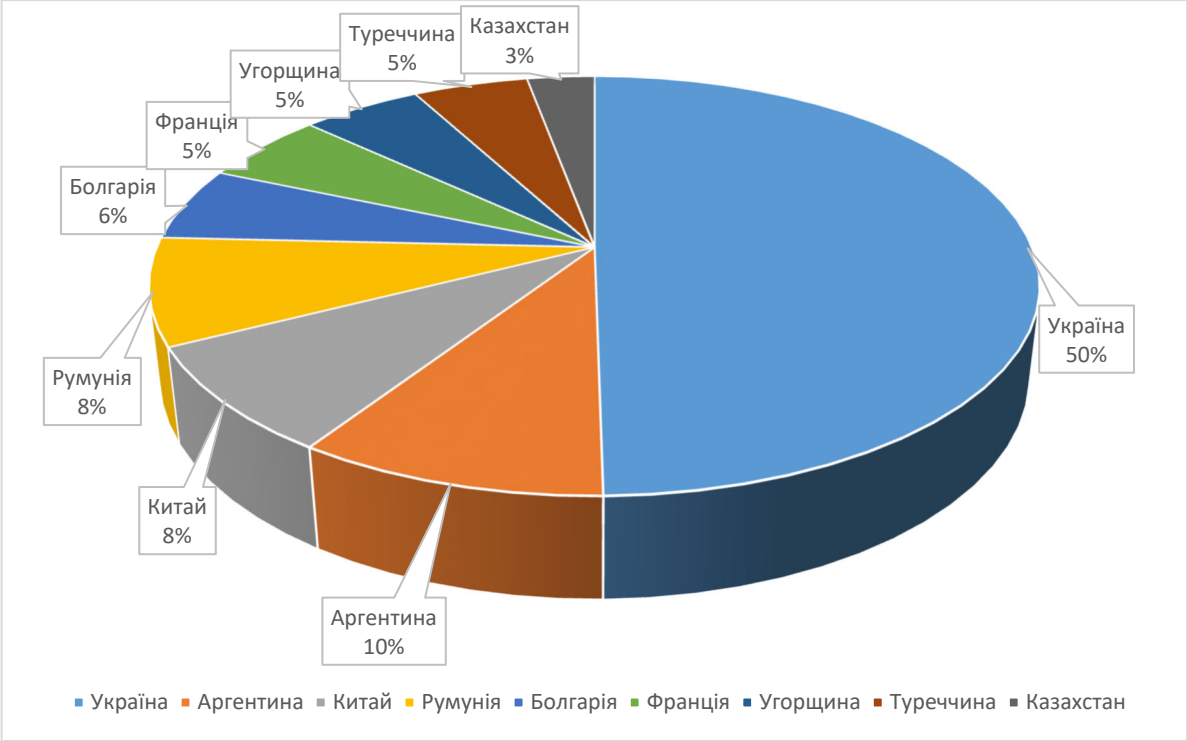


Рис.1.10. Інфографіка світових лідерів з виробництва соняшнику

Динаміку посівних площ під соняшник у співвідношенні 1990 – 2020 роки наведено на рис.1.11.

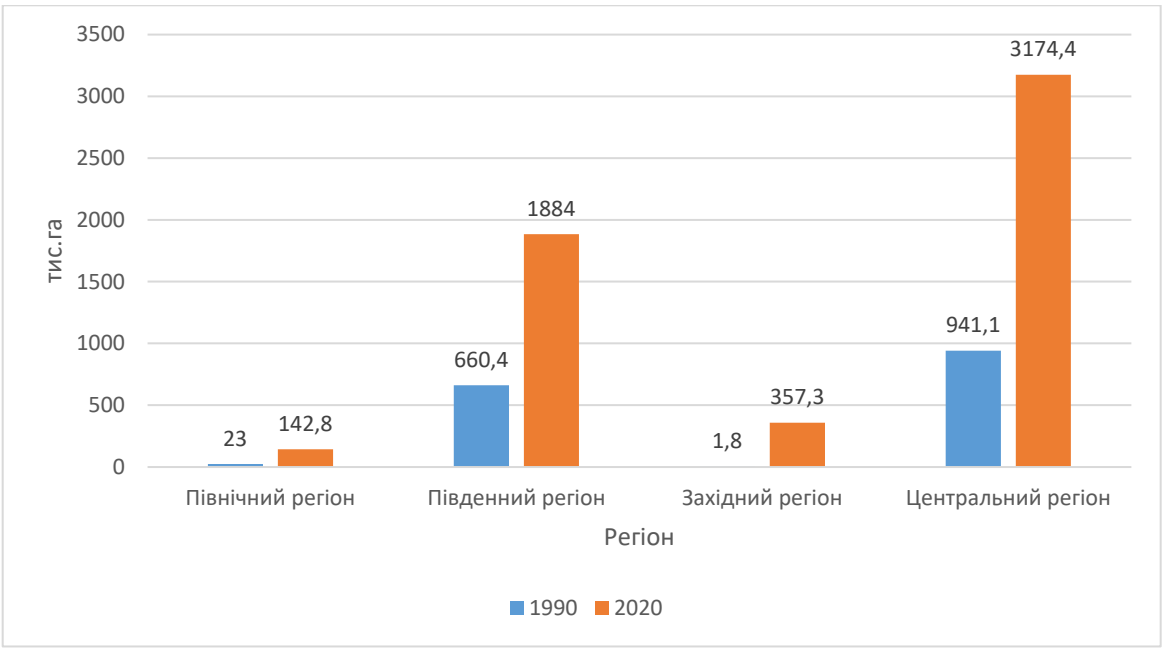


Рис. 1.11. Динаміка посівних площ за регіонами України під соняшник у співвідношенні 1990 – 2020 роки

Загальний вид зернівки насіння соняшника наведено на рис. 1.12.

Рис. 1.12. Загальний вид зернівки насіння соняшнику

Під час лабораторних досліджень матеріалу проводиться аналіз кольору, запаху та смаку насіння. Досліджується рівень засміченості, вміст жиру, зараженість шкідниками та хворе зерно.

При обробці НМ соняшнику вологість не повинна перевищувати 19% [97]. До домішок матеріалу слід віднести олійну (некондиційне зерно) та сміттєву домішку (залишки зерна неосновної культури, лушпиння, гниле та хворе насіння, земля, пісок тощо).

Таким чином, наукові дослідження, що мають на меті підвищення ефективності процесу підготовки високоякісного НМ соняшнику [65], удосконалення машин та обладнання, що реалізують процес, шляхом механіко-математичного моделювання процесу та оптимізації кінематичних режимів сепаруючих машин, свідчать про актуальність обраного напрямку досліджень.

1.1.4. Стан і особливості післязбиральної обробки насіння сої

Соя є лідером з популярності серед олійних культур та займає 60% світового виробництва.

За інформацією USDA у 2021/2022 роках світове виробництво сої становило 361,82 млн. тон, що на 7% більше ніж у сезон 2019/2020 років.

Площі під посіви сої в світі збільшились до 127,98 млн. га, що на 4% більше від попереднього року.

ТОП - 5 лідерів-експортерів сої: Бразилія (85 млн. тон), США (61,2 млн. тон), Аргентина (7,0 млн. тон), Парагвай (6,5 млн. тон), Канада (4,2 млн. тон) [80] (рис. 1.13).

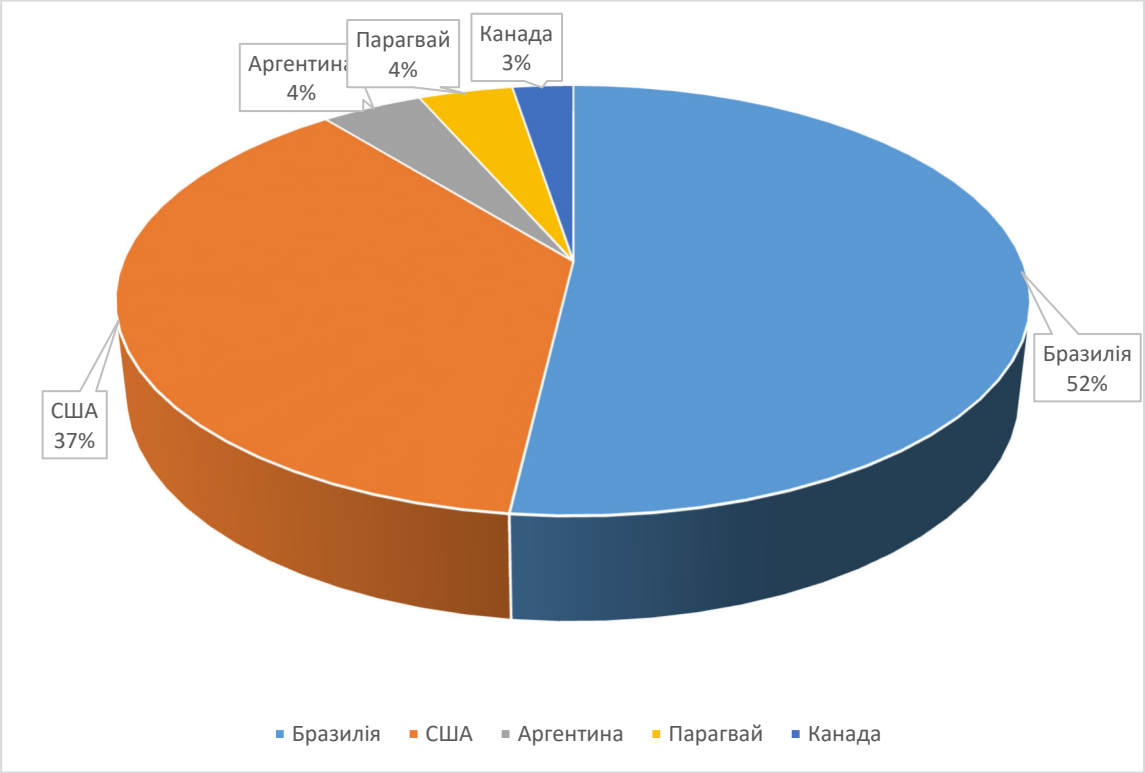


Рис. 1.13. Інфографіка узагальненої інформації ТОП - 5 світових лідерів - експортерів насіння сої

ТОП - 5 країн-імпортерів: Китай (100 млн. тон), країни ЄС (15,2 млн. тон), Мексика (6,2 млн. тон), Аргентина (4,7 млн. тон), Єгипет (4,2 млн. тон).

Лідером з урожайності у сезонт2021/2022 стала Бразилія з показником – 3,47 т/га. Показники урожайності у США – 3,38 т/га, Канаді – 3,11 т/га.

Вітчизняний ринок з виробництва сої відносно новий та перспективний і розвивається динамічно. Країна посідає дев’яте місце в

виробництва цієї культури. На рис. 1.14. наведено ТОП - 5 областей - лідерів України з виробництва сої.

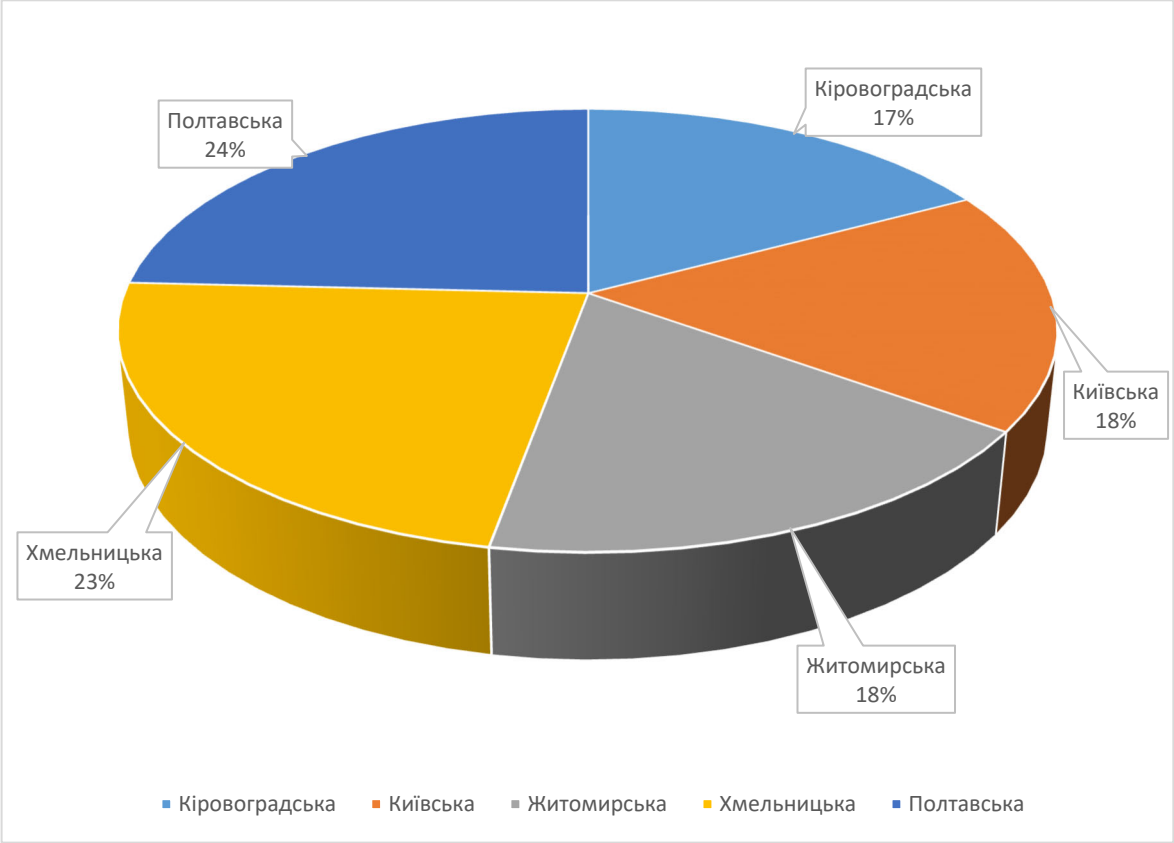


Рис. 1.14. Інфографіка ТОП - 5 областей - лідерів України з виробництва сої

Загальний вид насіння сої наведено на рис. 1.15.

Рис. 1.15. Загальний вид насіння сої

В залежності від сорту, насіння сої буває жовтого, зеленого, чорного та коричневого кольору [111]. Потенційні можливості сорту реалізуються лише при сівбі насінням високих сортових та посівних кондицій, яке вирівняне за крупністю, а також в умовах вирощування, що найбільш відповідають їх біологічним властивостям.

Посівні якості насіння та маса 1000 зерен (ІР ім. В.Я. Юр'єва НААН) представлено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3.

Посівні якості насіння та маса 1000 зерен (ІР ім. В.Я. Юр'єва НААН)

Сорт	Фракція насіння			
	вихідна	крупна	середня	дрібна
Енергія проростання, %				
«Романтика»	85	86	88	79
«Скеля»	86	86	86	83
«НІР$_{05}$»	А-3,93; Б-5,56; АБ-7,86			
Лабораторна схожість, %				
«Романтика»	92	93	93	89
«Скеля»	93	95	94	92
«НІР$_{05}$»	А-2,62; Б-3,70; АБ-5,23			
Маса 1000 зерен, г				
«Романтика»	143,0	144,2	144,1	141,3
«Скеля»	130,0	132,2	131,5	128,7
«НІР$_{05}$»	А-3,86; Б-5-47; АБ-7,73			

Збирання сої відбувається коли листя стає сухим, а насіння визріло, при вологості насіння 13-15% [54, 67].

Таким чином, наукові дослідження, що мають на меті підвищення ефективності процесу підготовки високоякісного НМ сої [65], удосконалення машин та обладнання, що реалізують процес, шляхом механіко-

математичного моделювання процесу та оптимізації кінематичних режимів сепаруючих машин, свідчать про актуальність обраного напрямку досліджень.

1.1.5. Аналіз проблеми підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу

Проблему підготовки високоякісного НМ становить ефективне відділення зернівок, які за розмірними характеристиками відповідають вимогам, однак уражені шкідниками і/або мають мікро- та макротравми [56, 59]. Такі зерна не можуть складати насіннєву фракцію. Відділення їх звичайними засобами з використанням решітної сепарації є малоефективним [57].

Технологічна лінія підготовки НМ і доведення його до кондиційних вимог являє собою комплексну, поетапну низку машин і обладнання із попереднього очищення, сушіння, первинного, вторинного і спеціального очищення (рис.1.16.). Вимогою да такої технологічної лінії є пристосованість для очищення широкого спектру зернових культур і доведення якісних показників культури до високих посівних кондицій з мінімальним механічним впливом від робочих органів машин для запобігання виникненню травмування зернівок [51, 60].

Доведено [60], що від ступня контактної взаємодії елементів зернівок з робочими органами зерноочисних машин залежать біологічні властивості культури.

ЗВ, отриманий після комбайну, містить близько 30% домішок, які різняться від основної культури за хімічним складом та мають вологість близько 40 [210, 214].

Зміна вологості зернівок визначально впливає на їх пружність, твердість, крихкість. В сухих зернівках виникають тріщини та зрив оболонок.

Занадто вологе зерно, понад 22 % [49] призводить до травмування і розвитку мікроорганізмів, грибків, плісняви втрачається його енергія проростання.

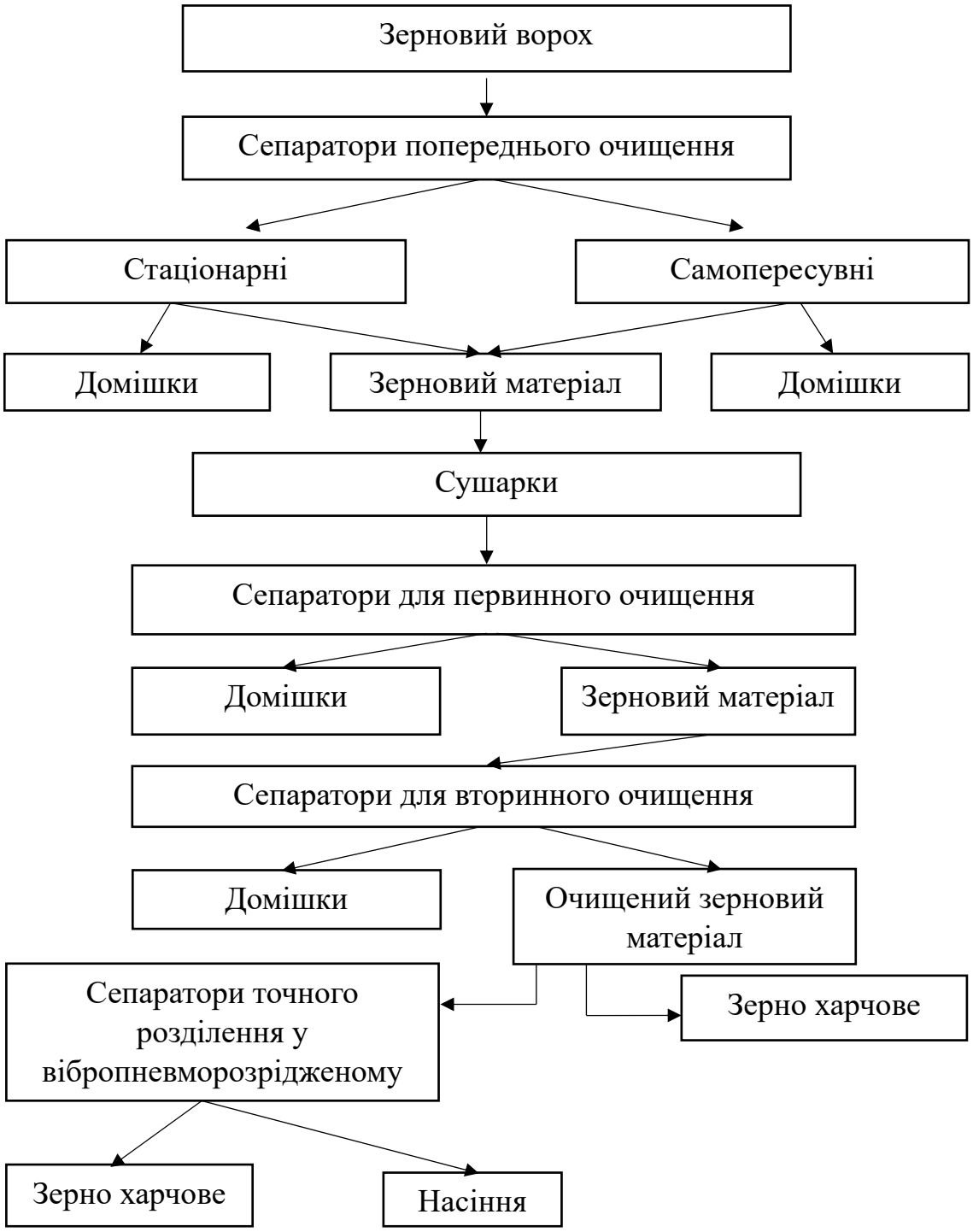


Рис. 1.16. Узагальнена структурна схема технологічного процесу підготовки насіння

Представлено узагальнену структурну (рис. 1.16) та технологічну схему (рис. 1.17) процесів очищення, розділення і сепарації НМ пшениці з використанням машин і обладнання, яке випускається серійно.

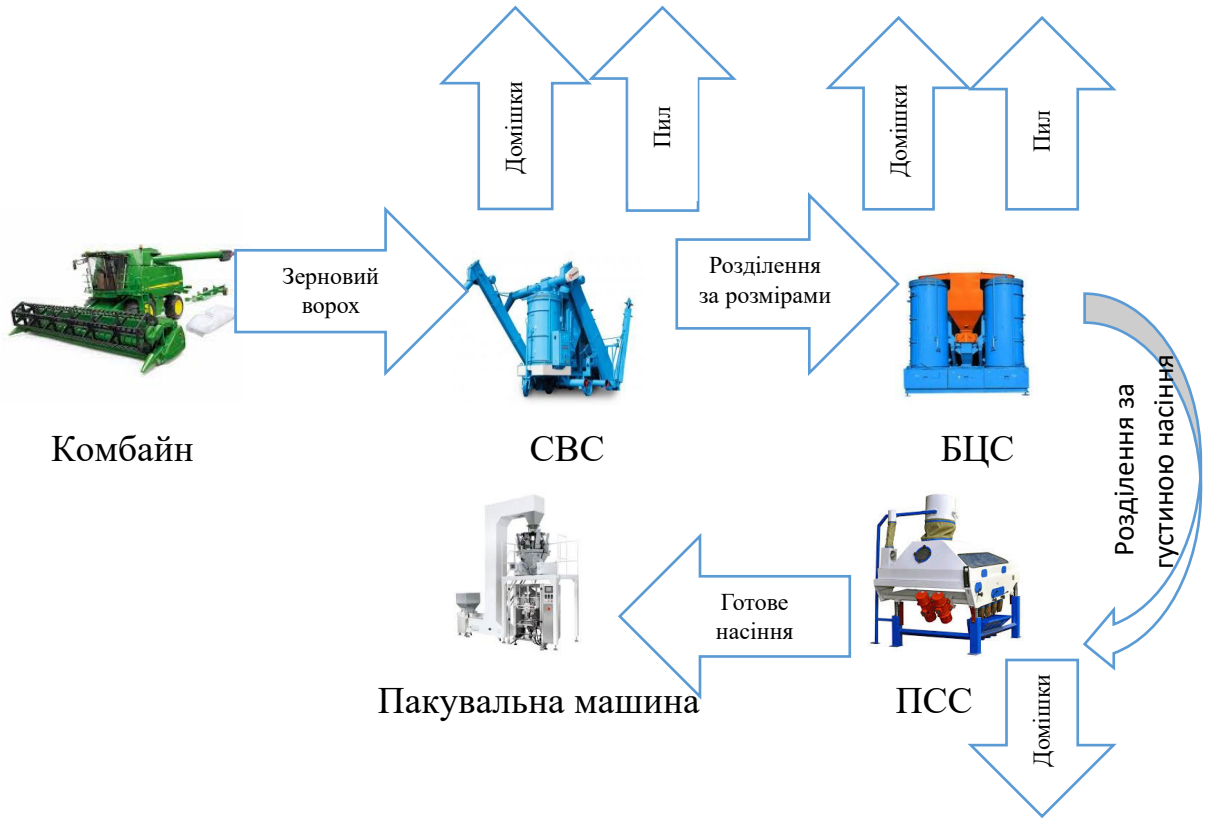


Рис. 1.17. Узагальнена технологічна схема процесів очищення та розділення НМ, з використанням машин і обладнання, яке випускається серійно

Процес підготовки високоякісного НМ є предметом постійного пошуку інноваційних рішень вітчизняними і закордонними науковцями [7, 13, 17, 18, 55, 95, 97, 124, 158].

Роботами Грабар І.Г. та Дерев'янко Д.А. [51, 60] доведено, що насіння з більшою власною густиною є найбільш дозрілим і має підвищену до 60% енергію проростання.

Під густиною насіння будемо розуміти масу частинки в одиниці об'єму, який вона займає.

Густина зернівки може змінюватись в значних межах і залежить від комплексу факторів.

Зернівки, що мають ушкоджений ендосперм мають, відповідно, і меншу густину. Так само на густину зернівки впливає наявність в ній повітря. Вміст повітря у зернинках різних культур знаходиться в межах від 6% до 35% [120, 122, 205, 213].

Для прикладу, середня густина зернівки пшениці складає: 1,50 г/см^3 – крохмалю; 1,34 г/см^3 – білку; 1,26 г/см^3 – клейковини; 1,30 г/см^3 – клейковини; 0,92 г/см^3 – жиру [86, 109, 140].

Густина зернівки залежить не тільки від її біохімічного стану, а і від її міри дозрівання [81] (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Середня густина насіння в залежності від фази дозрілості

Культура	Фаза дозрілості		
	Молочна г/см^3	Воскова г/см^3	Повна г/см^3
Пшениця	1,150	1,240	1,330
Соняшник	0,6	0,8	0,9
Кукурудза	0,6	0,8	0,82
Соя	1	1,05	1,25

Збільшення густини насіння в залежності від фази дозрівання пояснюється тим, що під час дозрівання зменшується вологість і збільшується вміст крохмалю, який має більшу густину.

Таким чином, розділення НМ за густиною насіння дозволяє відокремлювати не тільки домішки, що важко відокремлюються, але й травмоване, незріле, а також насіння з високою вологістю.

Широкого впровадження набули два способи розділення НМ за густиною насіння: розділення у рідинах – «вологий» («рідинний») і псевдорозрідженому шарі – «сухий» [41, 82, 92, 93].

«Вологі» сепаратори призначено для виділення з загальної маси зернового матеріалу частинок, що мають механічні ушкодження, хворе та уражене шкідниками зерно. Одночасно з цим, матеріал очищається від пилу, смоли та інших домішок, які неможливо відокремити при розділенні матеріалу за розмірними характеристиками.

Принцип роботи «вологих» сепараторів полягає у тому, що НМ має, зазвичай, інше значення густини, ніж рідини, які використовуються при сепаруванні. Таким чином, біологічно активне насіння залишається на поверхні рідини, а насіння та домішки, які необхідно видалити занурюються до низу. В залежності від густини рідини, що використовується, процес може протікати у зворотному варіанті: частинки з більшою густиною, ніж рідина, занурюються до низу, а важковідокремлювана домішка пливе по поверхні.

Існує два способи використання рідинних сепараторів:

- безперервне сепарування: частинки НМ, що мають меншу густину, ніж домішки, спливають на поверхню рідини та рухаються до ємності сепаратора до вивантажувального приймача;
- порційне сепарування: частинки НМ, що мають густину більшу, ніж важковідокремлювані домішки, занурюються до дна баку та видаляються після обробки усієї партії матеріалу.

НМ збирається до ємностей для процесу сушіння.

«Вологі» сепаратори можуть використовуватись як при сепаруванні невеликої кількості матеріалу, так і на насіннєвих заводах при роботі в складі поточної лінії.

При використанні «мокрого способу» сепараторами ВОС-3 та ВОС-4, розділення відбувається у розчинах різних речовин горизонтальним або вертикальним струменем води. У процесі розділенні матеріалів, густина яких перевищує густину води, використовують сольові розчини, суспензії води та крейди.

У потоці води розділення відбувається на водоструменевому сепараторі продуктивністю 2 т/год (рис. 1.18.).

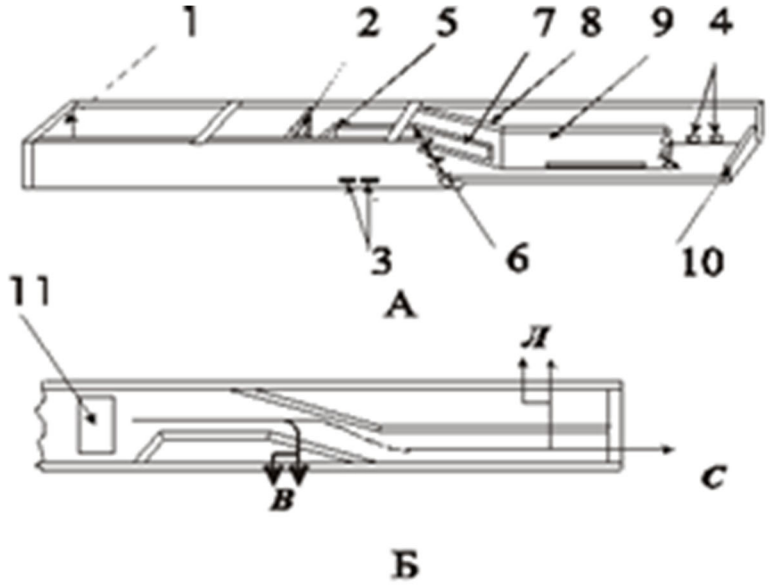


Рис. 1.18. Водоструменевий сепаратор: а – загальний вид; б – схема руху матеріалу; В – важка фракція; С – середня; Л – дрібна фракція та легкі домішки; 1 – заслінка; 2 – сітка; 3, 4 – вихідні отвори; 5, 6, 7, 8 та 9 – перестінки; 10 – поперечна стінка; 11 – засипний ківш

Розділення у рідинах дозволяє досягти найвищу гостроту розділення. Недоліком такого способу розділення є необхідність просушування насіння після його розділення, що суттєво збільшує собівартість процесу, тому широкого розповсюдження сепаратори «мокрого» типу не отримали.

Широке поширення отримав «сухий» спосіб розділення НМ за густиною у псевдорозрідженому шарі, що утворюється шляхом дії на НМ однієї або декількох сил: вібраційний – дія на НМ вібрації робочої (опорної) поверхні; пневматичний – дія на НМ повітряного потоку (постійний або пульсуючий); вібропневматичний – одночасна дія на НМ вібрації робочої поверхні та повітряного потоку; пневмовідцентровий – одночасна дія на НМ

повітряного потоку та відцентрової сили; вібропневмовідцентровий – одночасна дія на НМ вібрацій робочої поверхні, повітряного потоку та відцентрової сили.

Перший вібропневмосапаратор розроблено у 1897 році. «Wolter Steele, Edward Steele і Henry Sutton» (США) для збагачення корисних копален [153, 193]. Конструкція столу передбачала деку у формі трапеції.

Перші вітчизняні розробки, присвячені дослідженням процесів сепарації НМ у вібропневморозрідженому шарі проводились на заводі «Серп і молот» (м. Харків), що випускав певмосортувальні столи ССП-1,5 (рис. 1.19) і БПС-3У (рис. 1.20).

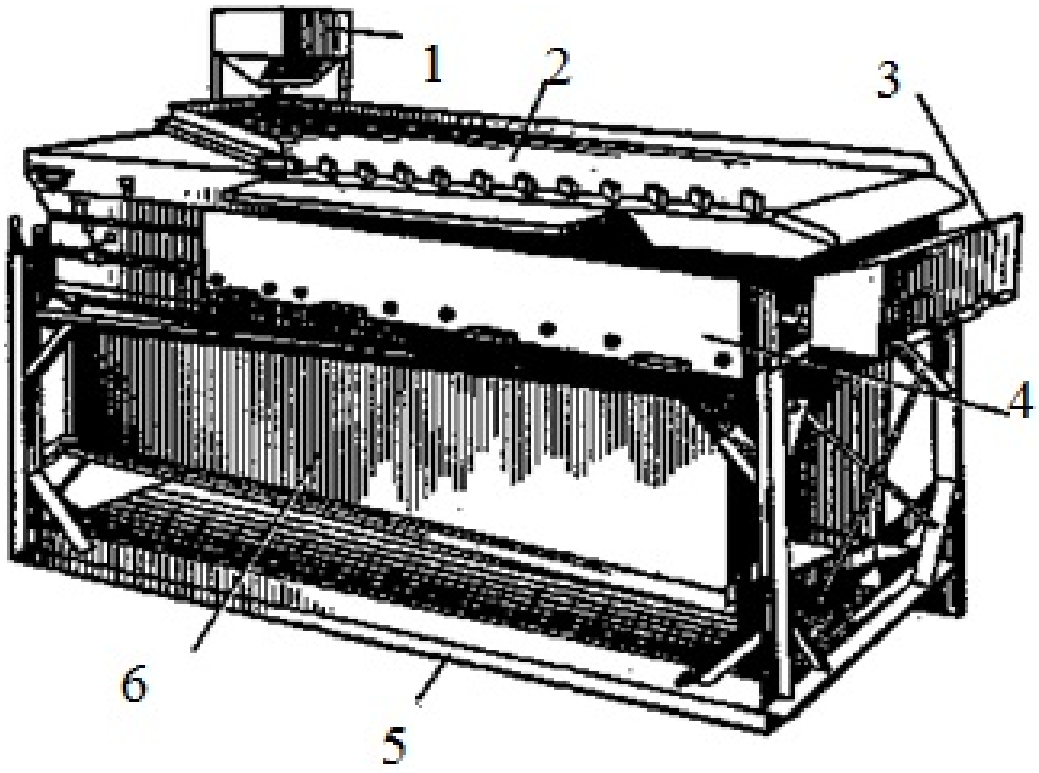


Рис. 1.19. Пневматичний сортувальний стіл ССП – 1,5: 1 – ківш завантажувальний; 2 – дека; 3 – приймач легкої фракції; 4 – приймач важкої фракції; 5 – рама; 6 – камера повітряна

Розділення матеріалу пневмосепарувального столу БПС відбувається на робочій поверхні, яка має рифлі-інтенсифікатори. В залежності від матеріалу, що потрапив на обробку, БПС мав змінні робочі поверхні: металеву сітку – для насіння пшениці, гороху; полотняну тканину – для розділення насіння мілконасіннєвих культур (конюшина тощо).

При формуванні псевдорозрідженого шару під дією коливань робочої поверхні та впливу повітряного потоку НМ розділявся на фракції різної густини.

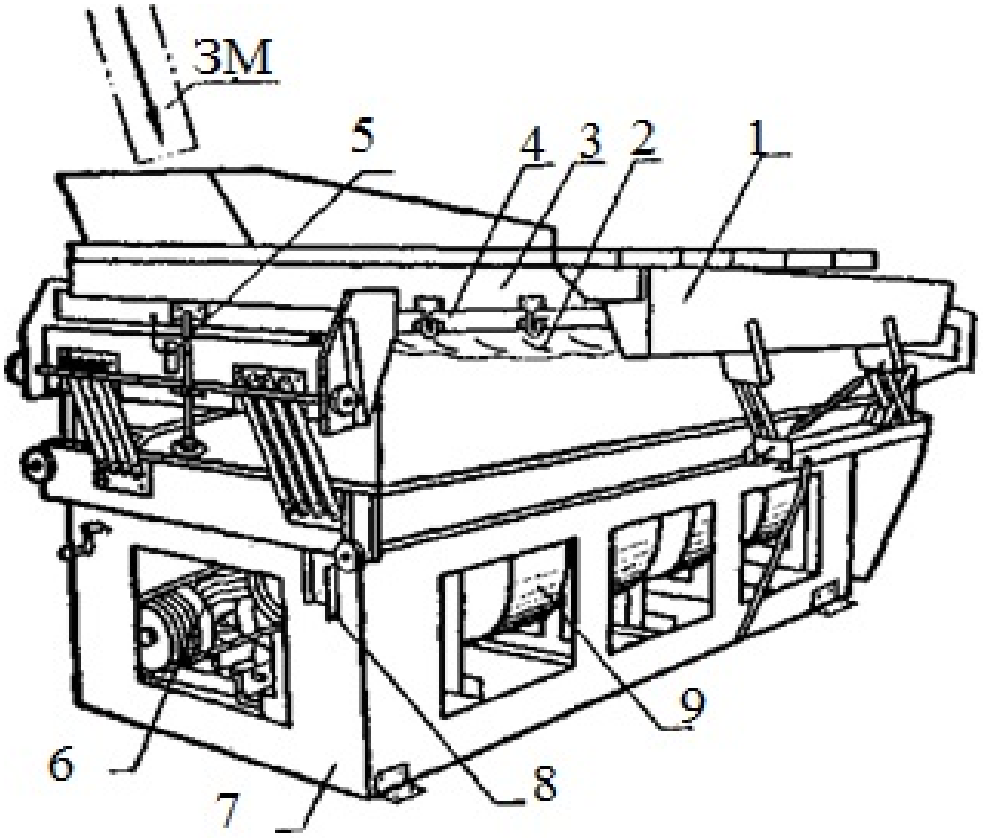
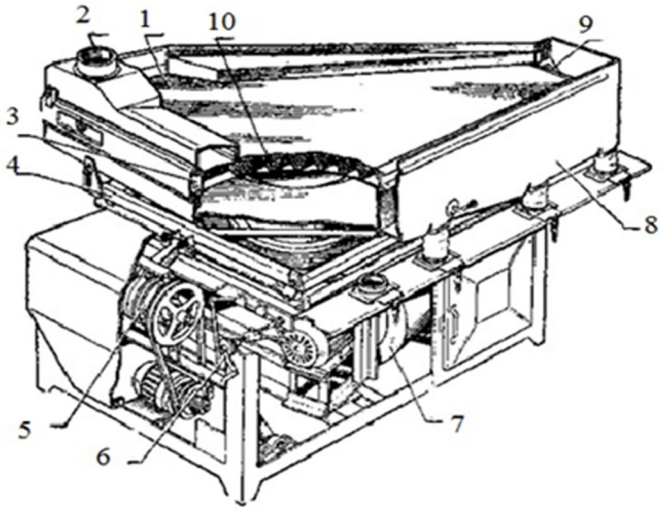


Рис. 1.20. Пневмосортувальний стіл БПС: 1 – лоток транспортувальний; 2 – рукав; 3 – кузов деки; 4 – рама опорна; 5 – шкала повздовжнього нахилу деки; 6 – варіатор приводу; 7 – станина; 8 – шкала поперечного нахилу дека; 9 – вентилятор



а)

б)

Рис. 1.21. Пневмосепарувальний стіл стіл ПСС – 2,5: а) конструктивна схема; б) загальний вид, де:1 – дека; 2 – патрубок завантажувальний; 3 – верхня рамка; 4 – нижня рамка; 5 – механізм регулювання амплітуди коливань деки; 6 – механізм регулювання частоти коливань деки; 7 – вентилятор; 8 – приймач фракцій; 9 – клапан; 10 – решітка підтримуюча

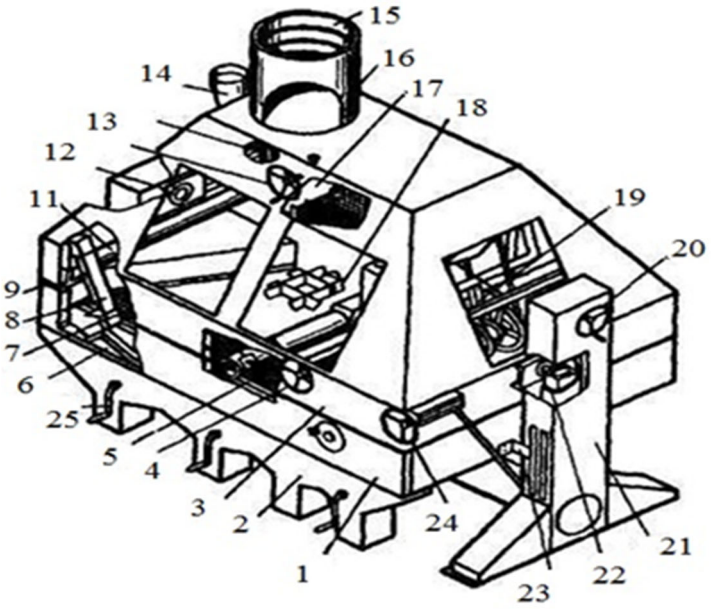
Пневмосепарувальний стіл ПСС - 2,5 (рис. 1.21) використовувався для точного розділення та доочистки НМ. Робочу поверхню ПСС - 2,5 виконано у формі металевої сітки під якою розташовано дві решітки. Перша використовувалась для дотриманняя необхідного повітряного напору в зоні попереднього утворення шару НМ, друга решітка використовувалась для рівномірного розподілу повітряного потоку по робочій поверхні. Повітряний потік, що потрапляв до зони розділення, проходив попередню фільтрацію.

Пневмосепарувальний стіл СПС - 5 (рис. 1.22) використовувався переважно для розділення та доочищення НМ зернових та зернобобових культур. На відміну від машин свого класу, розділення відбувалось за комплексом фізико-механічних властивостей (густин насіння, форма поверхні, пружні характеристики).

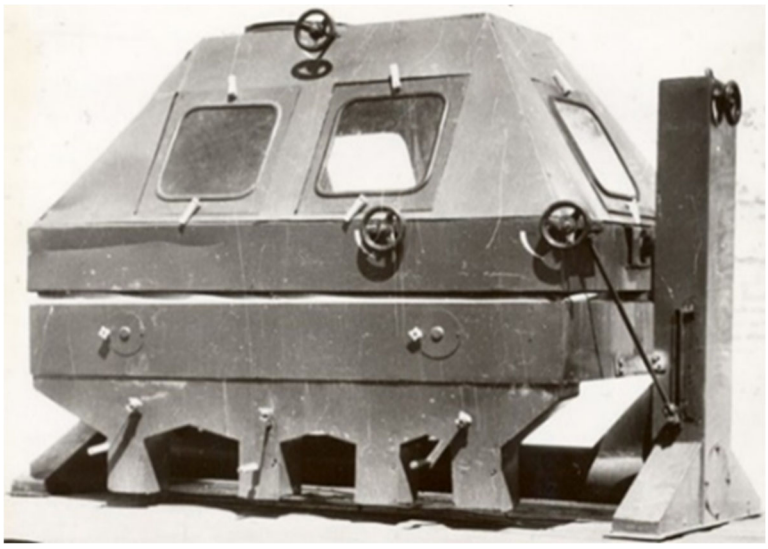
Пневмосепарувальний стіл СПС - 5 включав три схеми роботи: очищення, сортування, очищення та сортування. Зміна схеми роботи відбувалась шляхом перекриття відповідних клапанів. За необхідності оператор налаштовував додаткові схеми роботи пневмосепарувального столу.

Розділення та очищення НМ від домішок машиною кінцевої очистки МОС - 9С відбувається за густиною та геометричними розмірами частинок НМ. Вихідний матеріал розділяється на чотири фракції: важка (основна) фракція, важка домішка, легка домішка та середня (проміжна) фракція.

Визначальний вплив на результат розділення НМ має дотримання оптимальних режимів роботи. Зміна повздовжнього кута нахилу робочої поверхні суттєво впливає на інтенсивність сходу легкої фракції, а поперечного кута – на швидкість руху НМ по робочій поверхні.

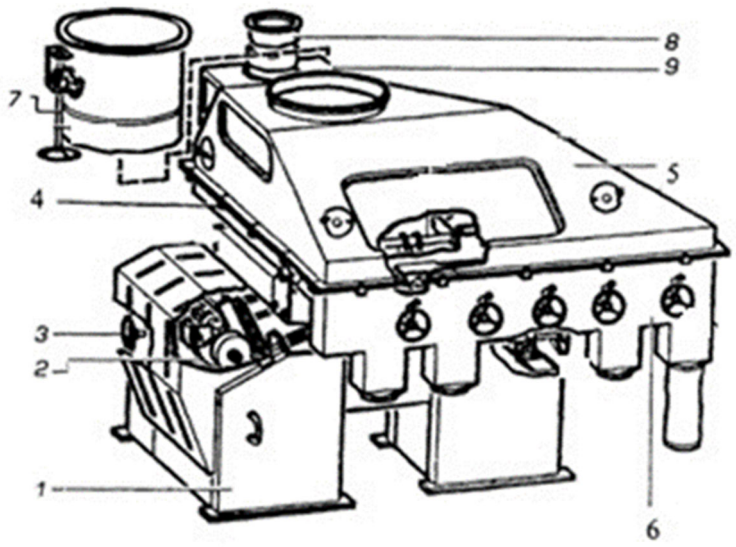


а)



б)

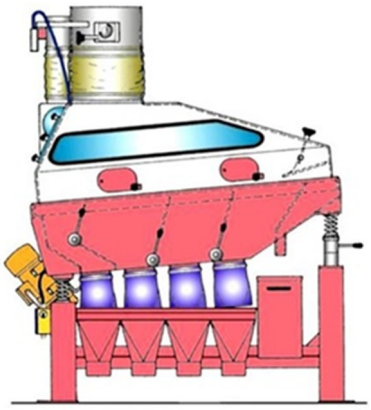
Рис. 1.22. Пневматичний сортувальний стіл СПС - 5: а) конструктивна схема; б) загальний вид, де: 1 – корпус деки; 2 – приймач фракцій; 3 – зонт; 4 – регулятор частоти коливань деки; 5 – пружина; 6 – заслінка; 7 – дека; 8 – підвіска; 9 – ущільнювач; 10 – обтягувач; 11 – вісь; 12 – регулятор швидкості повітряного потоку; 13 – світильник; 14 – рукав завантажувальний; 15 – патрубок; 16 – хомут; 17 – бункер; 18 – фільтр; 19 – вібропривід; 20 – регулятор повздовжнього кута нахилу деки; 21 – станина; 22 – вісь; 23 – кронштейн; 24 – регулятор поперечного кута нахилу деки; 25 – рукояті



а)

б)

Рис. 1.23. Машина кінцевої очистки МОС – 9С: а) конструктивна схема; б) загальний вид, де: 1 – станина; 2 – вібропривід; 3 – механізм регулювання частоти коливань деки; 4 – дека; 5 – зонт; 6 – приймач фракцій; 7 – регулятор швидкості повітряного потоку; 8 – рукав завантажувальний; 9 – живильник



а)

б)

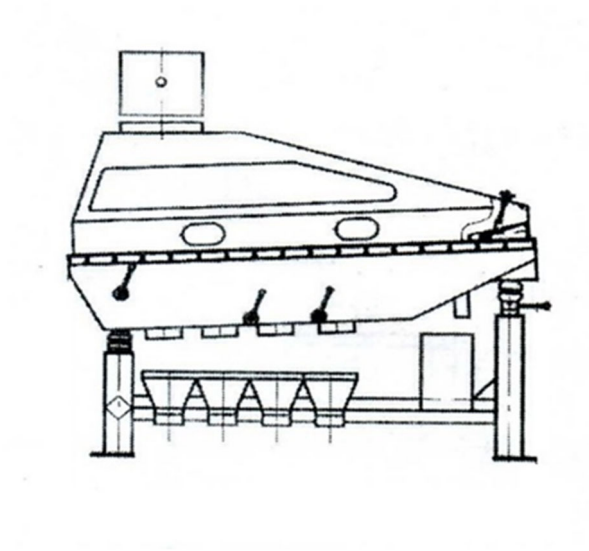
в)

г)

д)

ж)

Рис. 1.24. Вібропневматичні сепаратори закордонного виробництва: а) «OKRUM» (Італія); б) «PETKUS» KD200 (Німеччина); в) «PETKUS» (Німеччина) KD50; г) «KAMAS» (Швеція); д) «Jubus» (Італія); ж) «JGT 1200 JK Machinery» (Чехія)



а)

б)

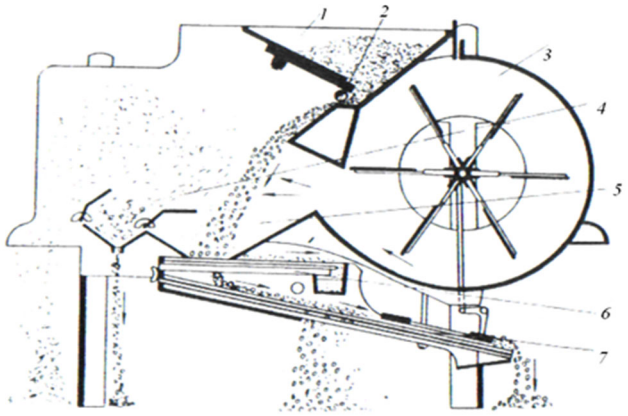
в)

г)

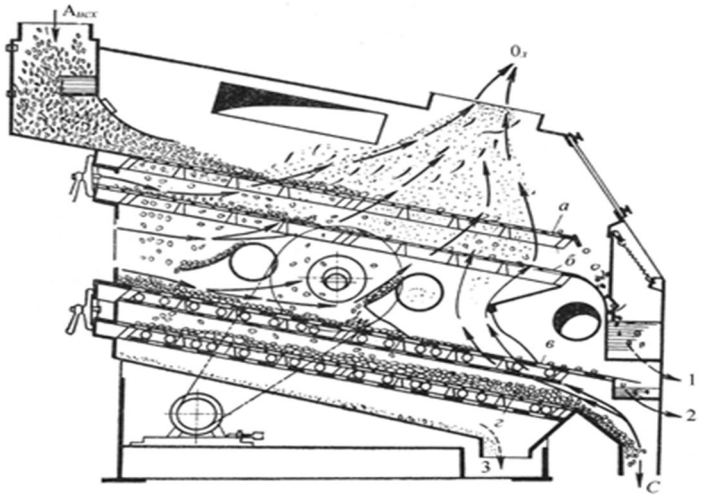
Рис. 1.25. Пневмосортувальні столи вітчизняного виробництва: а) схема; б) загальний вид ППС - 2, 5 (Хорольський механічний завод); в) ПСС «ООО Фадеев - агро»; г) Клен - ПС-5 «Агро Вектор»

У класі машин, що розділяють НМ за густиною насіння та аерогравітаційними властивостями переважають два типи: безканальні та канальні.

В свою чергу, безканальні можна градувати на нагнітального (рис. 1.26, а) та всмоктуючого типу (рис. 1.26, б).



а)



б)

Рис. 1.26. Конструктивні схеми сепаруючих машин з безканальним пневмосепаруючим пристроєм: а) сепаруюча машина «Триумф – 100» (Leino): 1 – бункер; 2 – живильний валик; 3 – вентилятор; 4, 5 – конуси; 6 – сито приймальне; 7 – сито підсівне; б) сепаруюча машина – «Maig»: 1, 2 – крупні домішки; 3 – мілкі домішки; Аисх – сировина; Ол – легкі домішки; С – очищене зерно; *а, б, в, г* - решета

Пневмосепаруючі пристрої, на відміну від безканальних, мають більш якісну технологію очищення матеріалу. Це пов’язано з тим, що їх конструкція враховує можливість регулювання швидкості та напрям повітряного потоку.

Принцип роботи вібропневматичного сепаратора (ВПС) (рис. 1.27) полягає у тому, що матеріал, рухаючись по робочій поверхні, яка виконує коливально-поступальний рух, розшаровується на фракції різної густини. Дрібні частинки опускаються, а частинки з більшою густиною піднімаються до гори.

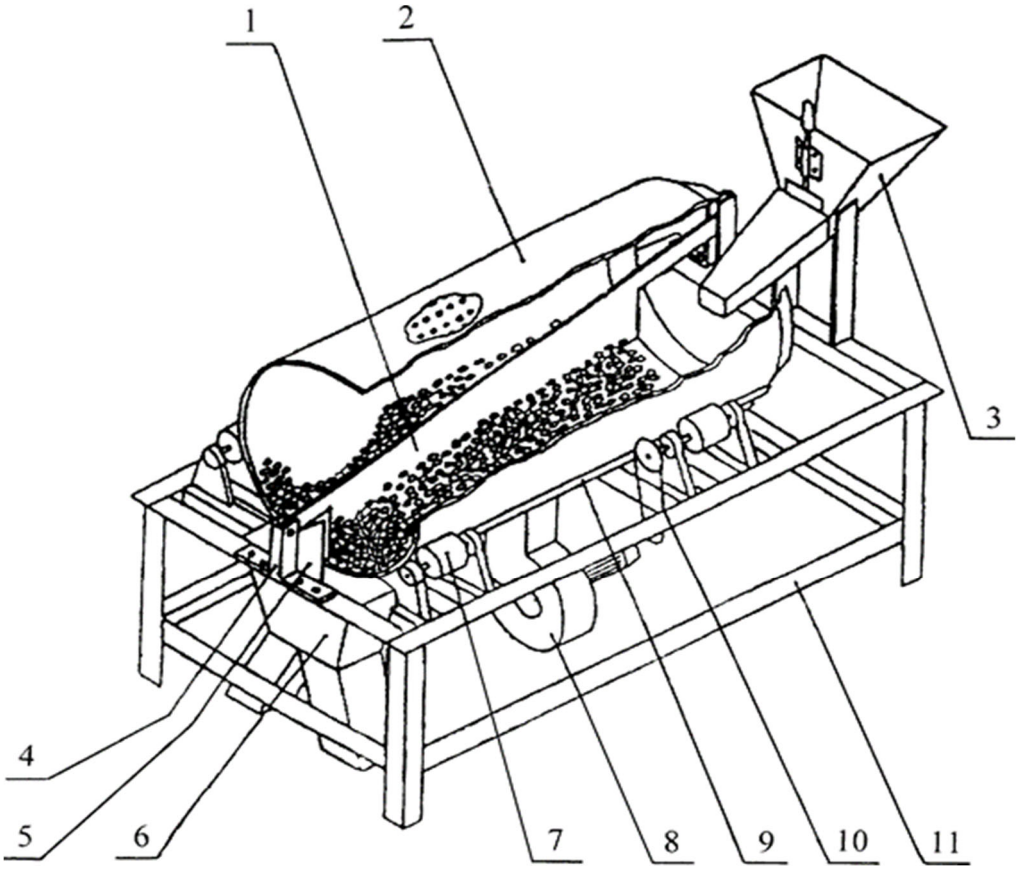


Рис. 1.27. Вібропневматичний сепаратор з циліндричною робочою поверхнею: 1 – перегородка; 2 – барабан перфорований; 3 – бункер дозатор; 4 – кронштейн; 5 – планка, що розділяє НМ на фракції; 6 – приймачі фракцій; 7 – роліки; 8 –вентилятор; 9 –кожух повітряпровідний; 10 – привід барабану; 11 – рама

Важливу роль у процесі розділення НМ вібропневматичним сепаратором ВПС відіграє кут нахилу циліндричної робочої поверхні, як правило кут нахилу становить 30^0 до напрямку коливань. Включення ВПС до технологічної лінії виробництва НМ є доцільними у випадку використання у якості ознаки роздільності, пружних властивостей.

Стіл «Damas SB» (рис. 1.28) використовується для додаткової сепарації та доочищення НМ, шляхом розділення на дві фракції: важку та легку. На відміну від більшості відомих сепаруючих машин, НМ ефективно розділяється навіть при однаковій густині частинок. В такому випадку матеріал розділяється за ефектом укосу.

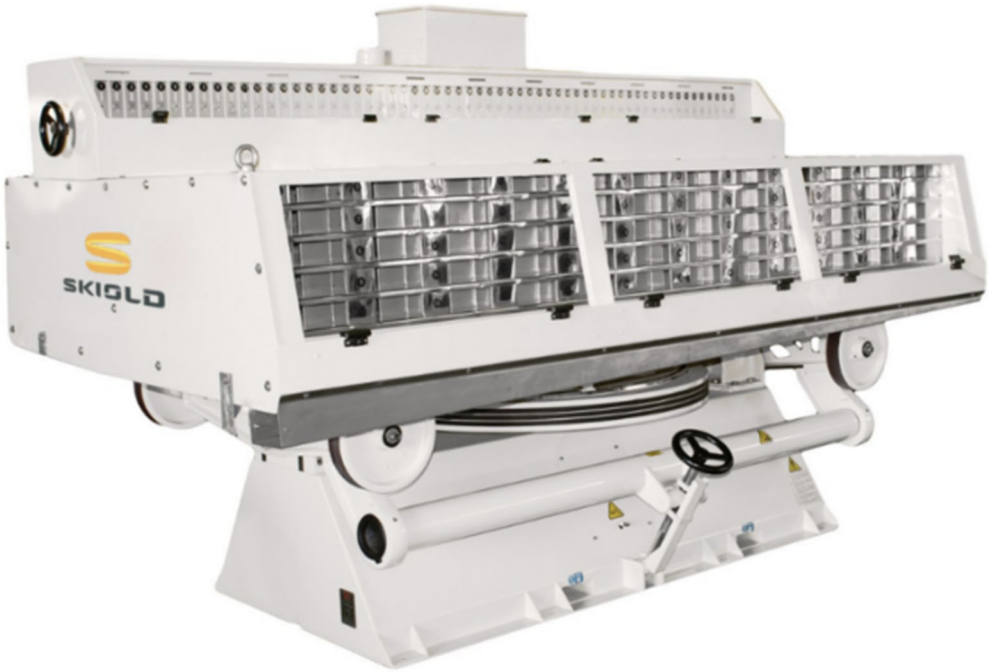


Рис. 1.28. Загальний вид столу «Damas SB»

Враховуючи значну кількість науково-технічних розробок з отримання високоякісного НМ, проведено аналіз і систематизацію та встановлено, що в загальному вигляді процес розділення НМ на робочій поверхні вібропневматичних сепараторів складається з фаз, що проходять одночасно: розшарування НМ на фракції – перша фаза; друга фаза – під час якої відбувається транспортування фракцій (важка (ВФ), середня (СФ) і легка фракції (ЛФ)) по робочій поверхні до вивантажувальних пристроїв; третя фаза – процес вивантаження фракцій відповідної густини.

НМ, що розділений за густиною насіння, рухається пошарово. Нижній елементарний шар НМ, що складається з частинок найвищої густини, безпосередню взаємодіє з робочою поверхнею. Верхній шар НМ, що складається з частинок меншої густини (насіння неосновної культури, травмоване або хворе насіння), рухається за власною траєкторією по нижнім елементарним шарам. Таким чином, в залежності від налаштувань пневмосепарувального столу, можна отримати декілька шарів НМ, що різняться за власною густиною та рухаються за відповідними траєкторіями.

В залежності від форми робочої поверхні та характеру руху по ній НМ, можна класифікувати типи робочих поверхонь, що набули найбільшого поширення (рис. 1.29.).

Робочі поверхні типу (а) використовуються у пневмосортувальних столах ПСС-1; ПСС-2,5; СПС-5А; МОС-9; «Sutton»; «Buhler»; «Steele &Steele»; «Forsberq»; «Kamas».

Робочі поверхні типу (б) представлено у пневмосортувальних столах БПС-3, ССП-5, СП-0,5, «Oliver», «Heid».

Форма робочої поверхні типу (в), завдячуючи геометрії борту вздовж якого рухається важка фракція, дозволяє покращити виділенню домішки та пришвидшує швидкість її руху до вивантажувальної зони. Використано у конструкції пневмосепарувальних столів «Kamas».

Форми робочої поверхні (а), (б) і (в) – забезпечують підвищений час протікання процесу розділення ВФ; (г) – підвищений час процесу розділення ЛФ; (д) – рівний час процесу розділення ВФ і ЛФ.

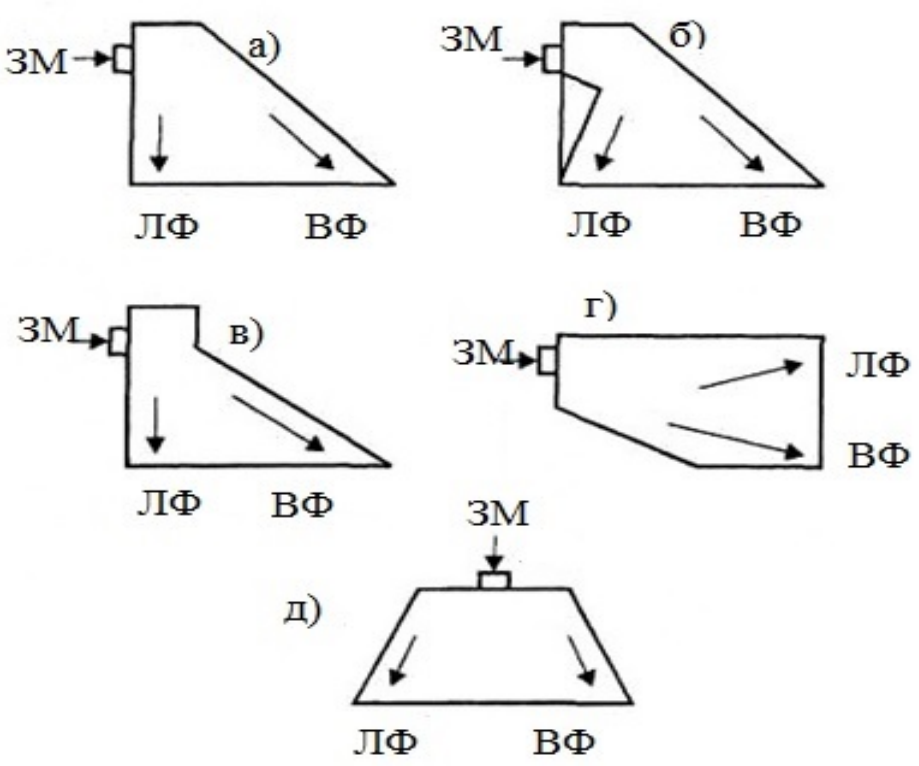


Рис. 1.29. Форми робочих поверхонь вібропневматичних сепараторів: НМ – насіннєвий матеріал; ВФ – важка фракція; ЛФ – легка фракція

За сукупністю фізико-механічних ознак розділення НМ на фракції, вібропневматичні сепаратори класифікуються на протиточного (а), вієрного (б) та спадаючого (в) типів (рис. 1.30.) [43].

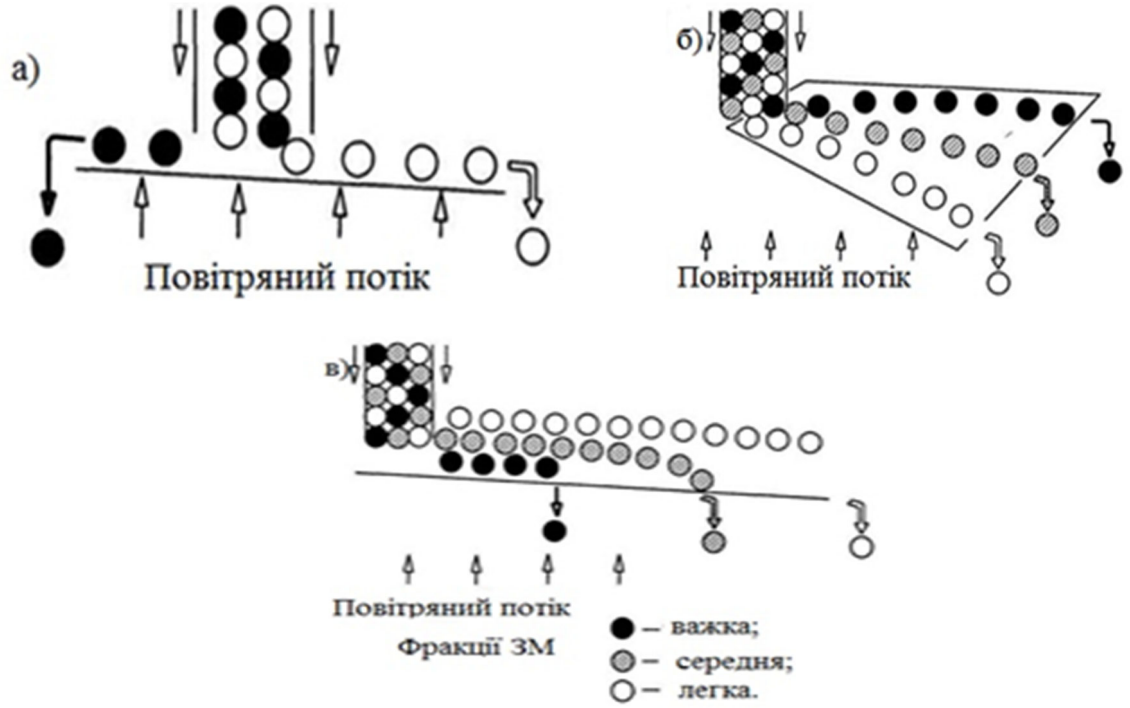


Рис. 1.30. Класифікація вібропневматичних сепараторів за принципом одночасного протікання фаз розділення НМ

Найбільшого розповсюдження отримали вібропневматичні сепаратори типів (б) і (в).

Робочу поверхню пневмосортувального столу (деку) можна умовно розділити на зони: зона завантаження – зона, де відбувається формування шару насіння та початкове розділення на фракції; зона розділення (розшарування) з одночасним транспортуванням фракцій до зони вивантаження; зона вивантаження фракцій, що сформувались шляхом розділення матеріалу.

Продуктивність пневмосепарувального столу в значній мірі залежить від фрикційних властивостей робочої поверхні (коефіцієнтів тертя між робочою поверхнею та матеріалом, що обробляється) та від її можливостей рівномірного розподілення повітряного потоку. Середня швидкість руху повітряного потоку знаходиться в межах 1,2 – 1,8 м/с. Швидкість повітряного потоку нижче 1,2 м/с недостатня для переходу НМ до псевдорозрідженого

стану. Швидкість повітряного потоку, що перевищує 1,8 м/с надає передумови для «кипіння» матеріалу, тобто відбувається процес постійного перемішування частинок і процес розділення припиняється.

За способом подачі повітряного потоку в матеріал, пневмосепарувальні столи класифікуються на вакуумні або нагнітальні.

Значний вплив на рівномірний розподіл повітряного потоку по всій площині робочої поверхні має опір самої робочої поверхні.

Широкого поширення набули пневмосепарувальні столи, що мають робочу поверхню оснащену рифлями, які сприяють інтенсифікації процесу розшарування матеріалу на фракції різної густини. В залежності від конструктивних особливостей пневмосортувального столу, рифлі розташовано перпендикулярно або паралельно напрямку руху НМ (в залежності від розташування рифлів відбувається режим коливань робочої поверхні). Важка фракція НМ переміщується вздовж рифлів, легка – поперек. Висота рифлів співвідноситься з розмірними характеристиками матеріалу. Рифлі дають додатковий механічний імпульс на нижній елементарний шар, що рухається безпосередньо по робочій поверхні, який передається у шари НМ, що розташовані вище. Разом з тим використання рифлів знижує швидкість транспортування до зони вивантаження, тим самим, збільшуючи час знаходження матеріалу на робочі поверхні без збільшення її геометричних розмірів і, відповідно, збільшуючи час і якість процесу розділення. Важливою умовою використання рифлів є унеможливлення застою матеріалу в зоні рифлів, що значно знижує ефект розшарування частинок.

Заключним етапом підготовки матеріалу – є процес розділення фракцій матеріалу дільниками. Розділення фракцій НМ у сепараторах «вієрного» типу відбувається у вивантажувальні лотки фракцій. У сепараторах «спадаючого» типу розділення НМ відбувається за рахунок дільників ножового (а), решітного (б) і шахтного (в) типів (рис. 1.31).

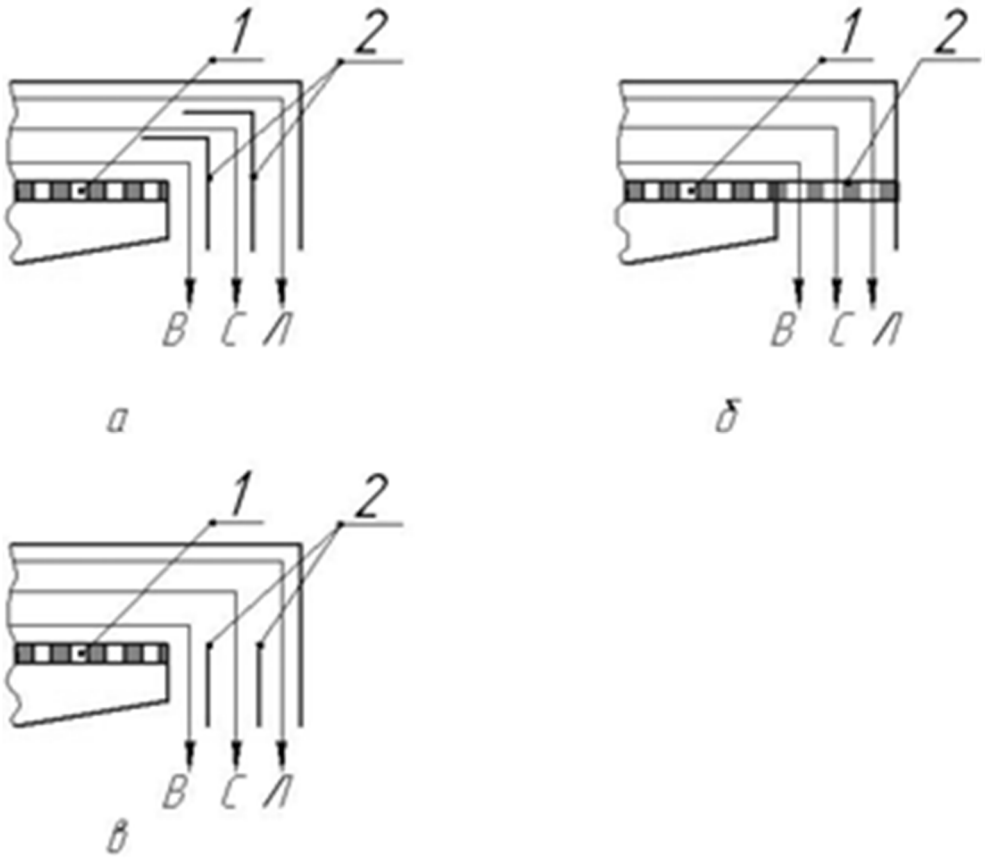


Рис. 1.31. Конструктивні схеми дільників фракцій сепарувальних машин: а – дільник ножового типу; б – дільник решітного типу; в – дільник шахтного типу; 1 – частина робочої поверхні (зона вивантаження); 2 – дільники; В – важка фракція; С – середня фракція; Л – легка фракція

Дільники ножового типу потребують точного налаштування з урахуванням особливостей подачі та стану вхідної сировини. Дільники решітного типу, у зв’язку з взаємним переміщенням шарів матеріалу різної густини, має не високу гостроту розділення. Найвищу гостроту розділення мають дільники шахтного типу.

1.2. Аналіз стану досліджень процесу вібропневматичного розділення насіннєвого матеріалу

Технологічний процес сепарації НМ у вібропневморозрідженому шарі складається з трьох етапів, що відбуваються одночасно, від інтенсивності протікання яких, залежать якісні і кількісні показники процесу сепарації.

У відповідності до обраного напряму досліджень проведено класифікацію сепарувальних машин для розділення НМ за густиною насіння: вібростоли, пневмосепарувальні столи, сепаратори з циліндричними робочими поверхнями. Зроблено огляд літературних джерел та аналіз відомих досліджень процесів розділення НМ у вібропневморозрідженому шарі.

Вирішенню питання підвищення якості процесів сепарації НМ «сухим» способом присвячено роботи Ф.М. Абдуєвої [1], В.В. Адамчука [3], Б.О. Алієва Ельчіна [5 – 8], М.В. Бакума [11], В.М. Булгакова [30], П.М. Василенка [34, 35], П.С. Берніка [12], Д.В. Богатирьова [14, 15], Е.С. Гончарова [47, 48], О.І. Завгороднього [75], П.М. Заїки [76 – 79], Б.І. Котова [97 – 104], Д.І. Мазоренка [114], Ю.О. Манчинського [116], А.В. Міняйла [120], В.П. Ольшанського [128 – 130], М.В. Сліпченка [156], С.П. Степаненка [160 – 165], Л.М. Тіщенка [173 – 192], С.О. Харченка [204 – 209], та інш.

Авторами створено основи теорії самосортування частинок у вібропневморозрідженому шарі під дією коливань робочої поверхні. Визначено умови протікання процесів сепарації та взаємозв’язок фізико-механічних властивостей сипких середовищ з кінематичними параметрами робочої поверхні.

Як правило авторами розглянуто рух матеріальної точки по плоскій робочій поверхні без урахування сил, які виникають при взаємодії з шаром насіння, що оточує частинку (зернівку), що значно ускладнює розуміння внутрішьошарових процесів.

Ф.М. Абдуєва [1] розробила теоретичні основи динаміки зернових матеріалів при русі на плоских поверхнях та у каналах пилоосадних камер зерноочисних машин, використавши теорію гідродинамічної аналогії та рівняння Навьє-Стокса.

П. М. Заїкою у роботах [76 – 79] розроблена концепція та основи теорії вібросепарування сипкого матеріалу вібраційними зерноочисними машинами. Автором визначено оптимальні закони руху робочих органів зерноочисних машин; вперше розроблено систему диференційних рівнянь просторового руху робочих органів зерноочисних машин з декількома віброзбудниками, осі яких довільно орієнтовано у просторі; розв'язано задачі взаємодії коливальних систем зерноочисних машин з енергетичним приводом; досліджено нестаціонарні коливання при резонансах пуску та зупинки; розв'язано задачі переміщення сільськогосподарських матеріалів по робочих поверхнях зерноочисних машин, причому матеріали розглядались у якості твердих дискретних частинок; розв'язано задачі внутрішньошарових процесів та самосегрегації і самосортування, забиваємості решіт тощо. П.М. Заїка розробив класифікацію основних режимів впливу робочих органів на зерновий матеріал: «ущільнювальний» – мінімально інтенсивний режим роботи зерноочисної машини, при якому дрібні частинки западають у проміжки між великими частинками і матеріал ущільнюється; «віброзбудження» – режим роботи середньої інтенсивності при якому ефективно відбувається «розрідження» матеріалу та контрольоване переміщення частинок, що різняться за густиною або іншими фізико-механічними властивостями; «віброкипіння» – відбувається неконтрольоване відбивання та переміщення частинок.

Задача оптимізації кінематики вібраційних решіт набула подальшого розвитку у роботах А.В. Міняйла [120].

Д.І. Мазоренко [114] розробив та експериментально підтвердив оптимальні режими роботи вібраційно-відцентрового сепаратора з просторовим рухом осі обертання ротора барабану при очищенні

мілконасінних зернових культур від важковідокремлюваних домішок. Отримали подальший розвиток наукові дослідження П.М. Заїки з моделювання руху сипких сумішей по робочій поверхні вібровідцентрового решета.

У роботах Б.І. Котова [101] досліджено: питання пневмогравітаційної сепарації; ефективність сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-конічному решеті вібровідцентрової машини; розроблено концептуальні основи побудови технічних засобів первинної обробки зерна; обґрунтовано конструкцію та принцип роботи віброаспіраційного сепаратора. Теоретично обґрунтовано рух частинки зерна на вібраційному решеті при дії розпушуючих органів. Розроблено математичну модель динамічних режимів електротермічної установки для обробки зерноматеріалів імпульсними потоками інфрачервоного випромінювання.

Більшість досліджень процесу розділення базувались на простих моделях руху окремої частинки по робочій поверхні сепаратора, не враховуючи взаємодію частинок у шарі НМ. Авторами розглянуто [175] рух гранульованих середовищ, що мають взаємодію незворотного характеру.

За [178] частинки НМ, що піддаються впливу вібрацій робочої поверхні та дії повітряного потоку, розпочинають рух та вливають на суміжно розташовані частинки НМ шару шляхом взаємного зіткнення та передачі кінетичної енергії, що викликає передумови для виникнення процесу розділення. Процес розсіювання кінетичної енергії при взаємодії частинок шару змінює середні швидкості та прискорення частинок, що різняться за фізико-механічними властивостями. Визначено, що під час такої взаємодії (зіткнення) та пошарового руху відбувається передача теплової енергії.

В роботі [222] отримано аналітичні залежності висоти підйому домішок по відношенню до густини за різниці густини частинок основної культури та домішок. Виявлено, що процес перерозподілу (розділення) частинок різної густини залежить від середньої кінетичної енергії зон матеріалу без домішок та з домішками.

Гідродинамічні моделі попередніх дослідників не в повній мірі розкривають процеси взаємодії, що виникають всередині шару НМ.

При переміщенні НМ, як правило, відзначається турбулентний режим руху частинок матеріалу [224]. При цьому силу опору руху визначають за формулою Ньютона:

$$R = kF\frac{\rho\upsilon^2}{2}, \tag{1.1}$$

де: ρ – густина середовища, Н·с^2/м^4; F – міделевий перетин тіла, що обтікається, м^2 (площа проекції тіла на площині, що перпендикулярна до швидкості руху); υ – відносна швидкість, м/сек; k – коефіцієнт аеродинамічного опору (розмірність відсутня).

Оскільки до (1.1) не входить число Рейнольдса (Re), що характеризує стан НМ, то його враховує коефіцієнт *k.* Деякі автори вводили до розрахунків коефіцієнт парусності, що характеризує властивості частинки до опору НМ [126], який визначається з залежності між прискоренням та силою опору і масою насіння:

$$a = \frac{R}{m} = \frac{k\rho F\upsilon^2}{2m} = k_0\upsilon^2, \tag{1.2}$$

де: $k_0 = k\rho F/2m$ – коефіцієнт парусності, *м$^{-1}$*.

Широкого розповсюдження у використанні набув показник – швидкість витання (критична швидкість), при якій частинка знаходиться у підвішеному стані. Швидкість витання визначається з виразу:

$$R = kF\rho c^2 = G, \tag{1.3}$$

звідки:
$$c = \sqrt{\frac{G}{kF\rho}}. \tag{1.4}$$

На рис. 1.32. наведено класифікатор, який складається з циліндричної трубки 5, касети 3, колектору 1, осаджувальної камери 6 з приймачами 4, вентилятора 8, циклона 7.

Частинки, що вилітають з труби, осідають в камері 6 та потрапляють до приймачів. Дрібні частинки осідають у циклоні. Витрати повітря визначаються за показниками мікроманометру 2.

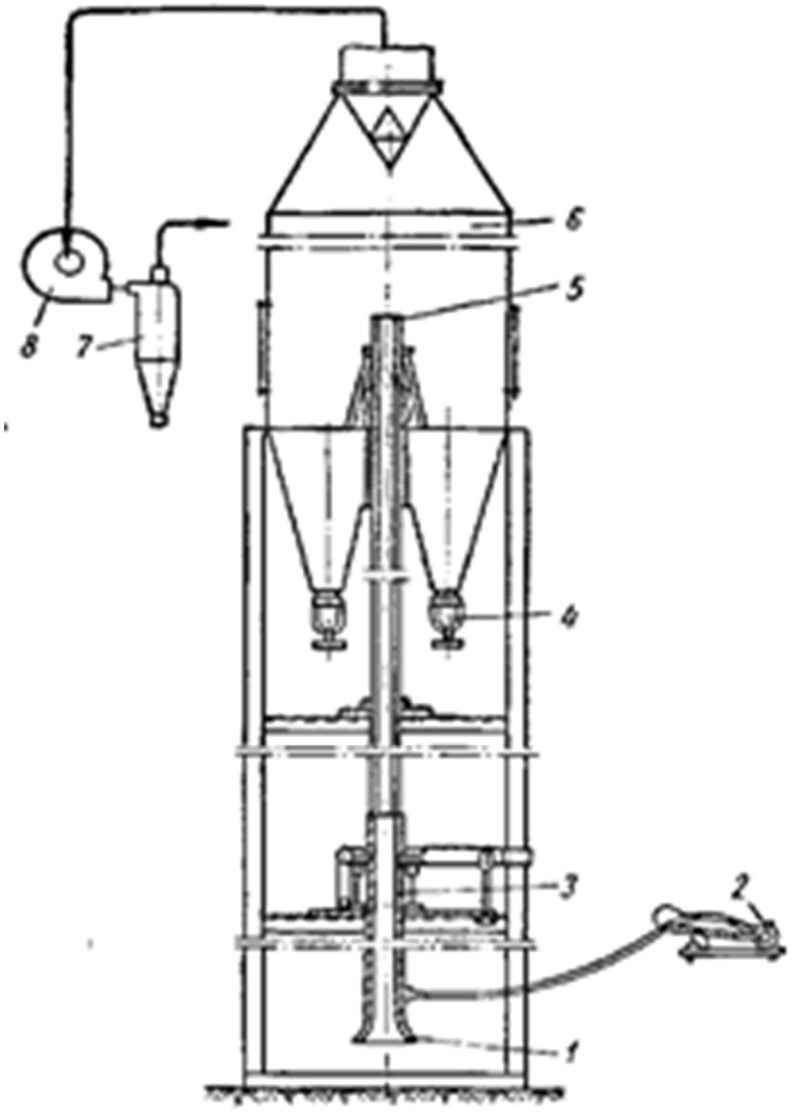


Рис. 1.32. Загальний вид повітряного класифікатору

Згідно [11], рівняння відносного переміщення частинки НМ у вібропневморозрідженому шарі має вигляд:

$$m_1 \cdot z = (1-\Delta)\cdot\left[m_0 \cdot \left(g \cdot \cos\beta + u_z\right) + R_в\right] - F_д, \qquad (1.5)$$

де: m_0 – ефективна маса частинки НМ, що складається з маси частинки та середовища у половин її об'єму;

z – проекція відносного прискорення частинки;

g – прискорення вільного падіння;

Δ – відношення густини частинки, що розглядається, до густини частинок, що утворюють шар насіння;

$R_в$ – сила повітряного потоку;

u_z – проекція прискорення решета на вісь z;

$F_д$ – сила опору відносному переміщенню.

В роботі [204] С.О. Харченко вібраційні решета представлено, як періодична структура з періодом, що визначається розташуванням отворів. Введено граничні умови: нормальні компоненти швидкості на робочій поверхні і дотичні – на поверхні перемичок. Введено Декартову систему координат таким чином, щоб поверхня решета співпадала з площиною, та нахилена до горизонту під кутом θ , виконує коливання з амплітудою А та круговою частотою обертання ω . Під дією таких коливань, шар матеріалу знаходиться у псевдорозрідженому стані.

В роботах С. П. Степаненка [160, 162, 164] доведено, що на процес розділення матеріалу за густиною насіння значний вплив має сила та розподіленість повітряного потоку, що проходить крізь шар НМ. Так, при швидкості повітряного потоку, що перевищує критичні значення, відбувається процес кипіння шару НМ та видування дрібних частинок з верхніх шарів. В такому випадку процес перемішування частинок різної густини буде відбуватись постійно, причому, процес розділення припиняється. При оптимальних значення швидкості повітряного потоку його вплив буде максимально вирівняним по всій товщині і площині шару НМ та надаватиме достатню рухливість частинок матеріалу для ефективного протікання процесу

розділення. Тобто, вплив не буде обмежений нижніми шарами, що розташовані безпосередньо на робочій поверхні або таким, що викликатиме безперервне перемішування шарів.

Згідно загальноприйнятих методик [165] ефект очищення це – відношення маси домішок, які виділено з НМ, до маси домішок у вхідному матеріалі, які можуть бути виділені з ЗВ:

$$\eta = \frac{\text{А} - a \cdot A}{\text{Б}}, \%, \tag{1.6}$$

де: A – маса відходу, кг;

a – кількість якісного насіння у відході, % від маси відходу;

$Б$ – маса домішки у вхідному матеріалі, які можуть бути видалені, кг.

Подальший розвиток машин і технологій з розділення НМ за густиною частинок та бажання збільшити продуктивність процесу сепарації призвели до виникнення нового класу машин з циліндричною повітряпроникною робочою поверхнею: центрифуги, пневмоцентрифуги та вібропневмоцентрифуги.

У вібропневмовідцентрових сепараторах розділення відбувається на циліндричній, конусній (прямій та зворотній) та східцевій безпровальній робочій поверхні.

Шар сипкого матеріалу, що потрапляє на робочу поверхню, під дією відцентрової сили, сили тяжіння та коливань робочої поверхні починає рухатись вздовж робочої поверхні. Вплив сили повітряного потоку, що продувається крізь робочу поверхню і шар матеріалу призводить до вібророзрідження шару НМ, що знаходиться на робочій поверхні. Процес сепарації складається із двох фаз, що протікають одночасно: під дією відцентрової сили «важкі» частинки занурюються до робочої поверхні, а «легкі» спливають на поверхню шару; а під дією коливань робочої поверхні та сили тяжіння частинки рухаються до вивантажувальних лотків. В залежності від конструкції сепаратора, матеріал рухається до низу, або вгору.

Початкові кроки у використанні поверхонь обертання для розділення сипких матеріалів зроблено Н.Н. Ульрихом [194], який першим реалізував на практиці робочу поверхню, яка виконує складний обертальний рух. У розробленій пневмоцентрифузі робочу поверхню було виконано у вигляді конуса, що направлений більшим боком до гори. Таким чином, матеріал завантажувався в нижній частині машини та під дією відцентрової сили інерції рухається до вивантаження у верхній частині. Інтенсифікатором процесу розділення є ступінчаста робоча поверхня. Однак, складність виготовлення та налаштувань режимів не дозволила отримати широкого впровадження запропонованого зразка.

А.Н. Прилуцьким та Є.С. Гончаровим [146, 147] розроблено вібропневмовідцентровий сепаратор, повітропроникну поверхню якого виконано з циліндричних секцій, що встановлені вертикально. Кожну секцію вібропневматичного сепаратора з'єднано по аналогії зі ступінчатим ротором таким чином, щоб бічні кромки кожної секції розташовувались на різній відстані від осі обертання ротора. Матеріал, що рухається вієроподібно, розділяється як за товщиною шару, так і вздовж сепаруючої секції. Питома продуктивність запропонованого вібропневмовідцентрового сепаратора перевищувала відповідні показники пневмосортувальних столів у 2,5 рази. А.Н. Прилуцьким розроблено механіко-математичну модель руху зернової суміші в ротаційному розкидачеві пневмовідцентрового пристрою. Досліджено процеси дозування і живлення пневмовідцентрових і вібровідцентрових решітних робочих органів сепараторів зерна з вертикальним розміщенням осей обертання, сформульовано технологічні вимоги до дозуючо-живильних пристроїв, обґрунтовано процес ефективного живлення, конструкційну схему і основні параметри дозуючо-живильного пристрою зерноочисного модуля універсальних пневмовібровідцентрових сепараторів зерна.

С. І. Малюта та Е.С. Гончаров [115] розробили механіко-математичну модель руху частинки насіннєвої суміші по поверхні ротора

пневмовідцентрового сепаратора. С. І. Малюта визначив функціональну залежність моментів настання часу припинення періодичного руху шару зернового матеріалу по поверхні решета. Автором розроблена, запропонована та впроваджена у серійне виробництво ВАТ «Вібросепаратор» (м. Житомир) циліндрична ступінчаста поверхня. Сходинка виконує функцію механічного інтенсифікатора, що пришвидшує/уповільнює швидкість руху матеріалу, для інтенсифікації процесу розділення НМ. Розробку впроваджено на серійних моделях зерноочисних сепараторів: Р8-БЦСМ-25; Р8-БЦСМ-50; А1-БЦСМ-100; СВС-15, які наразі є найбільш високопродуктивними машинами.

Циліндричні зерноочисні машини мають високу продуктивність, що пов’язано з одночасною дією на матеріал коливань робочої поверхні та відцентрової сили інерції.

У роботі Д.В. Богатирьова [15] обґрунтовано вплив форми робочої поверхні на параметри процесу сепарації. В якості основного параметра, який характеризує укладку часток в каналі, автором прийнято “кут тиску” кульок одна на одну, тобто кут між віссю Y каналу та нормаллю до кульок в точці контакту (Рис. 1.33).

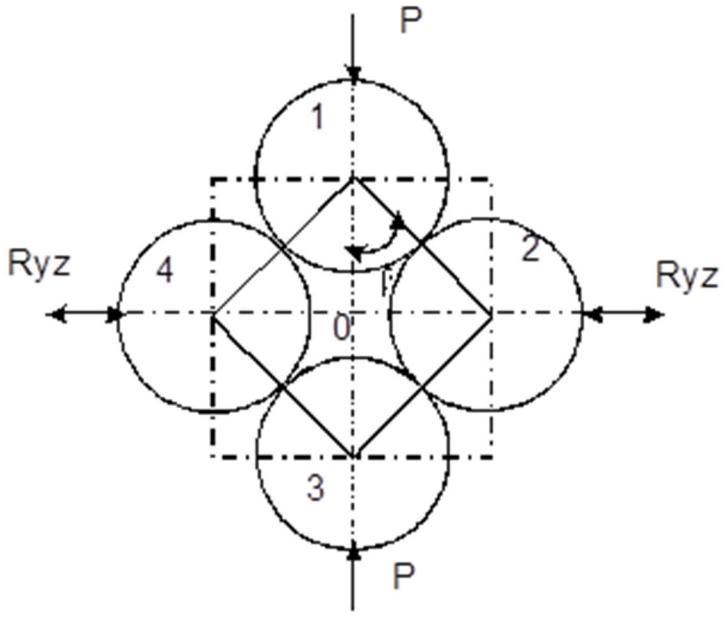


Рис. 1.33. Схема дії сил в середовищі.

Д.В. Богатирьовим складено рівняння руху частки за осями:

$$z = \left[4 \cdot \rho_c \cdot \omega_\phi / (\rho_3 + \rho_c) \cdot \sin\alpha\right] \cdot t + \frac{(P_0 - N_3)\text{-}F_p \cdot \operatorname{tg}\gamma}{2 \cdot \rho_3 \cdot \left(\frac{\rho_3}{\rho_c} - 1\right) \cdot V'} \cdot t^2,$$

$$x = \left[4 \cdot \rho_c \cdot \omega_\phi / (\rho_3 + \rho_c) \cdot \cos\alpha\right] \cdot t - \frac{(P_0 - N_3) \cdot \operatorname{ctg}\gamma + F_p}{2 \cdot \rho_3 \cdot \left(\frac{\rho_3}{\rho_c} - 1\right) \cdot V'} \cdot t^2. \qquad (1.7)$$

Розв'язок одержаних співвідношень дозволив побудувати графіки руху частинки (1.34).

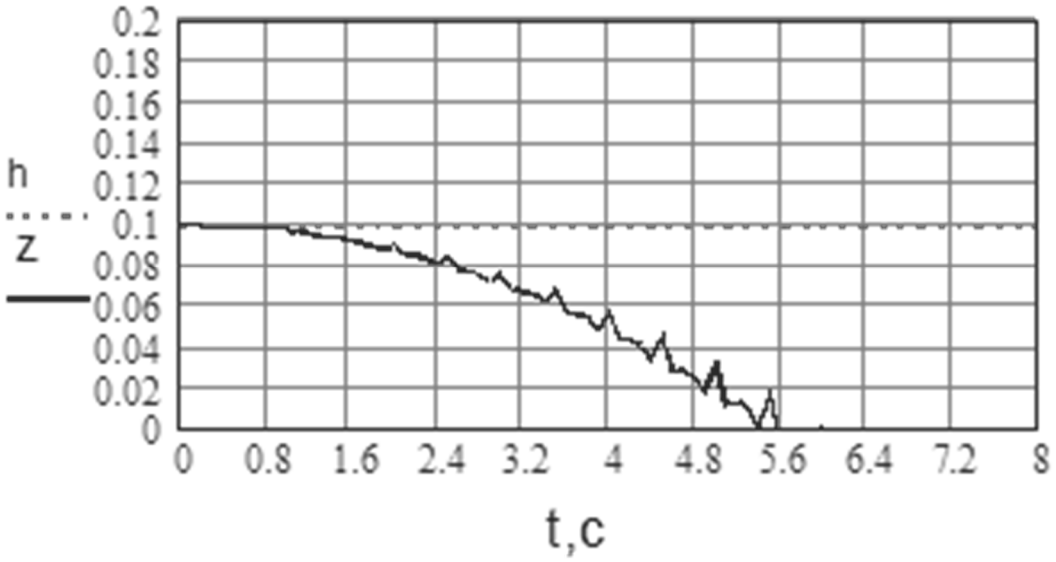


Рис. 1.34. Залежність переміщення частинки по осі 0Z від часу знаходження в псевдозрідженому шарі насіння t, с: z – координата частинки в момент часу t, м; h – висота шару насіння h=0.1 м.

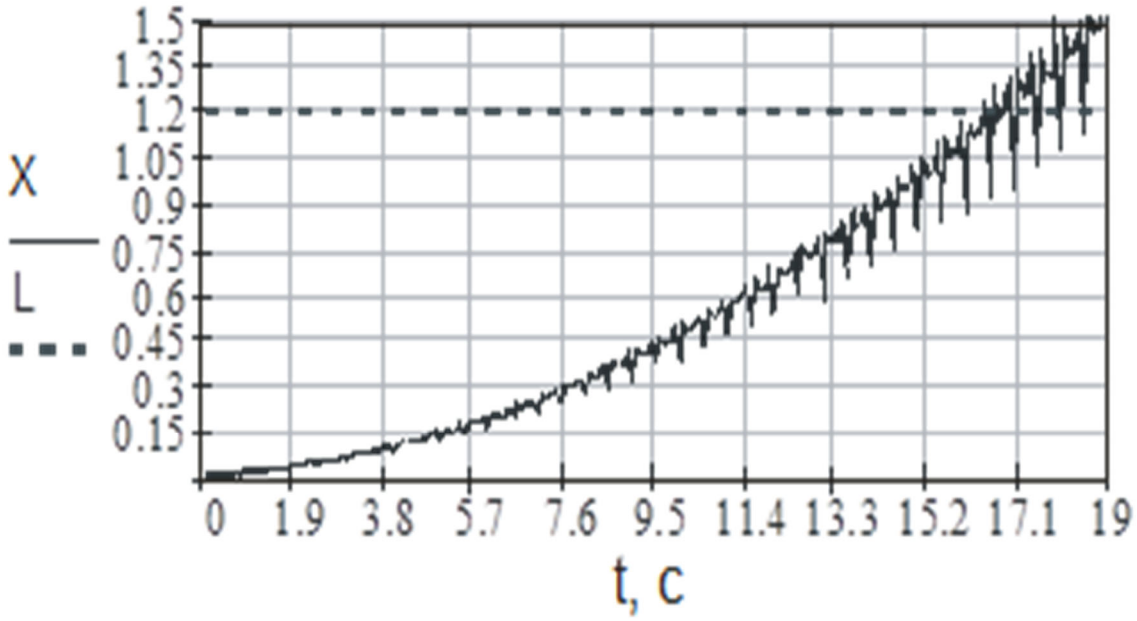


Рис. 1.35. Залежність переміщення частинки по осі 0X від часу знаходження в псевдозрідженому шарі насіння t, с: x – координата частки в момент часу, м; L – робоча довжина перегородки, м.

Характер руху частинок зернового матеріалу, що піддається впливу повітряного потоку розглянуто у роботі О.В. Нестеренка [126]. Визначено, 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 цієї проблеми проведено шляхом застосування живильних пристроїв, які дозволять зменшити опір повітряного потоку шляхом рівномірної подачі зернового матеріалу. Автором запропоновано пневмосепаратор з інноваційним живильним пристроєм (рис. 1.36).

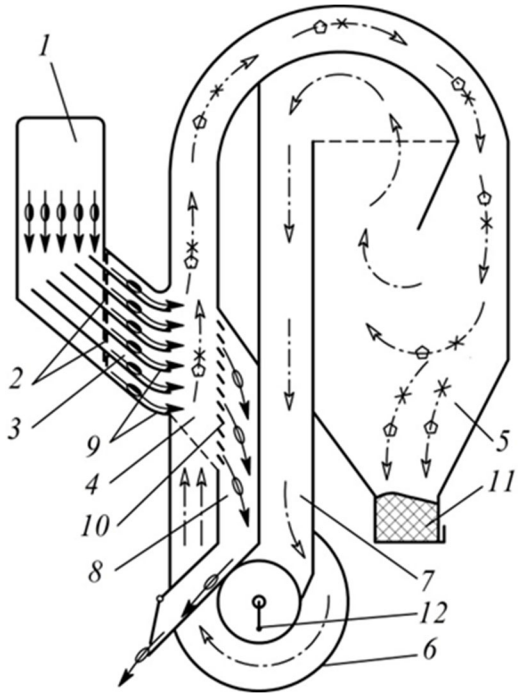


Рис. 1.36. Функціональна схема пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу в ПСК: 1 – бункер; 2 – заслінки; 3 – багаторівневий живильний пристрій; 4 – ПСК; 5 – осадова камера; 6 – вентилятор; 7 – повітряний канал; 8 – герметичний вивідний канал; 9 – напрямні гравітаційні криві; 10 – жалюзійна стінка ПСК; 11 – приймальник легких домішок; 12 – регулювальна заслінка швидкості повітря

Сепаратор працює наступним чином. Зерновий матеріал з 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 за його висотою. Під дією повітряного потоку, створеного вентилятором 6, вихідний зерновий матеріал розділяється на дві фракції: легкі домішки, які виносяться в осадову камеру 5, та очищене зерно, що через жалюзійну стінку 10 потрапляє в герметичний вивідний канал 8 і далі по лотку виводиться з ПСК.

Автором запропоновано схему руху частинки матеріалу по робочій поверхні живильника (Рис. 1.37).

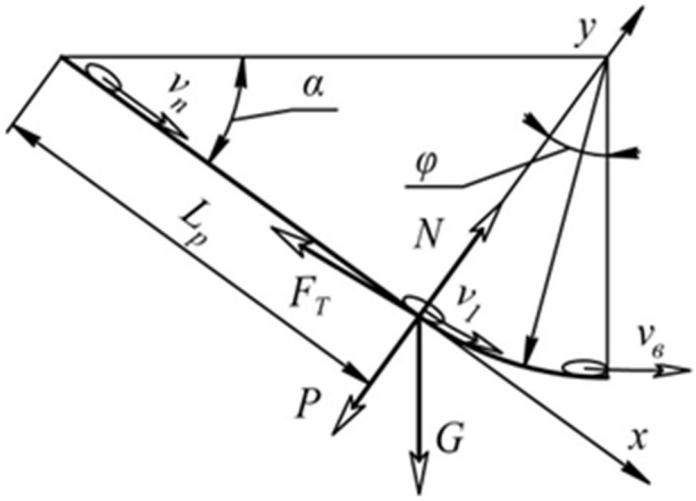


Рис. 1.37. Схема руху частинки по робочі поверхні живильника

Визначено рівняння необхідної швидкості руху частинки (1.8), головною умовою якого було забезпечення горизонтального напряму та необхідної швидкості введення в ПСК $v_в$, яка визначається рівнянням:

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

$$\left.\left. +(1-2f^2)\sin\varphi - [3f\sin\alpha + (1-2f^2)\cos\alpha]\cdot e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} \right\} \right\}^{1/2}, \qquad (1.8)$$

де v_n – початкова швидкість руху частинки, м/с; f – коефіцієнт тертя; L_p – довжина розгінної ділянки, м; α – кут її нахилу, град; φ – кут, що визначає положення частинки на кривій з певним радіусом, град.

Одержано криві залежностей швидкості руху (рис. 1.38) та схеми руху домішок (рис. 1.39).

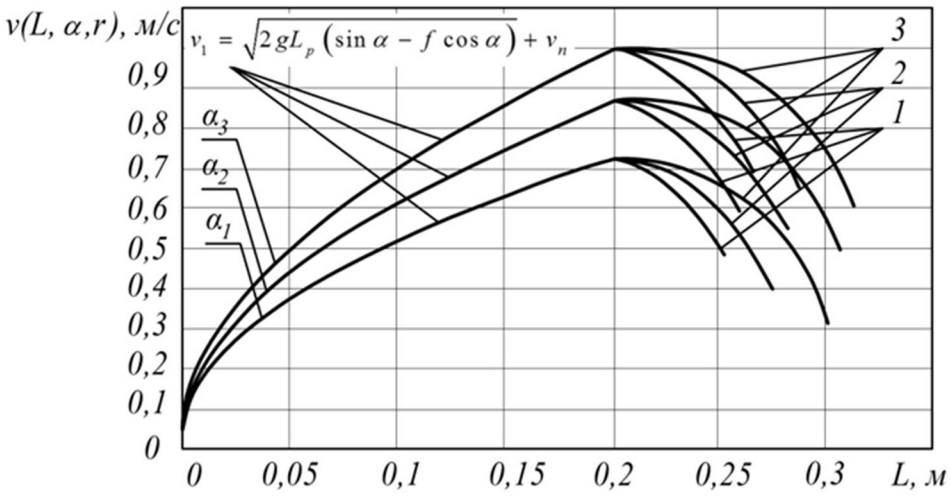


Рис. 1.38. Залежність швидкості руху зернового матеріалу від його положення на гравітаційній напрямній кривій, кута нахилу розгінної ділянки та радіуса дугоподібної ділянки (при $L_р$= 0,2): 1 – r = 0,1 м; 2 – r = 0,15 м; 3 – r = 0,2 м

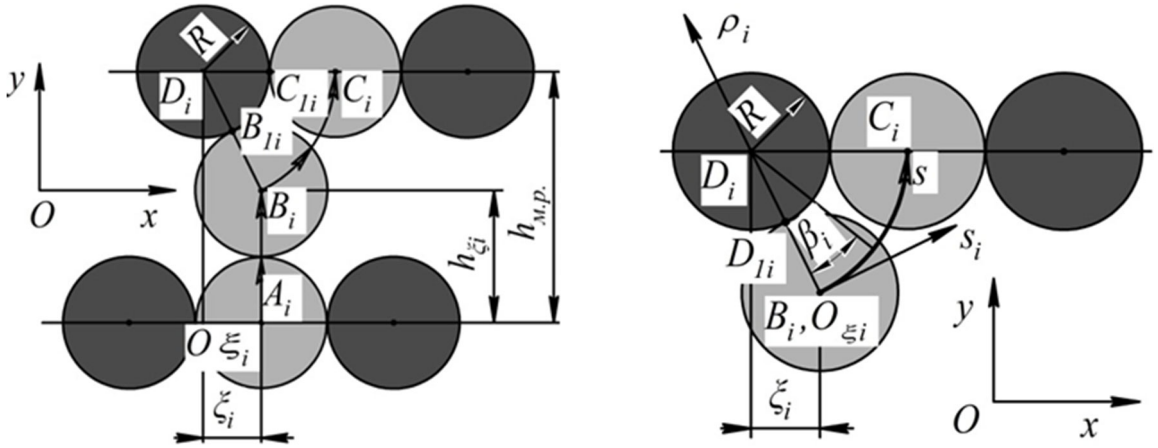


Рис.1.39. Схема руху домішки: а) – при проходженні через зернові шари; б) – під час контакту з зерном

Дослідниками доведено, що ефективне протікання процесу розділення насіння відбувається шляхом поєднання фаз розділення та транспортування розділених фракцій до вивантаження. За [260] для інтенсифікації процесу

ефективно використовуються додаткові механічні інтенсифікатори. У якості інтенсифікаторів процесу використовуються рифлі, що розташовані по всій площині робочої поверхні або розміщені на певних зонах.

Для покращення показників процесу Л.М. Тіщенко [181] впроваджено використання механічних рифлів-інтенсифікаторів. В якості інтенсифікаторів запропоновано використання шипів-розрихлювачів, які жорстко закріплено на поверхні кілець. За рахунок відносного повороту кілець змінюється кількість шипів-розрихлювачів. Встановлення всіх кілець в початкове нульове положення означає, що всі шипи розрихлювачі розташовано один над одним. При обробці НМ кільця переміщуються одне відносно іншого.

Для збільшення зони інтенсивного розрихлення Л.М. Тіщенко запропонував поєднувати гнучкими нитями шипи у поперечних рядах. Гнучкі ниті вироблено з вузлами та закріплено з провисанням. Їх провисання забезпечує розкачування вузлів у НМ, що викликає просторовий вплив на максимальну кількість шарів НМ.

Додатковим способом інтенсифікації процесу розділення є встановлення розрихлювачів у формі кілець, що вільно встановлено на скоби. Під дією вертикальних коливань робочої поверхні, кільця виконують складний рух в шарі НМ та викликають механічні збудження частинок матеріалу таким чином збільшуючи імпульс розрихлення та розділення шарів. Також Л.М. Тіщенко запропоновано використання динамічних розрихлювачів у вигляді пружин. НМ, рухаючись між витками циліндричної пружини, отримує додатковий кутовий вплив. Це забезпечує зміщення частинок у поперечному та повздовжньому напрямках. Розрихлювачі збільшують кількість пор між частинками, не порушуючи структуру шару.

Таким чином, колективом дослідників ХНТУСГ розроблено та запропоновано новий клас інтенсифікаторів – динамічних розрихлювачів, що мають ряд переваг: простота встановлення; просторовий впив на частинку НМ; мінімальний вплив на структуру частинки матеріалу.

Проблему розділення НМ пшениці за густиною розглянуто у роботі [252], де описано метод занурювання частинок різної густини. Розділення на фракції відбувалось з густиною від 1,30 до 1,45 г/см^3 з шагом 0,05. У запропонованому дослідженні НМ було розділено на дві фракції.

Відомі дослідження [277] з розробки методів аналізу розділення НМ у вібророзрідженому шарі дозволяють ефективно визначити стан вібророзрідженого шару, визначити товщину шару на яку проникають імпульси коливань. Встановлено, що віброкипіння шару починається при кінематичних режимах роботи сепаруючої машини, при яких відбувається відривання частинки НМ від робочої поверхні. Дослідження ускладнено характером процесу, оскільки траєкторії руху частинок різної густини мають певні відмінності, що пов’язано з тим, що частинки рухаються з відмінними швидкостями на різних зонах робочої поверхні.

Можна впевнено наголошувати, що процес розділення НМ за густиною насіння має складний характер та при його моделюванні необхідно комплексно враховувати фактори, що мають визначальний вплив на процес: кінематичні режими та конструктивні параметри сепаруючої машини і фізико-механічні властивості матеріалу.

1.3. Перспективи підвищення ефективності процесу вібропневматичного розділення за густиною насіння

Дослідженнями Б. І. Котова [104], Л. М. Тищенка [186] та інших доведено, що подальший розвиток процесу виробництва НМ шляхом збільшення режимних характеристик сепаруючих машин, що реалізують процес, вкрай обмежений. С. О. Харченко доведено [206], що розв’язок проблеми збільшення продуктивності та покращення якості процесу знаходиться у площині інтенсифікації процесу та оптимізації кінематичних режимів сепаруючих машин.

В.В. Бредихіним [18] запропоновано у якості інтенсифікатора розділення НМ чешуйчаста робоча поверхня (рис. 1.40). Рифлі, що виконано у формі чешуйки, штучно уповільнює рух частинок НМ та викликає анізотропне тертя, яке збільшується при русі НМ проти напрямку рифлів і зменшується при русі за похилою поверхнею. Розробку було впроваджено у серійне виробництво на ВАТ «Завод ім. Фрунзе» (м. Харків). Рифлі направлено широкою кромкою проти напряму руху шарів НМ та мають отвори для направленого введення повітряного потоку в шар.

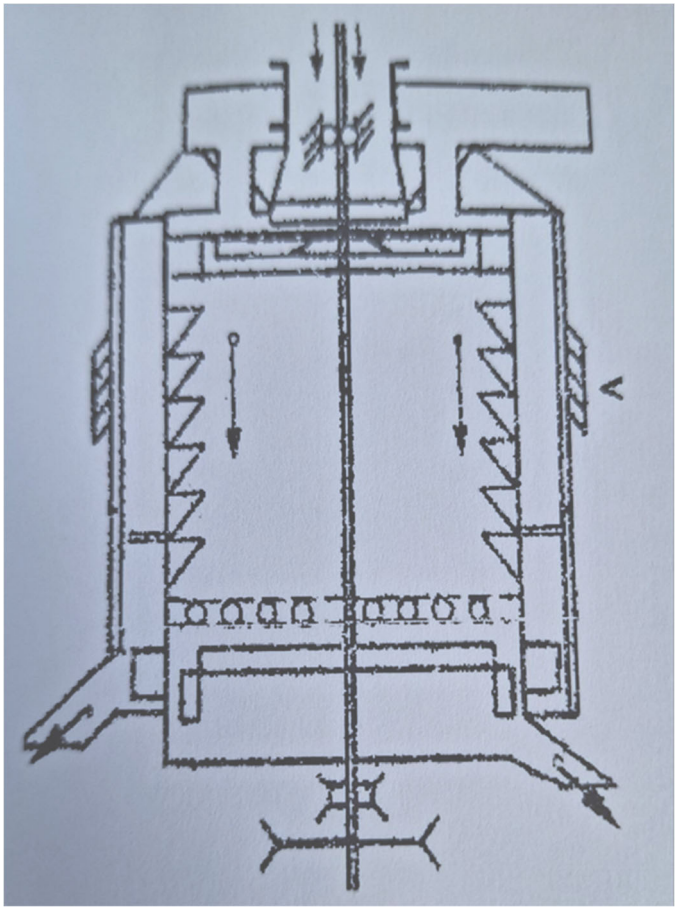


Рис. 1.40. Конструктивна схема запропонованого вібропневмовідцентрового сепаратора з чешуйчастими рифлями

Запропонований вібропневмовідцентровий сепаратор складається з корпуса, вертикального ротора з циліндричною робочою поверхнею,

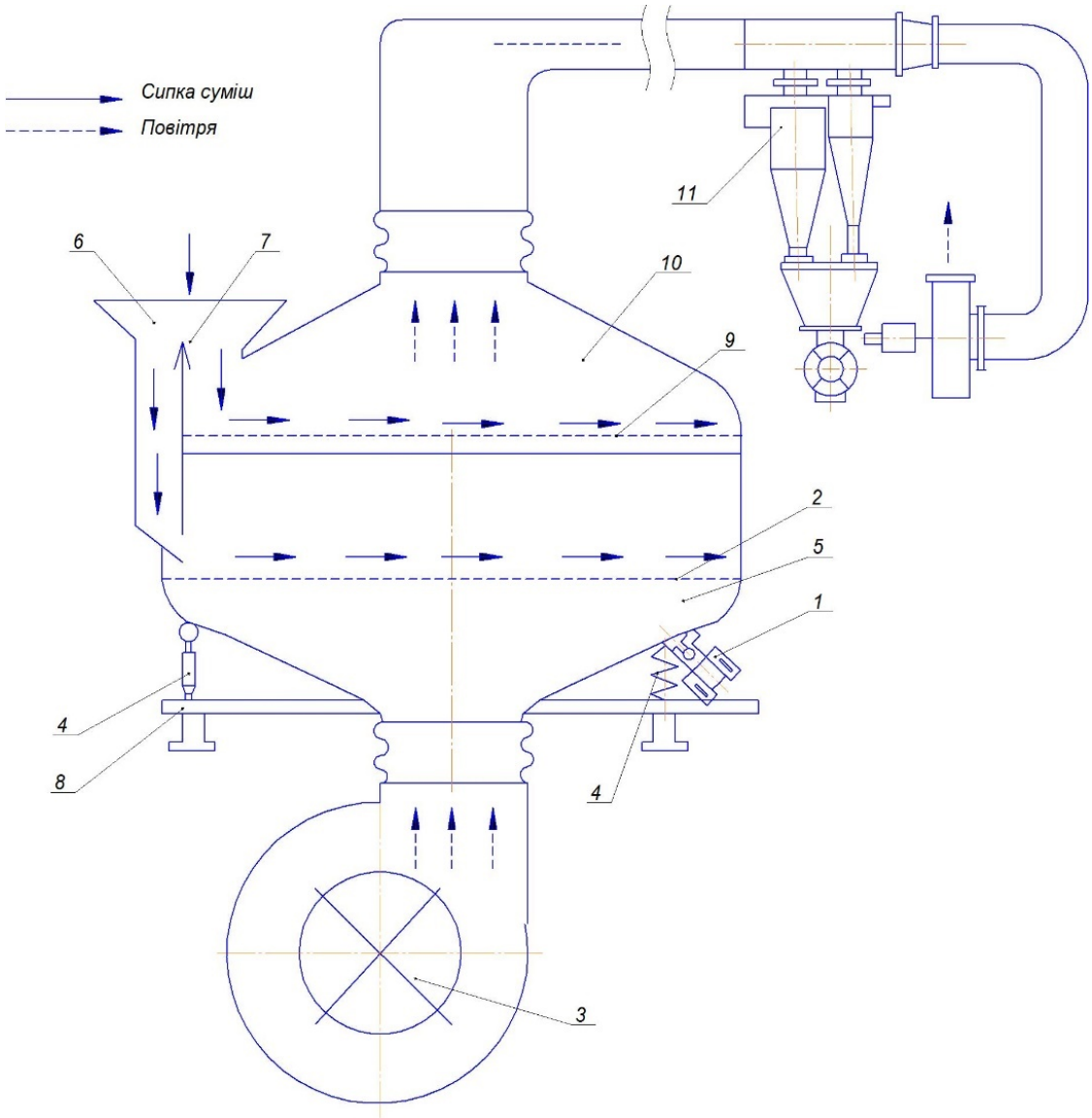
дискового розкидача. Вібропневмовідцентровий сепаратор має вентилятор для подачі повітряного потоку. Для розділення НМ в нижній частині сепаратора розташовано решітний дільник.

Недоліком пневмосепаруючих машин також є низька продуктивність. Для вирішення цієї проблеми В. В. Бредихін, В. О. Мезенцев та О. О. Черняєв [145] запропоновано прилад для розділення НМ за густиною насіння з двома робочими поверхнями (рис.1.41).

Прилад складається з двох розміщених одна над одною похилих вібраційних робочих поверхонь (дек), які продуваються повітряним потоком та виконують просторові коливання; повздовжніх і поперечних рифлів, які розташовано на робочій поверхні. Подача матеріалу відбувається на кожну робочу поверхню окремо.

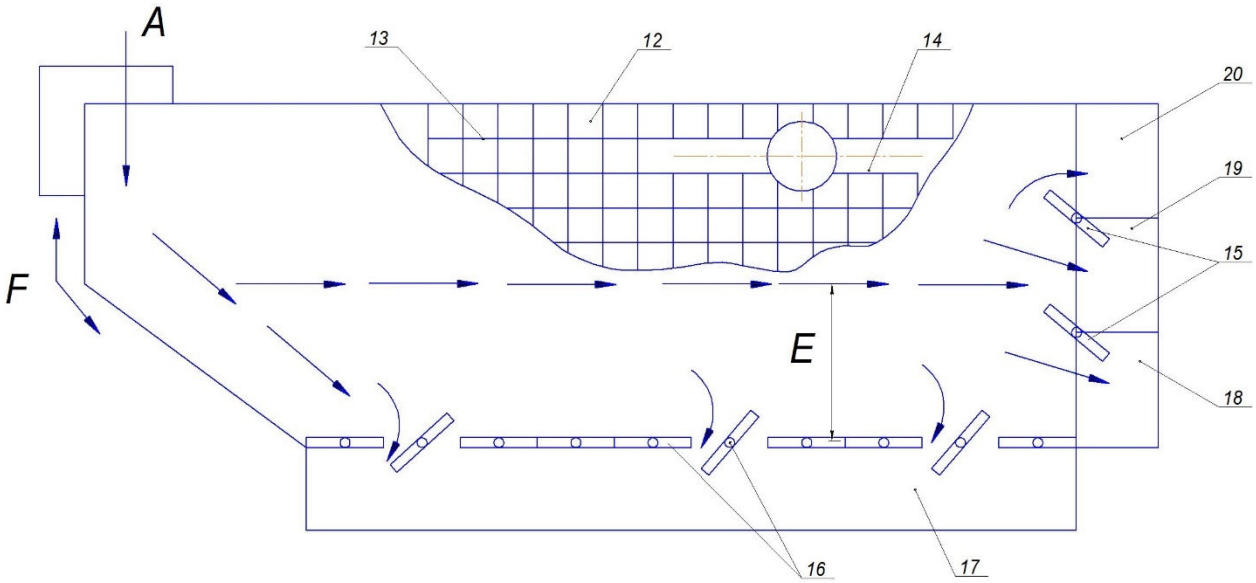
Робочий процес відбувається наступним чином: НМ через живильник 6 потрапляє рівномірним шаром на вхідну частину робочої поверхні 9 та 2. Висхідний повітряний потік, що нагнітається вентилятором 3 проходить крізь деку 2. Під дією повітряного потоку та гармонічних коливань робочої поверхні НМ переходить до псевдорозрідженого стану. Легкі частинки спливають до поверхні шару, а важкі занурюються до робочої поверхні, де вступають у взаємодію з рифлями. Поперечні рифлі 13 відіграють роль інтенсифікаторів-сходинок, по яким частинки рухаються в напрямку приймачів продуктів розділення 17, 18 (важка фракція), а повздовжні рифлі 12 підштовхують суміш, тим самим прискорюючи процес розшарування. При збільшення подачі НМ на стіл з метою збільшення продуктивності відчиняють бічний клапан 16, що збільшує швидкість руху важкої фракції до приймачів продуктів розділення. Частинки з меншою густиною рухаються в протилежний бік в напрямку пневматичного патрубка для всмоктування 14 та потрапляють до приймача продуктів розділення 20. Пил та легку домішку видаляють з загальної маси шляхом відсмоктування за допомогою пневматичного патрубку 14. Частинки середньої густини рухаються під дією коливань та механічної дії рифлів до

приймачів продуктів 19. Гармонічні коливання обох робочих поверхонь викликаються віброзбудником 1.



а)

Рис.1.41. Прилад для розділення НМ за густиною насіння: а) 1 – віброзбудник; 2 – дека; 3 – вентилятор; 4 – вібраційні опори; 5 – нижня дека (НД); 6 – живильник; 7 – заслінка завантаження матеріалу; 8 – станина; 9 – верхня дека (ВД); 10 – корпус ВД; 11 – пристрій повітроочисний;



б)

б) дека пневмосортувального столу: 12 – рифлі повздовжні; 13 – рифлі поперечні; 14 – патрубок пневматичний; 15 – клапан торцевий; 16 – клапан бічний; 17, 18, 19, 20 – приймачі розділення фракцій; *F* – кут нахилу деки; *E* – напрямок коливань деки

Принцип роботи обох робочих поверхонь – однаковий. Верхній стіл 9 розташовано у герметичному корпусі 10. Для запобігання перемішування фракцій передбачено торцевий клапан 15 та 23, що обертається навколо власної осі, стаючи на шляху суміші.

Техніку для післязбиральної оброки можна умовно розділити на дві групи: нова техніка закордонного та вітчизняного виробництва; техніка, що працює певний час на підприємстві.

Нова техніка як закордонного так і вітчизняного виробництва має високу вартість. Машини, що працюють певний час на виробництві, не в повній мірі відповідають зростаючим вимогам виробництва. За [17] близько 80% техніки, що використовується, вже відпрацювала амортизаційні періоди, що суттєво впливає на безвідмовність та надійність роботи. Тим більше, що

заміна однієї машини з технологічної лінії виробництва не матиме визначального ефекту, оскільки всі машини технологічної лінії мають бути налагоджені таким чином, щоб процес мав поступальний характер без зупинок та неузгодженостей продуктивності всіх машин технологічної лінії [43]. Таким чином, ефективним є оновлення всіх машин технологічної лінії, однак, таке рішення матиме високу економічну складову.

Аналіз літературних джерел дозволив визначити, що клас вібропневматичних машин, хоча і показує високу ступінь очистки матеріалу, має і високу складність налаштувань оптимальних кінематичних режимів. Вибір та дотримання оптимальних кінематичних режимів залежить від комплексу параметрів: кути нахилу робочої поверхні, швидкість повітряного потоку на вході в шар, питома подача матеріалу та густина насіння то що.

Встановлено, що одним з ефективних способів розв’язання проблеми є модернізація вже існуючих машин без значної зміни її конструктивних параметрів. Оптимізація кінематичних режимів сепаруючих машин, що вже використовуються у аграрному виробництві та включені до діючих технологічних ліній, дозволяє значно покращити кондиційні якості НМ та економічну ефективність процесу. У огляді досліджень зазначалось, що основним недоліком класу машин, що розділяє НМ «сухим» способом, є складність налаштувань. При промисловому виробництві насіння, до обробки потрапляє матеріал, що різниться за своїми фізико-механічними параметрами (має розбіжність за вологістю, густиною, ступенем засміченості то що). Переналаштування машин технологічної лінії під конкретний матеріал та кондиційні вимоги замовника без чіткого та швидкого методу переналаштування на оптимальні кінематичні режими займає достатньо тривалий проміжок часу, що знижує економічну ефективність процесу. Похибка у виборі оптимальних режимів негативно впливає на якість процесу, оскільки значно більша кількість домішки потрапляє до насіння основної фракції, що також суттєво впливає на якісні та економічні показники процесу. Зокрема, як було зазначено раніше, при некоректно обраних значеннях

кінематичних режимів сепаруючих машин, процес розділення взагалі може припинятись. Так для ПСС при швидкості повітряного потоку на вході в шар НМ, що дорівнює або перевищує 1,8 м/с, шар насіння переходить до процесу постійного перемішування (кипіння) та розділення матеріалу на фракції припиняється. При помилках у налаштуваннях кутів нахилу робочої поверхні, частинки НМ починають рухатись за траєкторіями, що не співпадають з оптимальними траєкторіями та частинки важкої, легкої та середньої фракцій, та не в повній мірі потрапляють до вивантажувальних лотків відповідних фракцій. Значення частоти та амплітуди коливань робочої поверхні, що не відповідають оптимальним значенням при обробці матеріалу відповідних фізико-механічних властивостей, не дозволяють максимально реалізувати потенціал сепарувальної машини з продуктивності та якості процесу розділення НМ.

Розв’язок проблеми виробництва високоякісного НМ неможливий без розробки механіко-математичної моделі, що враховує вплив та взаємодію кінематичних режимів сепаруючих машин, які мають визначальний вплив на процес розділення з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу, що обробляється. Для одержання адекватної картини процесу, слід враховувати рух не окремої частинки по робочій поверхні, а рух шарів насіння різної густини та внутрішньошарові процеси, які протікають під час такого руху.

1.4. Висновки за розділом

1. На основі аналізу результатів відомих досліджень процесів, машин та обладнання для післязбиральної обробки НМ визначено, що проблема підготовки високоякісного НМ є актуальною. Ефективним шляхом вирішення проблеми є дослідження та інтенсифікація процесу розділення НМ за густиною насіння. Визначено, що подальше підвищення продуктивності процесу шляхом зміни (збільшення площі робочої поверхні) конструктивних параметрів сепаруючих машин обмежено.

2. Аналіз стану проблеми показав:

– визначався вплив на процес окремих факторів для яких встановлювались оптимальні значення кінематичних режимів сепаруючих машин;

– відсутність єдиного концептуального методологічного підходу до математичного моделювання пошарового та внутрішньошарового руху частинок НМ різної власної густини;

– математичні моделі процесу мають значну кількість спрощень;

– одержані кількісні дані результатів теоретичних і експериментальних досліджень мають суперечливий характер;

– наукового комплексного підходу до вивчення процесу розділення НМ за густиною насіння як до цілісного фізичного явища не виявлено.

3. В цілому теорію інтенсифікації процесу розділення НМ за густиною насіння у псевдорозрідженому шарі, що є складним фізичним явищем, не розроблено.

За результатами аналізу відомих досліджень з вирішення проблеми підготовки високоякісного НМ в науково-дослідних лабораторіях вібраційних зернозбиральних машин Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка (Державного біотехнологічного університету) під керівництвом та за участю автора, розроблено новітні перспективні способи інтенсифікації процесу розділення НМ за густиною насіння (ефективність робіт підтверджено актами впровадження (Додаток З) та звітами з виконання науково-дослідних робіт, що фінансувались/фінансуються з Державного бюджету України та приватних підприємств (Додаток Г). Запропоновано математичний апарат з обрання раціональних кінематичних режимів при підготовки НМ відповідних фізико-механічних властивостей. Запропоновано та отримано Патенти на корисну модель (Додаток Ж), результати впровадження яких забезпечують комплексне вирішення проблеми підготовки високоякісного НМ шляхом інтенсифікації процесу розділення НМ за густиною насіння.

РОЗДІЛ 2
МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ ПЛОСКИМИ ПОВІТРОПРОНИКНИМИ ВІБРАЦІЙНИМИ ПОВЕРХНЯМИ

Проведений системний аналіз процесів, технологій та машин для отримання НМ, які використовуються на зернопереробних підприємствах, насіннєвих заводах і фермерськими господарствами, дозволив визначити, що найбільше поширення набув метод вібропневматичного псевдорозрідження, з постійною за величиною дією повітряного потоку [6, 14, 17, 41, 124].

П. М. Заїка, Б. І. Котов, В. П. Ольшанський, С. П. Степаненко [77, 78, 98, 100 161] та інші дослідники створили основи теорії розділення частинок НМ у псевдорозрідженому шарі при впливі коливань різного характеру. Визначено умови початку внутрішньошарових переміщень, закономірності протікання процесу сепарації, які пов'язують фізико-механічні властивості матеріалу з динамічними і кінематичними характеристиками робочої поверхні. Однак, ці теоретичні дослідження, як правило, базуються на найпростіших фізичних моделях [10, 29, 32].

При вібропневматичному розділенні шар частинок НМ, які різняться за фізико-механічними властивостями, а саме – власною густиною частинок, що знаходяться на повітропроникній поверхні, піддається впливу повітряного потоку та коливанням робочої поверхні певної амплітуди. В результаті при досягненні оптимальних значень швидкості повітряного потоку, амплітуди і частоти коливань робочої поверхні шар частинок НМ набуває властивостей псевдорозрідженої рідини, тобто властивості текучості. Це призводить до того, що починається процес розшарування НМ: частинки, які відрізняються за власною густиною і/або аерогравітаційними властивостями починають занурюватись або спливати у псевдорозрідженому шарі. [18].

Існуючі математичні моделі, які описують процес, у переважній більшості базуються на рівняннях руху окремої частинки [77, 112, 117]. При

цьому вплив псевдорозрідженого шару на частинку враховувався введенням різного роду сил: сили опору середовища у наближенні Ньютона або Стокса; сили Архімеда, що виштовхує, інших сил. Такий підхід, хоча й дозволяє визначити вплив кінематичних режимів, конструктивних і технологічних параметрів на внутрішньошарові процеси у псевдорозрідженому шарі частинок, однак, має обмежену можливість використання, оскільки, введення до рівняння руху окремої частинки сил, що наведені вище, як правило робилось формально, без ув'язки з іншими членами рівняння. Крім того, фізичні моделі, які базуються на рівнянні окремої частинки, не можуть у повній мірі описати такі важливі ефекти, як внутрішня взаємодія між частинками, яку обумовлено поперечним зсувом, утворення скупчення частинок, яке призводить до зниження коефіцієнта опору та інші фактори. Однак визначено, що ці фактори здійснюють суттєвий вплив на інтенсивність процесу розділення частинок і, в кінцевому рахунку, на ефективність використання процесу у відповідних технологіях.

У зв'язку з цим, задача розробки механіко-математичних моделей, що дозволяють в найбільш загальному виді врахувати взаємодію шарів частинок у псевдорозрідженому середовищі, є актуальною.

Одним з ефективних підходів до вирішення поставлених задач, що виникають при вирішенні цієї проблеми, який підтвердив свою адекватність, є метод гідродинаміки багатофазних систем (середовищ) [7, 8, 160, 181, 183]. При використанні такого методу НМ, який піддається впливу повітряного потоку і вібраційних коливань повітропроникної робочої поверхні, моделюються багатофазною структурою, шо складається з дискретних компонент (кінцевою кількістю частинок, які різняться за густиною) і неперервної компоненти – газоподібного середовища (повітря). З точки зору механіки [10, 13, 16, 39, 91] ці дискретні і неперервні компоненти псевдорозрідженого НМ розглядаються як «суцільні середовища», що взаємодіють між собою. В подальшому обраний підхід буде використано для

моделювання процесу розділення НМ повітропроникними робочими поверхнями плоскої та циліндричної форми.

2.1. Основні рівняння гідродинаміки багатофазної системи, які моделюють псевдорозріджений шар насіннєвого матеріалу

У відповідності до основних концепцій гідродинаміки багатофазних систем (середовищ) [8, 37, 68, 94, 126, 144] будемо вважати, що псевдорозріджений НМ складається з двох фаз: дискретна фаза, яку утворено твердими частинками НМ, що різняться за густиною і неперервна фаза – газоподібне середовище (повітря). Дискретна фаза розглядається як число N дискретних компонент, кожну з яких утворено твердими частинками НМ з густиною $\bar{\rho}_n, n = 1,2,\dots N$ [19, 237].

В такому випадку густина шару частинок НМ n - компонента дискретної фази дорівнює:

$$\rho_n = \delta_n \bar{\rho}_n,\ n = 1,2,\dots,N, \tag{2.1}$$

де: δ_n – об’ємна доля частинок n - компонента у псевдорозрідженому НМ.

Ефективну густину дискретної фази в цілому визначаємо як:

$$\rho_P = \sum_{n=1}^{N} \rho_n.$$

Густину неперервної фази, відповідно до [10], визначаємо, як:

$$\rho = \bar{\rho}\left(1 - \sum_{n=1}^{N} \frac{\rho_n}{\bar{\rho}_n}\right) = \bar{\rho}(1 - \sum_{n=1}^{N} \delta_n), \tag{2.2}$$

де: $\bar{\rho}$ – густина газоподібної фази.

Враховуючи (2.1) і (2.2), густина псевдорозрідженого НМ в цілому дорівнює:

$$\rho_c = \rho + \rho_P. \tag{2.3}$$

Швидкість руху псевдорозрідженого НМ визначаємо з рівняння:

$$\rho_c \vec{V}_c = \sum_{n=1}^{N} \rho_n \vec{V}_n + \rho \vec{V}, \tag{2.4}$$

де: $\vec{V}_n$ – швидкість n - компонента дискретної фази; $\vec{V}$ – швидкість неперервної фази.

Оскільки n - компонента дискретної фази розглядається як суцільне середовище, то справедливе рівняння безперервності:

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla\left(\rho_n \vec{V}_n\right) = 0,\ n = 1,2,\ldots,N. \tag{2.5}$$

Аналогічно для неперервної фази:

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla\left(\rho \vec{V}\right) = 0. \tag{2.6}$$

Рівняння нерозривності для псевдорозрідженого НМ в цілому має вид [10]:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla\left(\rho_c \vec{V}_c\right) = 0. \tag{2.7}$$

Надалі будемо вважати, що суцільні середовища, які моделюють псевдорозріджений НМ, є Ньютонівськими рідинами.

Шар НМ знаходиться на плоскій повітропроникній робочій поверхні.

Введемо Декартову систему координат x_1, x_2, x_3 таким чином, щоб плоска повітряпроникна поверхня лежала у площині x_1, x_2, в такому випадку вісь x_3 перпендикулярно цій поверхні, яка знаходиться під певними кутами. Осі x_1 і x_2 нахилено під кутом до горизонтальної площини, відповідно α_1 та α_2.

Під дією повітряного потоку і коливань робочої повітропроникної поверхні шар НМ знаходиться у псевдорозрідженому стані. У відповідності до [10], рівняння руху багатофазної системи, яка моделює рух НМ представлено у вигляді:

$$\rho_n\left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial t}+(\nabla,\vec{V}_n)V_{ni}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[-P_n\delta_{ij}+\mu_n\left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j}+\frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i}\right)\right]+$$

$$\rho_n F_{ni}+\rho_n\sum_{n=1}^{N}F_{nm}(V_{mi}-V_{ni}),\quad n=1,2,\dots,N;\quad i=1,2,3. \qquad (2.8)$$

де: $V_{ni}-i$ - та компонента швидкості $\vec{V}_n$ n - компонента дискретної фази; μ_n – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості n - компонента у насіннєвому матеріалі; $F_{ni}-i$ -та компонента масової сили, що діє на одиницю маси n - компонента НМ; P_n – парціальний статичний тиск n - компонента НМ; δ_{ij} – символ Кронекера, за символами, що повторюються.

Останній член правого боку (2.8) введено для урахування взаємодії n - компонента з іншим m - компонентом НМ. При цьому величини F_{nm} характеризують цю взаємодію і задовольняють умові:

$$\rho_n F_{nm}=\rho_m F_{mn}.$$

Ефективні коефіцієнти динамічної в'язкості $\mu_n,\quad n=1,2,\dots,N$ n - компонента дискретної фази визначаються згідно рівняння:

$$\mu_n\left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j}+\frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i}\right)=\mu_n\frac{\rho_n}{\rho_c}+\frac{\mu_n}{\rho_c}\left[(V_{ni}-V_j)\frac{\partial\rho_n}{\partial x_j}+(V_{nj}-V_j)\frac{\partial\rho_n}{\partial x_j}\right]+$$

$$+\rho_n(V_{ni}-V_i)(V_{nj}-V_j), \qquad (2.9)$$

Як видно з [11], i -тий компонент сили F_{ni}, яка діє на одиницю маси n - компонента дискретної фази матеріалу, можна навести у вигляді:

$$F_{ni} = \frac{1}{2}\frac{\overline{\rho}}{\overline{\rho_n}}\left[\frac{\partial}{\partial t}(V_i - V_{ni}) + \left(\nabla,\ \vec{V} - \vec{V_n}\right)(V_i - V_{ni})\right] + F_n(V_i - V_{ni}) +$$

$$+\frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\overline{\rho_n}}\int_0^t\left[\frac{d}{dt}(V_i - V_{ni})(t-\tau)^{-1/2}\right]d\tau + f_{ni}, \quad i = 1,2,3. \qquad (2.10)$$

де: $\overline{\rho_n}$ – густина частинок, що утворюють n - компонент дискретної фази; $\overline{\rho}$ і ν – відповідно густина і коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази; a_n – еквівалентний радіус (за об'ємом) частинок n - компонента дискретної фази; f_{ni} – i - тий компонент зовнішньої сили, що діє на частинки n - компонента; F_n – коефіцієнт, який характеризує взаємодію неперервної фази з частинками n - компонента дискретної фази.

Наведені рівняння (2.5), (2.8) для компоненти дискретної фази псевдорозрідженого НМ характеризують їх, як суцільні середовища, що взаємодіють.

Окрім рівнянь (2.5), (2.8) будемо використовувати рівняння руху неперервної фази НМ, які отримано безпосереднім додаванням (2.8) з урахуванням (2.2).

$$\overline{\rho}\left[\frac{\partial V_i}{\partial t} + \left(\nabla,\vec{V}\right)V_i\right] = -\left(1 - \sum_{n=1}^{N}\frac{\rho_n}{\overline{\rho_n}}\right)\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right)\right] +$$

$$+\overline{\rho}\,F_i - 0{,}5\overline{\rho}\sum_{n=1}^{N}\frac{\rho_n}{\overline{\rho_n}}\left[\frac{\partial}{\partial t}(V_i - V_{ni}) + \left(\nabla,\vec{V} - \vec{V_n}\right)(V_i - V_{ni})\right] -$$

$$-\frac{9\sqrt{\nu}\overline{\rho}}{2\sqrt{\pi}}\sum_{n=1}^{N}\frac{\rho_n}{\overline{\rho_n}a_n}\int_0^t\left[\frac{d}{d\tau}(V_i - V_{ni})(t-\tau)^{-1/2}\right]d\tau - \sum_{n=1}^{N}\rho_n F_n\,(V_i - V_{ni}),$$

$$i = 1,2,3. \qquad (2.11)$$

Члени правої частини рівняння (2.11) характеризують взаємодію дискретної і неперервної фаз псевдорозрідженого НМ. Так, наприклад, четвертий член враховує прискорення маси частинок дискретної фази відносно безперервної фази, п’ятий член описує миттєвий гідродинамічний опір, останній член вказує опір частинок дискретної фази.

Рівняння (2.8) – (2.11), які описують зміну кількості руху дискретної і неперервної фази псевдорозрідженого НМ, мають важливе значення, однак, не менш цікаві процеси, які призводять до зміни енергії НМ. Найбільш загальне рівняння, яке описує зміну енергії НМ, одержано у [11]. Для того, щоб навести це рівняння введемо наступні енергетичні характеристики НМ T і T_n – абсолютні температури відповідно неперервної фази і n - компонента дискретної фази.

Рівняння, яке описує енергетичну зміну НМ набуде вигляду:

$$\rho\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{V_i^2}{2}+cT\right)+\left(\nabla,\vec{V}\right)\left(\frac{V_i^2}{2}+cT\right)\right]+$$
$$+\sum_{n=1}^{N}\rho_n\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{V_{ni}^2}{2}+c_nT_n\right)+\left(\nabla,\vec{V}_n\right)\left(\frac{V_{ni}^2}{2}+c_nT_n\right)\right]=$$
$$=\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\kappa\frac{\partial T}{\partial x_j}+\sum_{n=1}^{N}\frac{\partial}{\partial x_j}\kappa_n\frac{\partial T_n}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}V_i\left[\mu\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j}+\frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right)\right]+$$
$$+\sum_{n=1}^{N}\frac{\partial}{\partial x_j}V_{nj}\left[\mu_n\left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j}+\frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i}\right)\right]+\Phi_E+\sum_{n=1}^{N}\Phi_{nE}. \qquad (2.12)$$

де: величини Φ_{nE} описують нагрівання частинок за рахунок в’язкої диссипації (розсіювання).

$$\Phi_{nE}=\rho_nF\left(\vec{V}-\vec{V}_n\right)^2+\rho_n\sum_{m=1}^{N}F_{nm}\left(\vec{V}-\vec{V}_n\right)^2,\quad n=1,2,\ldots,N.$$

Величина Φ_E характеризує випромінювання одиниці об'єму НМ і враховує зовнішні джерела тепла.

Таким чином, рівняння (2.5), (2.6), (2.8) – (2.12) описують динаміку і енергетичні характеристики руху НМ.

Як видно з (2.8), (2.11) та (2.12), при гідродинамічному моделюванні руху псевдорозрідженого НМ необхідно вводити такі важливі характеристики багатофазного середовища, як коефіцієнти динамічної в'язкості дискретної і неперервної фаз. Визначення цих величин являє собою достатньо складну задачу [8, 9], оскільки її вирішення дозволяє оцінити адекватність математичної моделі реальним фізичним процесам, які супроводжують внутрішньошаровий рух частинок НМ. Слід відмітити, що схожу задачу вирішували для моделювання процесів розділення НМ плоскими та циліндричними решетами [8, 9, 12, 17]. Нижче запропоновано розв'язок цієї задачі для випадку процесів розділення НМ методом вібраційного псевдорозрідження з постійним за величиною повітряним потоком.

2.2. Теоретичний метод визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості псевдорозрідженого насіннєвого матеріалу

Розв'язок задачі визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості псевдорозрідженого НМ базується на рівнянні (2.8) і припущеннях, які наведено далі.

Будемо вважати, що шар НМ знаходиться в русі під дією вібраційних гармонічних коливань робочої повітропроникної поверхні (деки) і потоку повітря. НМ розглядається як двофазна система, що складається з неперервної фази та дискретної фази, частинки якої відрізняються за аерогравітаційними властивостями і власною густиною та мають властивість занурюватись або спливати на поверхню. Концентрація частинок дискретної фази вважаємо достатньо малою. Тому взаємодію цих частинок та їх впливом на неперервну

фазу можна знехтувати. Враховуючи такі припущення, рівняння (2.8) можна навести у вигляді:

$$\rho_1\left(\frac{\partial V_{1i}}{\partial t}+\left(\nabla,\vec{V}_2\right)V_{1i}\right)=\frac{\rho_1\overline{\rho}}{2\overline{\rho_1}}\left[\frac{\partial}{\partial t}(V_i-V_{1i})+\left(\nabla,\vec{V}-\vec{V}_1\right)(V_i-V_{1i})\right]+$$
$$+\frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_1\overline{\rho_1}}\int_0^t\left[\frac{d}{d\tau}(V_i-V_{1i})(t-\tau)^{-1/2}\right]d\tau+f_{1i},\quad i=1,2,3. \qquad (2.13)$$

де: $\vec{V}$ і $\vec{V}_1$ – швидкості, відповідно неперервної і дискретної фаз; a_1 – еквівалентний радіус (за об'ємом) частинок дискретної фази; ν – ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази (псевдорозрідженого НМ); f_{1i} – i -та компонента зовнішньої сили, яка діє на частинки дискретної фази (сила тяжіння в гравітаційному полі).

Густини ρ_1 і $\overline{\rho_1}$ зв'язані співвідношенням (2.1), а саме:

$$\rho_1=\delta_1\overline{\rho_1},$$

де: δ_1 – об'ємна доля частинок дискретної фази.

Коефіцієнт F_1 у рівнянні (2.13) характеризує процес переносу кількості руху, що зв'язаний з силою опору неперервної фази. Як наведено у [11], цей коефіцієнт можна навести:

$$F_1=\frac{\overline{P}}{2\overline{\rho_1}(1-\delta_1)^2a_1}\left(1{,}75V_0+\frac{75\nu\delta_1}{a_1}\right), \qquad (2.14)$$

де: V_0 – швидкість повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару НМ.

Рівняння (2.13) є нелінійним інтегродиференційним рівнянням. В загальному вигляді їх розв'язок можна отримати тільки чисельними методами за допомогою ПК [14]. Однак, враховуючи вищенаведені припущення, можна знехтувати у (2.13) нелінійними членами типу $(\nabla, \vec{V}_1)\vec{V}_1$ и $\left(\nabla, \vec{V} - \vec{V}_1\right)\left(\vec{V} - \vec{V}_1\right)$. Окрім того, оскільки об'ємна концентрація частинок дискретної фази не критично впливає на рух неперервної фази, то можна вважати, що рух неперервної фази відбувається за законом, який задано і визначається вібраційними коливаннями робочої поверхні. В результаті цього рівняння (2.13) стає незалежним.

Для розв'язку задачі про визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості достатньо обмежитись рівнянням відповідного значення індексу $i = 3$, тобто розглядати рух частинок дискретної фази вздовж осі x_3, яку направлено перпендикулярно плоскій робочій поверхні. Будемо вважати, що компонента V_3 швидкості неперервної фази змінюється за наступним законом:

$$V_3 = A\omega \cos \alpha_2 \cos \alpha_3 \sin(\omega t), \tag{2.15}$$

де: ω і A відповідно, – кругова частота і амплітуда коливань неперервної фази; α_3 – кут нахилу напряму коливань робочої поверхні, який відраховано від осі x_3; α_2 – поперечний кут нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини.

Компонента сили тяжіння f_{13} має вигляд:

$$f_{13} = -\overline{\rho_1} g \cos \alpha_1 \cos \alpha_2, \tag{2.16}$$

де: α_1 – повздовжній кут нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини.

Підставивши (2.15) і (2.16) у (2.13) та, враховавши зроблені раніше допущення, після низки перетворень отримаємо:

$$\delta_1(\overline{\rho_1}+0.5\overline{\rho})\frac{\partial V}{\partial t}+\rho_1 F_1 V+\frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_1\overline{\rho_1}}\int_0^t\frac{\partial V}{\partial\tau}(t-\tau)^{-1/2}d\tau=$$
$$=\rho_1 A\omega^2\cos\alpha_2\cos\alpha_3\cos\omega t-\overline{\rho_1}g\cos\alpha_1\cos\alpha_2. \qquad (2.17)$$

де: V – відносна швидкість частинок дискретної фази відносно неперервної фази.

Розв'язок інтегро-диференційного рівняння (2.17) можна отримати за допомогою перетворення Лапласса за часом.

Дійсно, нехай $\overline{V}(q)$ – перетворення Лапласса функції $V(t)$, тобто:

$$\overline{V}(q)=\int_0^\infty V(t)\,e^{-qt}dt. \qquad (2.18)$$

В такому випадку, використовуючи перетворення Лапласса до лівої та правої частини рівняння (1.17) і враховуючи, що

$$\int_0^\infty e^{-qt}\left(\int_0^t\frac{dV}{d\tau}(t-\tau)^{-1/2}d\tau\right)dt=\overline{V}(q)\sqrt{\pi q},$$

отримуємо:

$$\overline{V}(q)\left(A_1 q+\sqrt{q}A_2+A_3\right)=\frac{D_1}{q^2+\omega^2}+\frac{D_2}{q}. \qquad (2.19)$$

Тут наведено позначення:

$$A_1=\delta_1(\overline{\rho_1}+0.5\overline{\rho}),\quad A_2=\frac{q\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2a_1\overline{\rho_1}},\quad A_3=\rho_1 F_1,$$

$$D_1 = \rho_1 A\omega^3 \cos\alpha_2 \cos\alpha_3\,, \quad D_2 = -\overline{\rho_1 g}\cos\alpha_1 \cos\alpha_{2,} \tag{2.20}$$

З (2.19) маємо:

$$\overline{V}(q) = \frac{D_1}{\Phi(q)(q^2+\omega^2)} + \frac{D_2}{\Phi(q)q}, \tag{2.21}$$

де: $\Phi(q) = qA_1 + \sqrt{q}A_2 + A_3$.

Використовуючи до (2.21) формулу перетворення Лапласса [36, 84, 107, 162], одержимо:

$$V(t) = \frac{1}{2\pi i}\int_{a-i\infty}^{a+i\infty} e^{qt}\overline{V}(q)dq, \tag{2.22}$$

де: $a > 0$ – довільне число.

Формула (2.22) дає формальний розв'язок рівняння (2.17). Для визначення інтегралу у (2.22) використаємо метод віднімання [162]. З цією метою будемо розглядати функцію $\overline{V}(q)$ з (2.21), як функцію комплексного перемінного $q = Re\,q + i\,Im\,q$ у комплексній площині, що розрізано за від'ємною піввісю $Re\,q \le 0$. Оскільки величина $\Phi(q)$ (2.21) залежить від $\sqrt{q}$, то для визначеності будемо розглядати частину кореню, для якої $Re\sqrt{q} \ge 0$. Як легко впевнитись, в цьому випадку функція $\Phi(q)$ не має коренів відносно $\sqrt{q}$. Тому функція $\overline{V}(q)$ являється аналітичною у комплексній площині з перерізом вздовж пів осі $Re\,q \le 0$ за виключенням особливих точок $q = \pm i\omega$ типу полюсу [106]. Крім того, ця функція при $|q| \to \infty$ рівномірно, відносно $arg\,q$ прагне до нуля. Ці властивості функції $\overline{V}(q)$ дозволяють деформувати контур інтегрування у (2.22) і використати метод віднімання. В результаті після ряду перетворень одержимо:

$$V(t) = \frac{D_1}{\pi} Im\left(\int_0^{\infty} \frac{e^{-xt}}{\Phi(x)(\omega^2+x^2)} dx\right) + \frac{D_2}{A_3} + D_1\, Re\left(\frac{e^{i\omega t}}{\Phi(i\omega)i\omega}\right). \qquad (2.23)$$

Тут $Re(\cdots)$ і $Im(\cdots)$ позначає, відповідно, реальну і уявну частини комплексного числа. Можна сказати, що при $t \to \infty$ інтегральний член у (2.22) зменшується експоненційно. Тому для режиму руху частинок НМ, що встановився, цим членом можна знехтувати.

У такому випадку:

$$V(t) = \frac{D_2}{A_3} + D_1\, Re\left(\frac{e^{i\omega t}}{i\omega\Phi(i\omega)}\right). \qquad (2.24)$$

Визначимо другий доданок у (2.24), одержимо:

$$\frac{e^{i\omega t}}{i\omega\Phi(i\omega)} = \frac{e^{i\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)}}{\omega\left(i\omega A_1 + \sqrt{i\omega}A_2 + A_3\right)} =$$

$$= \frac{e^{i\left(\omega t-\frac{\pi}{2}-\phi\right)}}{\omega\sqrt{\left(A_3+\sqrt{\frac{\omega}{2}}A_2\right)^2+\left(\omega A_3+\sqrt{\frac{\omega}{2}}A_2\right)^2+\left(\omega A_1+\sqrt{\frac{\omega}{2}}A_2\right)^2}}, \qquad (2.25)$$

де: $\phi = arctg\left(\frac{\omega A_1+\sqrt{\frac{\omega}{2}}A_2}{A_3+\sqrt{\frac{\omega}{2}}A_2}\right)$.

Одержимо кінцевий результат:

$$Re\left(\frac{e^{i\omega t}}{i\omega\Phi(i\omega)}\right) = \frac{sin(\omega t-\phi)}{\omega\sqrt{\left(A_3+\sqrt{\frac{\omega}{2}}A_2\right)^2+\left(\omega A_1+\sqrt{\frac{\omega}{2}}A_2\right)^2}}. \qquad (2.26)$$

Підставивши (2.26) у (2.24) і врахувавши (2.20), маємо вираз для розрахунку відносної швидкості частинок дискретної фази НМ вздовж осі x_3:

$$V(t) = -\frac{g\cos\alpha_1\cos\alpha_2}{\delta_1 F_1} + \frac{2\sqrt{2}a_1\rho_1^2 A\omega^{3/2}\cos\alpha_2\cos\alpha_3\sin(\omega t-\phi)}{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}\sqrt{(1+B_1)^2+(1+B_2)^2}}, \quad (2.27)$$

де:

$$B_1 = \frac{2\sqrt{2}\rho_1^2 a_1 F_1}{9\overline{\rho}\sqrt{\omega\nu}}, \quad B_2 = \frac{2\sqrt{2}a_1\rho_1\delta_1(\overline{\rho_1}+0.5\overline{\rho})}{9\overline{\rho}}\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}. \quad (2.28)$$

Як видно з (2.27) і (2.28), відносна швидкість частинок дискретної фази змінюється гармонічно за часом з частотою коливань робочої поверхні, а її амплітуда складним чином залежить від фізико-механічних властивостей НМ, швидкості повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару і ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості. Для отримання рівняння, яке пов'язує між собою ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості та фізико-механічні властивості НМ, використаємо принцип еквівалентності імпульсів сил опору руху частинки у різних середовищах. Аналогічний підхід було використано у [126].

Розрахуємо імпульс сили опору руху частинок дискретної фази за один пів період коливань неперервної фази. Відповідно до рівняння (2.17), силу опору можна навести у вигляді:

$$F_c = \frac{4\pi a_1^3}{3}\rho_1 F_1 V, \quad (2.29)$$

де: a_1 – еквівалентний радіус частинки дискретної фази; V – відносна швидкість частинок по відношенню до неперервної фази НМ; коефіцієнт F_1 – визначається за формулою (2.14) і має вигляд:

$$F_1 = \frac{\overline{\rho}}{2\overline{\rho}(1-\delta_1)^2 a_1}\left(1{,}75V_0 + \frac{75\nu\delta_1}{a_1}\right). \quad (2.30)$$

де: V_0 –- швидкість повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару.

Імпульс сили за півперіод коливань неперервної фази дорівнює:

$$I_c = \int_{\frac{\phi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}+\frac{\phi}{\omega}} F_c d_t = \frac{4\pi a_1^3}{3}\rho_1 F_1 \int_{\frac{\phi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}+\frac{\phi}{\omega}} V(t) d_t =$$

$$= \frac{4\pi a_1^3}{3}\rho_1 F_1 \left[-\frac{\pi g \cos\alpha_1 \cos\alpha_2}{\delta_1 F_1 \omega} + \frac{4\sqrt{2}\rho_1^2 A\omega^{1/2}\cos\alpha_2\cos\alpha_3}{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}\sqrt{(1+B_1)^2+(1+B_2)^2}}\right], \quad (2.31)$$

де: величини B_1 і B_2 визначаються за формулою (2.28).

З іншого боку, розглядаючи неперервну фазу НМ, як псевдорозріджений шар частинок, можна припустити, що переміщення частинок дискретної фази, переважно, відбувається у напрямку повітряного потоку по каналам, які утворюються у псевдорозрідженому шарі. В такому випадку, використовуючи результати, одержані у [9], силу опору можна навести наступним чином:

$$F_{c1} = \frac{4\pi a_1^3}{3}\rho_1(1-\varepsilon)^{1/3}\frac{V^2}{2a_1}. \quad (2.32)$$

де: ε – порозність псевдорозрідженого шару НМ; V – відносна швидкість частинок дискретної фази (2.27).

В такому випадку імпульс сили (2.32) за пів період коливань набуває вигляду:

$$I_{c1} = \frac{4\pi a_1^3}{6a_1}\rho_1(1-\varepsilon)^{1/3}\int_{\frac{\phi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}+\frac{\phi}{\omega}} V^2 dt =$$

$$= \frac{4\pi^2 a_1^3 \rho_1 (1-\varepsilon)^{1/3}}{6\omega a_1}\left[\begin{matrix}\frac{g^2\cos^2\alpha_1\cos^2\alpha_2}{\delta_1^2 F_1^2} - \frac{8\sqrt{2}g\cos\alpha_1\cos^2\alpha_2\cos\alpha_3\rho_1^2 A\omega^{3/2}}{9\delta_1 F_1\overline{\rho}\sqrt{\nu}\sqrt{(1+B_1)^2+(1+B_2)^2}} + \\ + \frac{8a_1^2\rho_1^4 A^2\omega^3\cos^2\alpha_2\cos^2\alpha_3}{162\overline{\rho}^2\nu[(1+B_1)^2+(1+B_2)^2]}\end{matrix}\right]. \quad (2.33)$$

Порівнюючи імпульси I_c і I_{c1}, отримаємо рівняння для визначення ефективного коефіцієнту динамічної в’язкості неперервної фази НМ:

$$-\frac{\pi g\cos\alpha_1\cos\alpha_2}{\delta_1} + \frac{4\sqrt{2}\overline{\rho}_1^2\delta_1^2 A\omega^{3/2}\cos\alpha_2\cos\alpha_3 F_1}{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}\sqrt{(1+B_1)^2+(1+B_2)^2}} =$$

$$= \frac{\pi}{2}(1-\varepsilon)^{1/3}\left(\begin{matrix}\frac{g^2\cos^2\alpha_1\cos^2\alpha_2}{\delta_1^2 F_1^2} - \frac{8\sqrt{2}g\cos\alpha_1\cos^2\alpha_1\cos\alpha_3\rho_1^2 A\omega^{3/2}}{9\delta_1 F_1\overline{\rho}\sqrt{\nu}\sqrt{(1+B_1)^2+(1+B_2)^2}} + \\ + \frac{4\overline{\rho}_1^4\delta_1^4 A^2\omega^3\cos^2\alpha_2\cos^2\alpha_3}{81\overline{\rho}^2\nu[(1+B_1)^2+(1+B_2)^2]}\end{matrix}\right). \quad (2.34)$$

Рівняння (2.34) встановлює зв'язок між ефективним коефіцієнтом динамічної в’язкості і наступними параметрами НМ: характеристиками опорної поверхні і швидкістю повітряного потоку; густиною $\overline{\rho_1}$ і $\overline{\rho}$ частинок дискретної і неперервної фаз НМ; δ_1 і ε – об’ємною концентрацією частинок дискретної фази і порозністю псевдорозрідженого шару, відповідно; α_1 і α_2 – повздовжнім і поперечним кутами нахилу робочої поверхні по відношенню до горизонтальної площини; амплітудою A і круговою частотою ω коливань частинок неперервної фази; α_3 – кутом напряму коливань відносно осі, яка направлена перпендикулярно робочій поверхні.

Таким чином, запропоновано метод, який дозволяє визначити коефіцієнт динамічної в’язкості НМ, який знаходиться під дією повітряного потоку і вібраційних гармонічних коливань робочої поверхні.

2.3. Гідродинамічні моделі пошарового руху насіннєвого матеріалу по плоским повітропроникним робочим поверхням, що вібрують

У розділі побудовані моделі пошарового руху НМ, що враховують як вплив повітряного потоку, так і вібраційні коливання площини робочої поверхні пневмосортувального столу.

Розглянемо одномірні моделі. В межах цих моделей НМ представлено двофазною псевдорозрідженою (квазірідиною), що утворюється двома фазами: неперервною фазою (повітря), що складається з частинок високої концентрації і дискретної фази, частинки якої відрізняються фізико-механічними властивостями від частинок неперервної фази і мають змогу занурюватись та спливати.

Припустимо, що швидкість частинок дискретної фази залежить тільки від однієї просторово змінної за часом (одномірна модель). Взаємодія неперервної фази на частинки дискретної фази розглядається як вплив суцільного середовища, яке виконує рух за визначеним законом, що обумовлений впливом повітряного потоку і коливаннями робочої поверхні деки пневмосортувального столу.

Надалі будуть побудовані багатомірні моделі руху НМ. В цьому випадку НМ моделюється кінцевим числом шарів псевдорідини, що різняться за своїми (аеро) гідродинамічними властивостями та власною густиною частинок. В межах цих моделей досліджується пошаровий рух НМ, який моделює розподіл НМ на фракції, відповідної густини, вибірковим транспортуванням часток різної власної густини за траєкторіями, що відрізняються.

2.3.1. Одномірні гідродинамічні моделі руху насіннєвого матеріалу

Приймемо Декартову систему координат x_1, x_2, x_3 таким чином, що площина x_1, x_2 співпадає з площиною робочої поверхні деки пневмостолу, а вісь x_3 направлена вертикально вгору до робочої поверхні, яка має регульовані кути нахилу. Осі x_1 і x_2 складають відповідно, кути α_1 і α_2 з горизонтальною площиною. Враховуємо, що робоча поверхня деки виконує гармонічні коливання з круговою частотою ω, амплітудою A і кутом направленості коливань – α_3 (кут α_3 відраховується від осі x_3). В результаті впливу коливань і повітряного потоку на НМ, переходить у псевдорозріджений стан. Моделюємо рух НМ, як рух псевдорідини, що складається з двох фаз: неперервна фаза, яка характеризується ефективним коефіцієнтом динамічної в'язкості μ_n і середньою приведеною густиною $\overline{\rho}$ частинок, що утворюють цю фазу і дискретної фази, яка складається із частинок з середньою густиною $\overline{\rho}_1$. В такому випадку приведена густина частинок дискретної фази високої концентрації дорівнює:

$$\rho_1 = \delta\overline{\rho_1},$$

де: δ – об'ємна доля частинок дискретної фази у НМ.

Оберемо умову, що частинки дискретної фази в кожному елементарному макрооб'ємі присутні у виді сферичних включень однакового радіусу a, а об'ємна концентрація дискретної фази мала. Крім того, нехтуємо безпосереднім впливом і зіткненням між частинками дискретної фази.

У відповідності до (2.5) – (2.11) і зробленими припущенням, рівняння руху двофазної псевдорідини, що моделює шар НМ, мають вигляд:

$$\rho_1\left(\frac{\partial\vec{V}_1}{\partial t}+(\nabla,\vec{V}_1)\vec{V}_1\right)=-\nabla P_1+\mu_n\Delta\vec{V}_1+$$

$$+\rho_1\left[\begin{matrix}0{,}5\frac{\overline{\rho}}{\overline{\rho}_1}\left(\frac{\partial}{\partial t}(\vec{V}-\vec{V}_1)+(\nabla,\vec{V}-\vec{V}_1)(\vec{V}-\vec{V}_1)+F(\vec{V}-\vec{V}_1)\right)+\\+\frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a\overline{\rho}_1}\int_0^t\frac{d}{dt}(\vec{V}-\vec{V}_1)(t-\tau)^{-1/2}+\vec{f}\end{matrix}\right], \qquad (2.35)$$

$$\frac{\partial\rho_1}{\partial t}+\nabla(\rho_1\vec{V}_1)=0. \qquad (2.36)$$

Де: $\vec{V},\vec{V}_1$ – відповідно, швидкості частинок неперервної і дискретної фаз; P_1 – парціальний тиск дискретної фази; μ_n – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості дискретної фази; ν – ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази; $\vec{f}$ – зовнішня сила, що діє на частинки дискретної фази (у якості такої сили приймаємо силу тяжіння); ρ,ρ_1 – приведені густини неперервної і дискретної фаз; a – радіус частинок дискретної фази; F – коефіцієнт, що характеризує процес переносу кількості руху, пов'язаного з силою опору неперервної фази (2.1):

$$F=\frac{\overline{\rho}}{2a\overline{\rho_1}(1-\delta)^2}\left(1{,}75V_0+\frac{75\nu\delta}{a}\right), \qquad (2.37)$$

де: V_0 – середня швидкість повітряного потоку на вільній поверхні НМ.

Рівняння (2.35) відноситься до нелінійними інтегро-диференційних рівнянь, тому їх розв'язок в загальному вигляді можна отримати тільки на основі чисельних методів за допомогою ПК. Однак, за припущеннями, які було висунуто раніше, і обмежуючись одномірними моделями, розв'язок рівнянь (2.35), (2.36), який буде наведено нижче, можна отримати у аналітичній формі.

В межах одномірних моделей будемо вважати, що швидкість $\vec{V}_1$ частинок дискретної фази залежить від однієї просторової змінної x_3 (ось x_3 перпендикулярна площині деки, яку розташовано під певними кутами нахилу).

Окрім того, не будемо враховувати нелінійні члени типу $(\nabla, \vec{V}_1)\vec{V}_1$, і $(\nabla, \vec{V} - \vec{V}_1)(\vec{V} - \vec{V}_1)$. Останнє можливе, у випадку якщо виконується умова

$$\overline{V} << \frac{\nu_1}{L},\ \overline{V} << \frac{L}{T},$$

де: L и T – просторовий і часовий масштаби вимірів швидкості частинок дискретної фази; $\overline{V}$ – максимальна швидкість частинок.

Надалі приймаємо виконання цих умов.

По відношенню швидкості частинок неперервної фази $\vec{V}$ вважаєм, що вона співпадає зі швидкістю повітряного потоку.

Враховуючи припущення, що зроблені, рівняння (2.35) і (2.36) можна представити у вигляді:

$$\left(1 + 0{,}5\frac{\overline{\rho}}{\overline{\rho_1}}\right)\frac{\partial V_{11}}{\partial t} = \nu_1 \frac{\partial^2 V_{11}}{\partial x_3^2} - FV_{11} - \frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a\overline{\rho_1}}\int_0^t \frac{\partial V_{11}}{\partial \tau}(t-\tau)^{-1/2}d\tau + f_1\ , \quad (2.38)$$

$$\left(1 + 0{,}5\frac{\overline{\rho}}{\overline{\rho_1}}\right)\frac{\partial V_{12}}{\partial t} = \nu_1 \frac{\partial^2 V_{11}}{\partial x_3^2} - FV_{11} - \frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a\overline{\rho_1}}\int_0^t \frac{\partial V_{12}}{\partial \tau}(t-\tau)^{-1/2}d\tau + f_2\ , \quad (2.39)$$

$$\left(1+0{,}5\frac{\overline{\rho}}{\overline{\rho_1}}\right)\frac{\partial V_{13}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial P_1}{\partial x_3} + \nu_1\frac{\partial^2 V_{13}}{\partial x_3^2} - FV_{13} -$$
$$-\frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a\overline{\rho_1}}\int_0^t \frac{\partial V_{13}}{\partial \tau}(t-\tau)^{-1/2}d\tau + FV_0 + f_3 \quad . \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial V_{13}}{\partial x_3} = 0, \tag{2.41}$$

де: $f_1 = -g\,sin\,\alpha_1\,,\ f_2 = -g\,sin\,\alpha_2\,cos\,\alpha_1\,,\ f_{31} = -g\,cos\,\alpha_1\,cos\,\alpha_2$; $V_{11}, V_{12},\ V_{13}$ – компоненти швидкості частинок дискретної фази вздовж осей x_1, x_2, x_3; V_0 – середня швидкість повітряного потоку.

Для розв'язку системи рівнянь (2.38) – (2.41) необхідно сформулювати граничні і початкові умови. Не обмежуючи узагальненями, будемо вважати, що в початковий момент часу $t = 0$, швидкість частинок дискретної фази дорівнює нулю:

$$\vec{V}_1\big|_{t=0} = 0. \tag{2.42}$$

Далі, на вільній поверхні НМ тензор напружень $\sigma = \left(\sigma_{ij}\right)_{i,j=1}^{3}$ дискретної фази повинен дорівнювати нулю. Будемо вважати, що НМ займає шар з середньою товщиною h, що розташований на поверхні деки пневмосортувального столу. В такому випадку при $x_3 = h$ виконуються умови:

$$\vec{n} \cdot \sigma|_{x_3=h} = 0, \tag{2.43}$$

де: $\vec{n}$ – орт нормалі до вільної поверхні НМ.

Легко побачити, що (2.9) еквівалентно наступним умовам при $x_3 = h$

$$\sigma_{13} = \sigma_{31} = 0,\ \sigma_{23} = \sigma_{32} = 0,\ \sigma_{33} = 0. \tag{2.44}$$

де:

$$\sigma_{ij} = -P_1\delta_{ij} + \mu_1\left(\frac{\partial V_{1i}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{1j}}{\partial x_i}\right), \quad (2.45)$$

δ_{ij} – символ Кронекера.

Враховуючи, що швидкість частинок дискретної фази не залежить від просторових змінних x_1 і x_2, з (2.44) та (2.45) отримуємо:

$$P_1|_{x_3=h} = 0, \quad \left.\frac{\partial V_{11}}{\partial x_3}\right|_{x_3=h} = 0, \quad \left.\frac{\partial V_{12}}{\partial x_3}\right|_{x_3=h} = 0. \quad (2.46)$$

На твердій поверхні деки з урахуванням прослизання частинок дискретної фази має місце рівність дотичних напружень $\vec{\sigma}_\tau = \vec{n}\sigma\vec{\tau}$ потоку дискретної фази, силі опору деки ПСС, що приходиться на одиницю площини:

$$(\vec{n}\sigma\vec{\tau}_1)|_{x_3=0} = F_{conp.}, \quad (\vec{n}\sigma\tau_2)|_{x_3=0} = F_{conp.}, \quad (2.47)$$

де: $\vec{\tau}_1$ и $\vec{\tau}_2$ – відповідно орти вздовж осей x_1 і x_2.

Якщо поверхня деки не шорстка, то сила опору буде дорівнювати силі сухого ковзання Кулона:

$$F_{on.} = fN,$$

де: f – коефіцієнт тертя, N – нормальний тиск.

Нормальний тиск на одиницю площини поверхні буде дорівнювати

$$P_n = |\vec{n}\sigma\vec{n}|. \quad (2.48)$$

Оскільки $\vec{n} = (0,\ 0,\ 1)$, то, використовуючи (2.45) отримаєм:

$$(\vec{n}\sigma\vec{n}) = -P_1 + 2\mu_1 \frac{\partial V_{13}}{\partial x_3}. \quad (2.49)$$

З (2.41) і (2.49) витікає, що:

$$(\vec{n}\sigma\vec{n}) = -P_1.$$

Відповідно:

$$P_n = |P_1|.$$

Таким чином, на поверхні деки повинні виконуватись наступні граничні умови:

$$\sigma_{13}|_{x_3=0} = f|P_1|, \quad \sigma_{23}|_{x_3=0} = f|P_1|. \quad (2.50)$$

Підставивши у (2.50) вираз для тензора напружень (2.45), отримаєм:

$$\mu_1 \frac{\partial V_{11}}{\partial x_3}\Big|_{x_3=0} = f|P_1|\Big|_{x_3=0}, \quad \mu_1 \frac{\partial V_{12}}{\partial x_3}\Big|_{x_3=0} = f|P_1|\Big|_{x_3=0}. \quad (2.51)$$

Розв'язок системи рівнянь (2.38) – (2.41), що задовольняють умовам (2.42), (2.46), (2.51), проводиться за допомогою перетворень Лапласса за часом.

Розглянемо рівняння (2.40) і (2.41) відносно компоненти швидкості V_{13}.

З (2.41) витікає, що величина V_{13} не залежить від просторової змінної x_3 Після диференціювання рівняння (2.40) за змінною x_3 одержимо:

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial x_3^2} = 0. \tag{2.52}$$

Розв'язок рівняння, що задовольняє умові (2.46), має вигляд:

$$P_1 = B\left(1 - \frac{x_3}{h}\right), \tag{2.53}$$

Величина B співпадає з парціальним тиском дискретної фази на поверхні деки ПСС і її можна вирахувати за формулою:

$$B = \frac{g\rho_1 V_1}{S}, \tag{2.54}$$

де: V_1 – об'єм, що займають частинки дискретної фази, S – площа поверхні деки ПСС.

Підставивши (2.53) у (2.40) і використавши перетворення Лапласа, одержимо :

$$\overline{V_{13}}\left[q\left(1 + 0{,}5\frac{\overline{\rho}}{\overline{\rho_1}}\right) + F + \frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2a\overline{\rho_1}}\sqrt{q}\right] = \frac{B}{\rho_1 hq} + \frac{FV_0}{q} + \frac{f_3}{q}. \tag{2.55}$$

де:

$$\overline{V_{13}} = \int_0^\infty V_{13} e^{-qt} dt.$$

При одержанні (2.55) було використано формулу згортання функцій для перетворення Лапласа [16]:

$$\int_0^\infty e^{-qt}\left(\int_0^t \frac{\partial V_{13}}{\partial \tau}(t-\tau)^{-1/2} d\tau\right) dt = \overline{V_{13}}\sqrt{\pi q}.$$

З (2.22) визначимо $\overline{V_{13}}$:

$$\overline{V_{13}} = \frac{A_4}{q(A_1 q + A_2\sqrt{q} + A_3)}, \tag{2.56}$$

де:

$$A_1 = 1 + 0{,}5\frac{\overline{\rho}}{\overline{\rho_1}}, \quad A_2 = \frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu}}{2a\overline{\rho_1}}, \quad A_3 = F,$$
$$A_4 = FV_0 + g(\delta - cos\,\alpha_1\, cos\,\alpha_2). \tag{2.57}$$

Використавши для (2.56) зворотне перетворення Лапласа маємо:

$$V_{13} = \frac{A_4}{2\pi i}\int_{b-i\infty}^{b+i\infty} \frac{e^{qt}dq}{q(A_1 q + A_2\sqrt{q} + A_3)}, \tag{2.58}$$

де: $b > 0$ – довільне число.

Обчислення інтегралу за (2.25) проводимо методом віднімання [40]. Для цього розглянемо підінтегральну функцію,

$$\Phi(q) = \frac{e^{qt}}{q(A_1 q + A_2\sqrt{q} + A_3)}, \tag{2.59}$$

як функцію комплексної перемінної $q = Re\, q + i\, Im\, q$. В комплексній площині проведемо переріз за від'ємної пів осі $Re\, q \le 0, \quad Im\, q = 0$ і будемо розглядати ту частину кореня $\sqrt{q}$, для якої $Re\,\sqrt{q} \ge 0$. В такому випадку (2.26) є аналітичною в півплощині $Re\, q < 0$, окрім $Re\, q \le 0, \quad Im\, q = 0$, причому $|\Phi(q)| \to 0$ при $|q| \to \infty$ в півплощині $Re\, q < 0$. Ці властивості дозволяють

деформувати контур інтегрування у (2.25) і врахувавши, що функція $\Phi(q)$ має полюс у точці $q = 0$, отримаємо:

$$V_{13} = \frac{A_4}{A_3} + \frac{2A_2}{\pi}\int_0^\infty \frac{e^{-x^2 t}dx}{x^2A_2^2+(A_3-A_1x^2)^2}. \quad (2.60)$$

Як легко побачити, інтеграл при $t \to \infty$ прагне до нуля. Дійсно:

$$\int_0^\infty \frac{e^{-x^2 t}dx}{x^2A_2^2+(A_3-A_1x^2)^2} = \frac{1}{\sqrt{t}}\int_0^\infty \frac{e^{-y^2 t}dx}{\frac{B^2y^2}{t}+\left(A_3-\frac{A_1y^2}{t}\right)^2} \approx$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{tA_3}}\int_0^\infty e^{-y^2}dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2A_3\sqrt{t}}. \quad (2.61)$$

З (2.70) та (2.71) витікає, що режим протікання дискретної фази, що встановився (межа V_{13} при $t \to \infty$) характеризуються компонентною швидкості V_{13}

$$V_{13} = \frac{A_4}{A_3} = V_0 - \frac{2\overline{\rho_1}(1-\delta)^2 ag(cos\,\alpha_1\,cos\,\alpha_2-\delta)}{\overline{\rho}\left(1{,}75V_0+\frac{75\nu\delta}{a}\right)}. \quad (2.62)$$

Використавши (2.62), можна визначити критичну швидкість V_k повітряного потоку, а саме те значення V_0, при якому $V_{13} = 0$. Дійсно, з (2.62) маємо:

$$V_0F - g(\delta - cos\,\alpha_1\,cos\,\alpha_2) = 0. \quad (2.63)$$

Підставивши (2.37) у (2.63), одержимо рівняння відносно V_0:

$$V_k^2 + \frac{\nu\delta 75}{a1{,}75} V_k + \frac{2g\overline{\rho_1}(1-\delta)^2 a}{1{,}75\overline{\rho}} (cos\,\alpha_1\, cos\,\alpha_2 - \delta) = 0, \qquad (2.64)$$

де: δ – радіус і об'ємна концентрація частинок дискретної фази; α_1 і α_2 – кути нахилу робочої поверхні до площини горизонту.

Як вказано вище, ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості ν визначається з рівняння (2.34). Його величина також залежить від амплітуди і частоти вібраційних коливань робочої поверхні ПСС.

З (2.64) визначимо критичну швидкість повітряного потоку:

$$V_k = \frac{4g\overline{\rho_1}a^2(1-\delta)^2(cos\,\alpha_1\, cos_2 - \delta)}{75\overline{\rho}\nu\delta\left(1 + \sqrt{1 + \frac{2{,}5\cdot 10^{-3} g\overline{\rho_1}(1-\delta)^2 a^3}{\overline{\rho}\nu^2\delta^2 5625}}\right)} \approx$$

$$\approx \frac{2g\overline{\rho_1}a^2(1-\delta)^2(cos\,\alpha_1\, cos_2 - \delta)}{75\overline{\rho}\nu\delta}. \qquad (2.65)$$

Таким чином, при швидкості повітряного потоку $V_0 > V_k$ відбувається відносний рух дискретної фази. Як видно з (2.62), компонента швидкості V_{13} частинок дискретної фази складним чином залежить від швидкості повітряного потоку; об'ємної концентрації частинок дискретної фази; кінематичного режиму вібраційних коливань робочої поверхні, що враховується через ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази.

Як видно з (2.62), величина V_{13} менше середнього значення швидкості повітряного потоку.

Розглянемо рівняння (2.38) і (2.39) відносно компонент швидкості V_{11} іV_{12} дискретної фази, що характеризує рух в площині, паралельній робочій поверхні. Розв'язок цих рівнянь можна отримати за допомогою перетворення Лапласса за часом. Оскільки алгоритм побудови розв'язку рівнянь (2.38) і

(2.39) аналогічні, то достатньо розглянути одне із цих рівнянь, наприклад, рівняння (2.38).

Використавши до рівняння (2.38) перетворення Лапласса, після ряду перетворень отримаємо:

$$V_1 \frac{d^2\overline{V_{11}}}{dx_3^2} - \left[F + \left(\frac{\overline{\rho}}{\rho_1} 0{,}5 + 1\right) g + \frac{9\overline{\rho}\sqrt{\nu q}}{2a\overline{\rho}_1}\right] \overline{V_{11}} = -\frac{f_1}{q\rho_1}, \tag{2.66}$$

де: $\overline{V_{11}}$ – перетворення Лапласса.

Як наведено у [100] і (2.9), у випадку малих концентрацій частинок дискретної фази компоненти динамічної в'язкості дискретної і неперервної фаз пов'язані співвідношенням

$$\mu_1 \approx \frac{\rho_1}{\rho}\mu \tag{2.67}$$

і, відповідно: $\nu_1 \approx \nu$.

Тому в подальшому замінимо ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості дискретної фази на аналогічну величину неперервної фази.

Загальне рівняння (2.33) набуває вигляду:

$$\overline{V_{11}} = B_1 e^{\lambda(h-x_3)} + B_2 e^{-\lambda(h-x_3)} + B_3. \tag{2.68}$$

Тут: B_1 і B_2 – довільні константи, а:

$$\lambda = \sqrt{D_1 q + D_2\sqrt{q} + D_3}, \quad D_1 = \frac{1 + 0{,}5\overline{\rho}/\overline{\rho_1}}{\nu},$$
$$D_2 = \frac{9\overline{\rho}}{2a\overline{\rho_1}\sqrt{\nu}}, \quad D_3 = \frac{F}{\nu}, \quad B_3 = -\frac{g\sin\alpha_1}{q\nu(D_1 q + D_2\sqrt{q} + D_3)}. \tag{2.69}$$

Для визначення констант B_1 і B_2 скористаємось граничними умовами (2.46), (2.52).

З (2.46) одержимо:

$$B_1 = B_2. \tag{2.70}$$

Надалі, підставивши (2.68) у (2.51) і враховуючи (2.70), маємо:

$$B_2 = B_1 = \frac{fg\delta e^{-\lambda h}}{h\nu\lambda\left(e^{2\lambda h}-1\right)}, \tag{2.71}$$

де: h – середня товщина шару НМ; f – коефіцієнт тертя ковзання для робочої поверхні.

Підставивши (2.71) у (2.68), одержимо наступні вирази для перетворення Лапласса для компоненти швидкості $\overline{V_{11}}$:

$$\overline{V_{11}} = \frac{fg\delta}{h\nu\lambda\left(e^{-\lambda h}-1\right)}\left(e^{-\lambda x_3} + e^{-\lambda(2h-x_3)}\right) - \frac{g\sin\alpha_1}{q\nu(D_1 q+D_2\sqrt{q}+D_3)}. \tag{2.72}$$

За аналогією знаходимо розв’язок рівняння (2.39) для компоненти V_{12}. Опустивши проміжні перетворення, наведемо кінцевий результат :

$$\overline{V_{12}} = \frac{fg\delta}{h\nu\lambda\left(e^{-2\lambda h}-1\right)}\left(e^{-\lambda x_3} + e^{-\lambda(2h-x_3)}\right) - \frac{g\sin\alpha_2\cos\alpha_1}{q\nu(D_1 q+D_2\sqrt{q}+D_3)}. \tag{2.73}$$

Використавши до (2.72) і (2.73) зворотне перетворення Лапласса і використавши метод віднімання [16], отримаємо:

$$V_{11} = -\frac{2g\,sin\,\alpha_1\,(1-\delta)^2 a\overline{\rho_1}}{\left(1{,}75V_0 + \frac{75\nu\delta}{a}\right)\overline{\rho}} - \frac{2D_2 g\,sin\,\alpha_1}{\pi\nu}\int_0^\infty \frac{e^{-y^2 t}dy}{(D_3 - D_1 y^2)^2 + D_2^2 y^2} + \\ + \frac{fg\delta}{h\nu\pi}\int_0^\infty e^{-yt}\,Im\,F\,(y)dy, \qquad (2.74)$$

$$V_{12} = -\frac{2g\,sin\,\alpha_2\,cos\,\alpha_1\,(1-\delta)^2 a\overline{\rho_1}}{\left(1{,}75V_0 + \frac{75\nu\delta}{a}\right)\overline{\rho}} \\ - \frac{2D_2 g\,sin\,\alpha_2\,cos\,\alpha_1}{\pi\nu}\int_0^\infty \frac{e^{-y^2 t}dy}{(D_3 - D_1 y^2)^2 + D_2^2 y^2} + \\ + \frac{fg\delta}{h\nu\pi}\int_0^\infty e^{-yt}\,Im\,F\,(y)dy. \qquad (2.75)$$

Величини $D_1,\ D_2,\ D_3$ визначаються за формулою (2.69).

Як видно, інтеграли у (2.74) і (2.75) прагнуть до нуля, у випадку коли $t \to \infty$. Таким чином, для режиму руху, що встановився, частинок дискретної фази, маємо такі значення компоненти швидкості V_{11} і V_{12}:

$$V_{11} = -\frac{2g\,sin\,\alpha_1(1-\delta)^2 a\overline{\rho_1}}{\left(1{,}75V_0+\frac{75\nu\delta}{a}\right)\overline{\rho}}, \qquad (2.76)$$

$$V_{12} = -\frac{2g\,sin\,\alpha_2\,cos\,\alpha_1(1-\delta)^2 a\overline{\rho_1}}{\left(1{,}75V_0+\frac{75\nu\delta}{a}\right)\overline{\rho}}. \qquad (2.77)$$

Таким чином розроблено одномірну гідродинамічну модель, яка описує рух НМ на робочій поверхні пневмосортувального столу, що виконує гармонічні коливання, а саме, для руху НМ, що встановився, одержані аналітичні вирази для компоненти швидкості і визначено критичну швидкість повітряного потоку.

2.3.2. Багатомірні гідродинамічні моделі руху насіннєвого матеріалу

При побудові багатовимірних математичних моделей будемо вважати, що під дією повітряного потоку і коливань опорної поверхні, відбулось розшарування псевдорозрідженого НМ за висотою (вздовж осі, яку направлено перпендикулярно робочій поверхні). В результаті утворено N – шарів, що складаються з частинок частинок, які мають різну власну густину, аерогравітаційні та гідродинамічні властивості. Рух кожного шару частинок розглядаємо, як рух суцільних середовищ, а взаємодію цих середовищ моделюємо граничними умовами на кордонах розділу шарів. Таким чином, у відповідності до основної концепції механіки багатофазних середовищ, рух розшарованого за висотою псевдорозрідженого шару будемо моделювати як рух $N+1$ - фазної системи, що утворюється із N шарів частинок дискретних фаз і однієї неперервної фази – газоподібного середовища (повітря).

Приймемо x_1, x_2 і x_3 – Декартові координати. Причому площина x_1, x_2 співпадає з площиною опорної поверхні, а вісь x_3 перпендикулярна до неї і направлена вгору. Вісь x_1 нахилено під кутом α до горизонтальної площини, а вісь x_2 паралельна до неї. В подальшому, не обмежуючи узагальнення, будемо розглядати рух $N+1$ - фазної системи вздовж осі x_1 і припустимо, що всі величини, які характеризують такий рух не залежать від координати x_2.

Введемо приведену густину частинок n - го шару ρ_n і середню густину частинок $\overline{\rho_n}$, що утворюють n -у дискретну фазу. В такому випадку:

$$\rho_n = \delta_n \overline{\rho_n}, \tag{2.78}$$

де: δ_n – об’ємна доля частинок n -ої дискретної фази.

Позначивши ρ як приведену густину неперервної фази, $\overline{\rho}$ середню густину газоподібного середовища, яке утворює цю фазу, відповідно [175], одержимо:

$$\rho = \overline{\rho}\left(1 - \sum_{n=1}^{N} \frac{\rho_n}{\overline{\rho_n}}\right) = \overline{\rho}(1 - \sum_{n=1}^{N} \delta_n). \tag{2.79}$$

Надалі будемо вважати, що середня товщина n -го шару частинок – $h_n, \quad n = 1,2,\ldots,N.$

Значення індексу $n = 1$ відповідає нижньому елементарному шару, який розташовано на робочій поверхні, а $n = N$– верхньому. Таким чином, середня товщина псевдорозрідженого шару частинок:

$$h = \sum_{n=1}^{N} h_n. \tag{2.80}$$

Відповідно до рівнянь (2.8) і (2.10), рівняння руху частинок n -го шару, $\overline{h_{n-1}} < x_3 < \overline{h_n}, \quad n = 1,2,\ldots,N, \overline{h_n} = \sum_{P=1}^{n} h_n\,, \quad \overline{h_0} = 0,$ можна навести:

$$\begin{aligned}\rho_n\left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial t} + (\nabla, \vec{V}_{ni})V_{ni}\right) - \frac{\partial P_n}{\partial x_i} + \mu_n \Delta V_{ni} \\ + 0{,}5\frac{\overline{\rho}\rho_n}{\overline{\rho_n}}\left[\frac{\partial}{\partial}(V_i - V_{ni}) + (\nabla, \vec{V} - \vec{V}_n)(V_i - V_{ni})\right] + \\ + \frac{9\overline{\rho}\rho_n\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\overline{\rho_n}}\int_0^t \left[\frac{\partial}{\partial\tau}(V_i - V_{ni}) + (\nabla, \vec{V} - \vec{V}_n)(V_i - V_{ni})\right] \times (t-\tau)^{-1/2} d\tau + \\ \rho_n F_n(V_i - V_{ni}) + \rho_n f_{ni},\end{aligned} \tag{2.81}$$

$$div\vec{V}_n = 0, \quad n = 1,2,\ldots,N, \quad i = 1,2,3. \tag{2.82}$$

Тут $\vec{V}_n = (V_{n1}, V_{n2}, V_{n3})$ та $\vec{V} = (V_1, V_2, V_3)$ – швидкість частинок n -ої дискретної фази і швидкість неперервної фази; P_n – тиск у n -ому шарі;

μ_n – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості n -ої дискретної фази; ν – ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази; a_n – еквівалентний середній радіус за об'ємом частинок n -ої дискретної фази; f_{ni} – i -та компонента масової сили, що діє на частинки n -ої дискретної фази (у якості, якої обрано силу тяжіння); F_n – коефіцієнт, що характеризує взаємодію неперервної фази з частинками n -ої дискретної фази, яку можна навести наступним чином:

$$F_n = \frac{\overline{\rho}}{2\overline{\rho_n}(1-\delta_n)^2 a_n}\left(1{,}75V_{0n} + \frac{75\nu\delta_n}{a_n}\right), \tag{2.83}$$

де: V_{0n} – середня швидкість повітряного потоку за верхньою межею $(x_3 = \sum_{P=1}^{n} h_P)$ n -го шару.

Одночасно з рівняннями (2.81) і (2.82) слід розглядати рівняння руху неперервної фази. Ці рівняння у лінійному наближенні можна навести наступним чином для n -го шару:

$$\rho\frac{\partial V_i}{\partial t} = -(1-\delta)\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu\Delta V_i - \frac{0{,}5\overline{\rho}\rho_n}{\overline{\rho}_n}\frac{\partial}{\partial t}(V_i - V_{ni}) -$$

$$-\frac{9\overline{\rho}\rho_n\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}\overline{\rho}_n a_n}\int_0^t \frac{\partial}{\partial\tau}(V_i - V_{ni})(t-\tau)^{-1/2}d\tau - \rho_n F_n(V_i - V_{ni}) + \rho f_i, \tag{2.84}$$

$$div\vec{V} = 0, \tag{2.85}$$

$$\delta = \sum_{n=1}^{N}\delta_n, \quad n = 1{,}2,\ldots,N, \quad i = 1{,}2{,}3,$$

де: P – тиск; μ – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості неперервної фази; f_i – i -та компонента сили тяжіння.

Окрім рівнянь (2.81) – (2.85), швидкості $\vec{V}_n, \vec{V}$ та тиски P_n і P повинні задовольняти початковим та граничним умовам. Для початкових умов, не враховуючи узагальнення, будемо вважати, що в момент часу $t = 0$, поля швидкостей та надлишкові тиски P_n і P дорівнюють нулю:

$$\vec{V}_n\big|_{t=0} = \vec{V}\big|_{t=0} = 0, \quad P_n|_{t=0} = P|_{t=0} = 0, \quad n = 1,2,\dots,N. \tag{2.86}$$

Для того, щоб сформувати граничні умови, введемо тензори напружень для n -ої дискретної фази [11]:

$$\sigma_{ij}^n = -P_n\delta_{ij} + 2\mu_n e_{ij}^n, \quad n = 1,2,\dots,N \ , \tag{2.87}$$

де:

$$e_{ij}^n = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i}\right). \tag{2.88}$$

Граничні умови на межі розподілу дискретних фаз знаходяться у неперервній швидкості і неперервності напружень. Таким чином, на межі розподілу n -ой і $n+1$-ої дискретних фаз повинні бути неперервні швидкості:

$$\vec{V}_n\big|_{x_3=\overline{h_n}} = \vec{V}_{n+1}\big|_{x_3=\overline{h}_n}, \tag{2.89}$$

де:

$$\overline{h_n} = \sum_{n=1}^{n} h_n\,, \quad n = 1,2,\dots,N.$$

Крім того, на цих границях розділення фаз повинні бути неперервні дотичні і нормальні тензори напружень дискретних фаз :

$$\mu_n e_{ij}^n t_i n_j\big|_{x_3=\overline{h}n} = \mu_{n+1} e_{ij}^{n+1} t_i n_j\big|_{x_3=\overline{h}n}, \tag{2.90}$$

$$\left(P_n - 2\mu_n e_{ij}^n t_i n_j n\right)\big|_{x_3=\overline{h}n} = \left(P_{n+1} - 2\mu_{n+1} e_{ij}^{n+1} t_i n_j n_j\right)\big|_{x_3=\overline{h}n},$$
$$n = 1, \ldots, N-1. \tag{2.91}$$

У (2.90), (2.91) за індексами, що повторюються, маємо на увазі додавання, а через n_i і t_i позначено компоненти одиничних векторів нормальних і дотичних складових до границі розподілу фаз. Разом з тим, враховуючи (2.88) і (2.89), слід окремо сформулювати граничні умови на вільній межі $(x_3 = h)$ і робочій поверхні $(x_3 = 0)$. На вільній межі тензор напружень повинен прагнути до нуля, якщо знехтувати тиском газоподібного середовища над поверхнею псевдорозрідженого шару частинок. На робочій поверхні повинна бути рівність дотичних напружень дискретної фази, силі опору поверхні на одиницю площі.

Окрім вже сформульованих граничних умов для полів швидкостей і тензорів напружень дискретних фаз, слід вказати, яким умовам повинно задовольняти поле швидкості неперервної фази. Будемо вважати, що тензор напружень неперервної фази дорівнює нулю на вільній поверхні псевдорозрідженого шару частинок $(x_3 = h)$. Дотичні компоненти швидкості на робочій поверхні $(x_3 = 0)$ повинні прагнути до нуля, а нормальна компонента швидкості повинна співпадати з середньою швидкістю повітряного потоку біля робочої поверхні.

Таким чином, базуючись на вищенаведеному, слід відмітити, що задача математичного моделювання пошарового руху псевдорозрідженого шару частинок складається з побудови та розв’язку системи інтегро-диференційних рівнянь (2.81) – (2.84), які задовольняють початковим (2.85) і граничним умовам (2.88) – (2.90).

Розв’язок цієї задачі можливий на основі чисельних методів з використанням ПК. Однак, при додаткових припущеннях про процес пошарового руху псевдорозрідженого шару частинок можливе отримання розв’язку у аналітичній формі, при якій використання ПК необхідно лише на стадії аналізу функціональних залежностей полів швидкостей дискретних фаз від різних фізико-механічних властивостей частинок, з яких складається псевдорозріджений шар і кінематичних параметрів вібраційних коливань робочої поверхні.

Вважаємо, що рух дискретних фаз $N+1$ - фазної системи, що моделює шар частинок, відбувається, в основному, у площинах, які паралельні робочій поверхні. Відповідно, компоненти швидкості n -ої дискретної фази вздовж осі x_3 можна знехтувати. Крім того, вважаємо, що величини, які характеризують рух, не залежать від координати x_2, тому компонента швидкості вздовж цієї осі дорівнює нулю. З рівняння нерозривності (2.82) маємо:

$$\frac{\partial V_{n1}}{\partial x_1} = 0, \quad n = 1,\ 2,\ \ldots,\ N. \tag{2.92}$$

Таким чином, швидкість n -ої дискретної фази має природню компоненту V_{n1}, що залежить тільки від часової змінної та координати x_3. У такому випадку рівняння (2.81) і (2.83) спрощуються та набудуть вигляду:

$$\rho_n \frac{\partial V_{n1}}{\partial t} = 0{,}5\frac{\rho_n\overline{\rho}}{\overline{\rho}_n}\frac{\partial}{\partial t}(V_1 - V_{n1}) + \frac{9\overline{\rho}\rho_n\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\overline{\rho}_n}\int_0^t \frac{\partial}{\partial \tau}(V_1 - V_{n1})(t-\tau)^{-1/2}d\tau + \\ +\rho_n F_n(V_1 - V_{n1}) + \mu_n\frac{\partial^2 V_{n1}}{\partial x_3^2} + \rho_n f_{n1}, \tag{2.93}$$

$$O = -\frac{\partial P_n}{\partial x_3} + 0{,}5\frac{\rho_n\overline{\rho}}{\overline{\rho}_n}\frac{\partial V_3}{\partial t} + \rho_n F_n V_3 + \frac{9\overline{\rho}\rho_n}{2\sqrt{\pi}a_n\overline{\rho}_n}\int_0^t \frac{\partial V_3}{\partial \tau}(t-\tau)^{-1/2}d\tau + \\ +\rho_n f_{n3}, \tag{2.94}$$

$$\rho\frac{\partial V_1}{\partial t}=\mu\frac{\partial^2 V_1}{\partial x_3^2}-0{,}5\frac{\overline{\rho}\rho_n}{\overline{\rho}_n}\frac{\partial}{\partial t}(V_1-V_{n1})$$
$$-\frac{9\overline{\rho}\rho_n\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\overline{\rho}_n}\int_0^t\frac{\partial}{\partial\tau}(V_1-V_{n1})(t-\tau)^{-1/2}d\tau-$$
$$-\rho_n F_n(V_1-V_{n1})+\rho f_1, \qquad (2.95)$$

$$\rho\frac{\partial V_3}{\partial t}=-(1-\delta)\frac{\partial P}{\partial x_3}-0{,}5\frac{\overline{\rho}\rho_n}{\overline{\rho}_n}\frac{\partial}{\partial t}V_3-\frac{9\overline{\rho}\rho_n\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\overline{\rho}_n}\int_0^t\frac{\partial V_3}{\partial\tau}(t-\tau)^{-1/2}d\tau-$$
$$-\rho_n F_n V_3+\rho f_3. \qquad (2.96)$$

Тут компоненти масових сил $\overleftarrow{f_n}$ і $\overleftarrow{f}$:

$$f_{n1}=f_1=g\,sin\,\alpha_1\,,\quad f_{n2}=f_2=0,\quad f_3=f_{n3}=-g\,cos\,\alpha_2, \qquad (2.97)$$

де: α – кут нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини; g – прискорення вільного падіння.

При одержанні (2.95) та (2.96) були використані рівняння нерозривності для неперервної фази, з яких видно, що компонента швидкості V_3 не залежить від координати x_3. Крім того, ефективні коефіцієнти динамічної в’язкості для дискретної і неперервної фаз μ_1 і μ визначаються з рівняння (2.34) і, тим самим, залежать від амплітуди і частоти коливань робочої поверхні.

Таким чином, рівняння (2.92) – (2.96) є базою для побудови механіко-математичної моделі пошарового руху шару частинок по повітропроникній робочій поверхні, що коливається.

Рівняння (2.92) – (2.96) є не стаціонарною системою інтегро-диференційних рівнянь, розв'язок яких буде виконуватись за допомогою перетворення Лапласса за часовою перемінною [48, 69]. На початку розглянемо випадок встановленого пошарового руху шару частинок. Для цього випадку система рівнянь (2.92) – (2.95) спрощується та набуває вигляду:

$$\mu_n \frac{\partial^2 V_{n1}}{\partial x_3^2} + \rho_n F_n (V_1 - V_{n1}) + \rho_n \overline{f_1} = 0, \tag{2.98}$$

$$\frac{\partial P_n}{\partial x_3} - \rho_n \overline{f_2} - \rho_n F_n V_3 = 0, \tag{2.99}$$

$$\mu \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_3^2} - \rho_n F_n (V_1 - V_{n1}) + \rho \overline{f_1} = 0, \tag{2.100}$$

$$(1 - \delta) \frac{\partial P}{\partial x_3} + \rho_n F_n V_3 - \rho \overline{f_2} = 0, \quad n = 1,2,\dots,N, \tag{2.101}$$

де: $\overline{f_1} = g \sin \alpha$, $\overline{f_2} = -g \cos \alpha$.

Розв'язок цієї системи рівнянь одержимо у аналітичному вигляді. Для цього додаємо рівняння (2.98) та (2.100). Після низки перетворень:

$$\frac{\partial}{\partial x_3} \overline{P_n} + (\rho + \rho_n) g \cos \alpha = 0, \tag{2.102}$$

де: $\overline{P_n} = P_n + (1 - \delta) P$.

З (2.69) одержимо:

$$\overline{P_n} = -(\rho + \rho_n) g \cos\alpha \, x_3 + D_n, \quad n = 1,2,\ldots,N, \tag{2.103}$$

де: D_n – постійні, які необхідно знайти.

Для цього слід скористатись граничними умовами, які повинні задовольняти надлишковим тискам P і P_n неперервної та дискретної фаз. На вільній поверхні псевдорозрідженого шару P і P_n повинні прагнути до нуля. Тоді з (2.103) одержимо:

$$\overline{P_N} = (\rho + \rho_N) g \sin\alpha \, (h - x_3), \tag{2.104}$$

і, відповідно $D_N = h(\rho + \rho_N) g \cos\alpha$.

Для визначення констант D_n з $n \neq N$, скористаємось умовою неперервності тисків P_n на границях розподілу дискретних фаз. В результаті одержимо наступну рекурентну формулу для визначення констант D_n, $n = 1,2,\ldots,N$:

$$D_n = g \sin\alpha \, \overline{h}_n(\rho_{n+1} - \rho_n) + D_{n+1}, \quad n = N-1,\ N-2,\ \ldots,\ 1,$$

$$D_N = -h(\rho + \rho_N) g \sin\alpha, \tag{2.105}$$

де: $\overline{h}_n = \sum_{P=1}^{n} h_P$, h_P – середнє значення товщини шарів, що утворюють дискретні фази.

Легко можна побачити, що за допомогою формули (2.105) можливо послідовно, маючи коефіцієнт D_N, визначити всі наступні коефіцієнти $D_{N-1},\ D_{N-2},\ \ldots,\ D_1$.

Так, наприклад:

$$D_{N-1} = g\,sin\,\alpha\,\overline{h_{N-1}}(\rho_N - \rho_{N-1}) + D_N,$$
$$D_{N-2} = g\,sin\,\alpha\left(\overline{h_{N-1}}\rho_N - \rho_{N-1}h_{N-1} - \overline{h_{N-2}}\rho_{N-2}\right) + D_N.$$

Надалі, з рівнянь нерозривності для неперервної фази, компонента швидкості V_3не залежить від координати x_3. Тому, з граничних умов на робочій поверхні, одержимо:

$$V_3 = V_0,$$

де: V_0 – середня швидкість повітряного потоку в межах робочої поверхні.

Розглянемо рівняння (2.97) та (2.99) відносно компонент швидкостей V_{n1} і V_1:

$$\begin{cases} \mu_n \frac{\partial^2 V_{n1}}{\partial x_3^2} - a_n V_{n1} + a_n V_1 = -\rho_n g\,sin\,\alpha\,, \\ \mu \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_3^2} - a_n V_1 + a_n V_{n1} = -\rho g\,sin\,\alpha\,, \end{cases} \tag{2.106}$$

де: $a_n = \rho_n F_n$.

Загальний розв’язок системи (2.106) є суперпозицією окремого розв’язку та загального рішення однорідної системи, що відповідає (2.106).

Розв’язок однорідної системи рівнянь будемо шукати у вигляді:

$$V_{n1} = Ae^{\gamma x_3}, \quad V_1 = Be^{\gamma x_3}. \tag{2.107}$$

Підставивши (2.107) у (2.106), де праві частини дорівнюють нулю, після низки перетворень, одержимо:

$$\gamma_n = \pm\sqrt{\frac{a_n(\mu_n+\mu)}{\mu_n\mu}} = \pm\sqrt{\frac{\rho_n F_n(\mu_n+\mu)}{\mu_n\mu}}, \tag{2.108}$$

$$A = \rho_n F_n, \quad B = (\rho_n F_n - \mu_n\gamma^2) = -\frac{\rho_n F_n \mu_n}{\mu}. \tag{2.109}$$

Таким чином, загальне рівняння однорідної системи рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{aligned} V_{n1} &= \rho_n F_n\left(A_n e^{\gamma_n x_3} + B_n e^{-\gamma_n x_3}\right), \\ V_1 &= -\frac{\rho_n F_n \mu_n}{\mu}\left(A_n e^{\gamma_n x_3} + B_n e^{-\gamma_n x_3}\right). \end{aligned}, \tag{2.110}$$

тут: $A_n,\ B_n$ – довільні константи, що потребують визначення.

Окремий розв’язок системи рівнянь (2.106) будемо шукати у:

$$V_1 = A_{n1}x_3^2, \quad V_{1n} = B_{n1}x_3^2 + C_{n1}. \tag{2.111}$$

Підставимо (2.111) у (2.106) та визначимо константи $A_{n1},\ B_{n1},\ C_{n1}$:

$$A_{n1} = B_{n1} = -\frac{g\sin\alpha(\rho_n+\rho)}{2(\mu_n+\mu)}, \quad C_{n1} = \frac{g\sin\alpha(\mu_n\rho+\mu\rho_n)}{\rho_n F_n(\mu_n+\mu)}. \tag{2.112}$$

Таким чином, використавши (2.99) та (2.110), загальний розв’язок системи рівнянь (2.96) можна навести у формі:

$$V_{n1} = \rho_n F_n(A_n e^{\gamma_n x_3} + B_n e^{-\gamma_n x_3}) - \frac{g\sin\alpha\,(\rho_n+\rho)}{2(\mu_n+\mu)}x_3^2 + \\ + \frac{g\sin\alpha(\mu_n\rho+\mu\rho_n)}{\rho_n F_n(\mu_n+\mu)}, \tag{2.113}$$

$$V_1 = -\frac{\rho_n F_n \mu_n}{\mu}\left(A_n e^{\gamma_n x_3} + B_n e^{-\gamma_n x_3}\right) - \frac{g \sin\alpha(\rho_n+\rho)}{2(\mu_n+\mu)} x_3^2. \qquad (2.114)$$

Константи, що невідомі, A_n, B_n визначаються з граничних умов на межах розподілу дискретних фаз та на вільній поверхні псевдорозрідженого шару і робочої поверхні.

На робочій поверхні $x_3 = 0$ дотична компонента V_1 швидкості неперервної фази повинна прагнути до нуля. Тоді з (2.80) маємо:

$$A_1 = -B_1\ . \qquad (2.115)$$

Для дотичної компоненти швидкості V_{11} дискретної фази, яка розташована на робочій поверхні, повинна задовольняти умовам рівності дотичних напружень опору робочої поверхні.

Підставивши (2.79) при значеннях індексу $n = 1$ у (2.18) одержимо:

$$\mu_1 \rho_1 F_1 \gamma_1 (A_1 - B_1) = f|P_1|\big|_{x_3=0}, \qquad (2.116)$$

де: P_1 – надлишковий тиск дискретної фази.

Величину P_1 можна визначити за формулою:

$$P_1 \equiv \frac{g\rho_1 V_1}{S}. \qquad (2.117)$$

Тут: V_1 – об'єм, що займають частинки дискретної фази; S – площа робочої поверхні. З (2.114) – (2.116) одержимо:

$$A_1 = -B_1 = \frac{f g h_1}{2\mu_1 F_1 \gamma_1}, \qquad (2.118)$$

де: h_1 – середня товщина шару частинок, що розташовані на робочій поверхні; f – коефіцієнти тертя ковзання.

Для того, щоб визначити A_n і B_n при $n \neq 1$ визначимо граничні умови на n -ій границі розподілу дискретних фаз, при: $x_3 = \overline{h_n} = \sum_{P=1}^{n} h_P$

$$\rho_n F_n \left(A_n e^{\gamma_n \overline{h_n}} + B_n e^{-\gamma_n \overline{h_n}}\right) + f_n^1 = \rho_{n+1} F_{n+1} \left(A_{n+1} e^{\gamma_{n+1} \overline{h_n}} + B_{n+1} e^{-\gamma_{n+1} \overline{h_n}}\right),$$

$$\mu_n \rho_n F_n \gamma_n \left(A_n e^{\gamma_n \overline{h_n}} - B_n e^{-\gamma_n \overline{h_n}}\right) + f_n^2 = \rho_{n+1} F_{n+1} \gamma_{n+1} \left(A_{n+1} e^{\gamma_{n+1} \overline{h_n}} - B_{n+1} e^{-\gamma_{n+1} \overline{h_n}}\right). \quad (2.119)$$

Тут:

$$f_n^1 = -\frac{g \sin \alpha}{2} \overline{h_n^2} \left(\frac{\rho_n + \rho}{\mu_n + \mu} - \frac{\rho_{n+1} + \rho}{\mu_{n+1} + \mu}\right) +$$

$$+ g \sin \alpha \left(\frac{\mu_n \rho - \mu \rho_n}{\rho_n F_n (\mu_n + \mu)} - \frac{\mu_{n+1} \rho - \mu \rho_{n+1}}{\rho_{n+1} F_{n+1} (\mu_{n+1} + \mu)}\right),$$

$$f_n^2 = -g \sin \alpha \, \overline{h_n} \left(\frac{\mu_n (\rho_n + \rho)}{\mu_n + \mu} - \frac{\mu_{n+1} (\rho_{n+1} + \rho)}{\mu_{n+1} + \mu}\right).$$

Підставимо (2.118) у матричній формі. Для цього введемо матриці та вектор-стовбці:

$$\overline{A_n} = \rho_n F_n \begin{Vmatrix} e^{\gamma_n \overline{h_n}}, & e^{-\gamma_n \overline{h_n}} \\ \mu_n \gamma_n e^{\gamma_n \overline{h_n}}, & -\mu_n \gamma_n e^{-\gamma_n \overline{h_n}} \end{Vmatrix},$$

$$X_n = \begin{Vmatrix} A_n \\ B_n \end{Vmatrix}, \quad f_n = \begin{Vmatrix} f_n^1 \\ B_n^2 \end{Vmatrix}, \quad n = 1,2,\ldots,N. \quad (2.120)$$

За допомогою (2.119) з (2.118) одержимо:

$$\overline{A_n} X_n + f_n = \overline{A_{n+1}} X_{n+1}. \quad (2.121)$$

З (2.120) одержимо:

$$X_{n+1} = \overline{A}_{n+1}^{-1}\overline{A}_n X_n + \overline{A}_{n+1}^{-1} f_n, \quad n = 1,2,\dots,N-1, \tag{2.122}$$

де: $\overline{A}_{n+1}^{-1}$ – матриця, зворотна до матриці $\overline{A}_{n+1}$.

З (2.121) маємо:

$$X_n = \overline{A}_n^{-1} A_1 X_1 + \overline{A}_n^{-1}\left(\sum_{P=1}^{n-1} f_P\right), \quad n = 1,2,\dots,N. \tag{2.123}$$

Формула (2.122) дозволяє визначити невідомі константи A_n, B_n, $n = 1,2,\dots,N$.

Дійсно, матриця $\overline{A}_n^{-1}$ легко визначається за допомогою $\overline{A}_n$ [16]:

$$\overline{A}_n^{-1} = \frac{1}{2\mu_n\gamma_n\rho_n F_n}\begin{Vmatrix} \mu_n\gamma_n e^{-\gamma_n\overline{h_n}}, & e^{-\gamma_n\overline{h_n}} \\ \mu_n\gamma_n e^{\gamma_n\overline{h_n}}, & -e^{\gamma_n\overline{h_n}} \end{Vmatrix}. \tag{2.124}$$

Маємо:

$$\overline{A}_n^{-1}\overline{A}_1 = \frac{\rho_1 F_1}{2\mu_n\gamma_n\rho_n F_n}\begin{Vmatrix} (\mu_n\gamma_n + \mu_1\gamma_1)e^{-\gamma_n\overline{h_n}+\gamma_1\overline{h_1}}, & (\mu_n\gamma_n - \mu_1\gamma_1)e^{-\gamma_n\overline{h_n}-\gamma_1\overline{h_1}} \\ (\mu_n\gamma_n - \mu_1\gamma_1)e^{\gamma_n\overline{h_n}+\gamma_1\overline{h_1}}, & (\mu_n\gamma_n + \mu_1\gamma_1)e^{\gamma_n\overline{h_n}-\gamma_1\overline{h_1}} \end{Vmatrix}. \tag{2.125}$$

Підставивши (2.123) у (2.122) та врахувавши (2.116), після ряду перетворень, одержимо вираз для розрахунку коефіцієнтів A_n, B_n:

$$A_n = \frac{\rho_1 F_1 A_1 e^{-\gamma_n\overline{h_n}}}{\rho_n F_n}\left[sh\left(\gamma_1\overline{h_1}\right) + \frac{\mu_1\gamma_1}{\mu_n\gamma_n}ch\left(\gamma_1\overline{h_1}\right)\right] +$$
$$+ \frac{e^{-\gamma_n\overline{h_n}}}{2\mu_n\gamma_n\rho_n F_n}\sum_{P=1}^{n-1}\left(\mu_n\gamma_n f_P^1 + f_P^2\right),$$

$$B_n = \frac{\rho_1 F_1 A_1 e^{\gamma_n \overline{h_n}}}{\rho_n F_n}\left[sh\left(\gamma_1 \overline{h_1}\right) - \frac{\mu_1 \gamma_1}{\mu_n \gamma_n} ch\left(\gamma_1 \overline{h_1}\right)\right] +$$

$$+ \frac{e^{\gamma_n \overline{h_n}}}{2\mu_n \gamma_n \rho_n F_n} \sum_{P=1}^{n-1} (\mu_n \gamma_n f_P^1 - f_P^2), \qquad (2.126)$$

де: $A_1 = \frac{f g h_1}{2\mu_1 F_1 \gamma_1}$.

Використавши (2.125), з (2.112) та (2.113) маємо наступні формули для розрахунку компоненти швидкостей V_{n1} і V_1 дискретних і неперервних компонент $N+1$ - фазної системи, що моделює пошаровий рух псевдорозрідженого матеріалу

$$V_{n1} = A_n^S sh\left(\gamma_n\left(x_3 - \overline{h_n}\right)\right) + A_n^C ch\left(\gamma_n\left(x_3 - \overline{h_n}\right)\right) -$$

$$- \frac{g \sin\alpha(\rho_n + \rho)}{2(\mu_n + \mu)} x_3^2 + \frac{g \sin\alpha(\mu_n \rho - \mu \rho_n)}{\rho_n F_n (\mu_n + \mu)}, \qquad (2.127)$$

$$V_1 = -\frac{\mu_n}{\mu}\left[A_n^S sh\left(\gamma_n\left(x_3 - \overline{h_n}\right)\right) + A_n^C ch\left(\gamma_n\left(x_3 - \overline{h_n}\right)\right)\right] -$$

$$- \frac{g \sin\alpha(\rho_n + \rho)}{2(\mu_n + \mu)} x_3^2, \quad n = 1,2,\ldots,N. \qquad (2.128)$$

Тут:

$$A_n^S = \frac{f g h_1 \rho_1}{\gamma_n \mu_n} ch\left(\gamma_1 \overline{h}_1\right) + \frac{1}{\gamma_n \mu_n} \sum_{P=1}^{n-1} f_\rho^2, \qquad (2.129)$$

$$A_n^C = \frac{f g h_1 \rho_1}{\mu_1 \gamma_1} sh\left(\gamma_1 \overline{h}_1\right) + \sum_{P=1}^{n-1} f_\rho^1, \quad n = 2,3,\ldots,N,$$

$$A_1^C = 0, \quad A_1^S = 1, \qquad (2.130)$$

$$f_P^1 = -\frac{g\,sin\,\alpha\,\overline{h}_P^2}{2}\left(\frac{\rho_P+\rho}{\mu_P+\mu}-\frac{\rho_{P+1}+\rho}{\mu_{P+1}+\mu}\right)+$$
$$+g\,sin\,\alpha\left(\frac{\mu_P\rho-\mu\rho_P}{\rho_P F_P(\mu_P+\mu)}-\frac{\mu_{P+1}\rho-\mu\rho_{P+1}}{\rho_{P+1}F_{P+1}(\mu_{P+1}+\mu)}\right), \qquad (2.131)$$

$$f_P^2 = -g\,sin\,\alpha\,\overline{h_P}\left(\frac{\mu_P(\rho_P+\rho)}{\mu_P+\mu}-\frac{\mu_{P+1}(\rho_{P+1}+\rho)}{\mu_{P+1}+\mu}\right),$$
$$\gamma_n = \left(\frac{\rho_n F_n(\mu_n+\mu)}{\mu_n\mu}\right)^{1/2}, \qquad (2.132)$$

де: ρ_n, ρ – приведені густини n -ої дискретної фаз і неперервної фаз; μ_n і μ – ефективні коефіцієнти динамічної в'язкості відповідних фаз; h_n – середні товщина шару n -ого шару, $\overline{h_n} = \sum_{P=1}^{n} h_P$; α - кут нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини; g – прискорення вільного падіння.

Таким чином, формули (2.126) – (2.131) дозволяють визначити розподіл швидкостей за товщиною псевдорозрідженого матеріалу в режимі руху, що встановився. Як видно з (2.126), амплітуда коливань та швидкості частинок n -ої дискретної фази складається з двох доданків. Один доданок квадратично залежить від координати x_3 (вісь x_3, що перпендикулярна до робочої поверхні). Другий доданок має більш складну залежність від координати x_3, а саме, є суперпозицією експоненційно зростаючих та убуваючих функцій $e^{\pm\gamma_n x_3}$.

Конкуренція цих двох доданків і визначає основний характер зміни швидкостей дискретних фаз за товщиною псевдорозрідженого шару частинок. Так, наприклад, при куті нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини, близького до нуля, доданками з квадратичною залежністю від координати x_3 можна знехтувати. З іншого боку, як видно з (2.118) та (2.129), при коефіцієнті тертя f, що обумовлено робочою поверхнею, який наближається до нуля,

домінуючим доданком буде доданок з квадратичною залежністю від координати x_3. Наприкінці, при $f \to 0$ и $\alpha \to 0$ швидкості частинок дискретних фаз стають настільки малими, що ними можна знехтувати. Також слід відмітити, що доданок з квадратичною залежністю від координати x_3 залежить тільки від фізичних параметрів частинок відповідної дискретної та неперервної фаз. Другий доданок, натомість від вказаних фізичних параметрів, залежить від фізичних параметрів нижче розташованих дискретних фаз. Цей факт свідчить про достатньо складний характер процесу пошарового руху псевдорозрідженого шару частинок та його необхідно враховувати у процесі вібропневматичного розділення частинок за густиною.

2.4. Аналіз результатів механіко-математичного моделювання процесу розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння плоскими вібруючими повітропроникними робочими поверхнями

Для перевірки адекватності розробленої механіко математичної моделі було проведено теоретичні дослідження з використанням ПЕОМ.

Розроблений математичний апарат дозволяє отримати траєкторії руху шарів НМ різної густини в залежності від зміни кінематичних режимів ПСС (рис. 2.1. – 2.4).

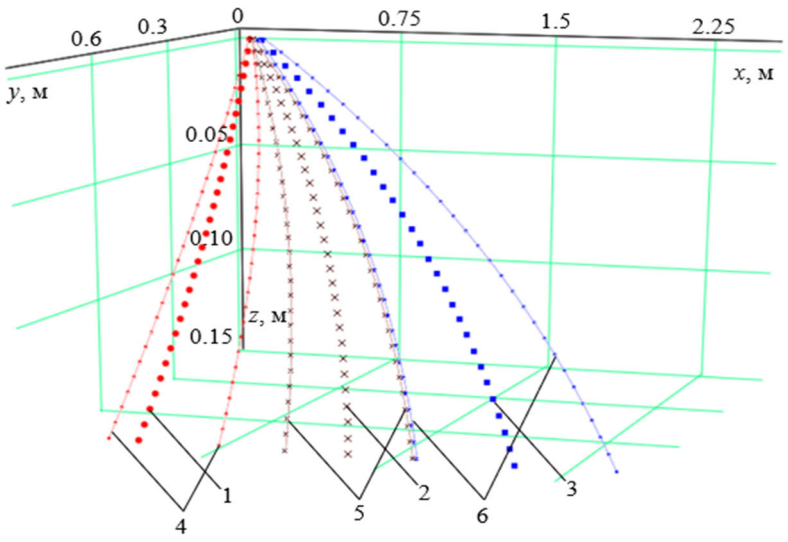


Рис. 2.1. Траєкторії руху НМ пшениці (одержані теоретичним шляхом) при використанні оптимальних режимів: 1,4 – легка фракція; 2, 5 – середня фракція; 3,6 – важка фракція

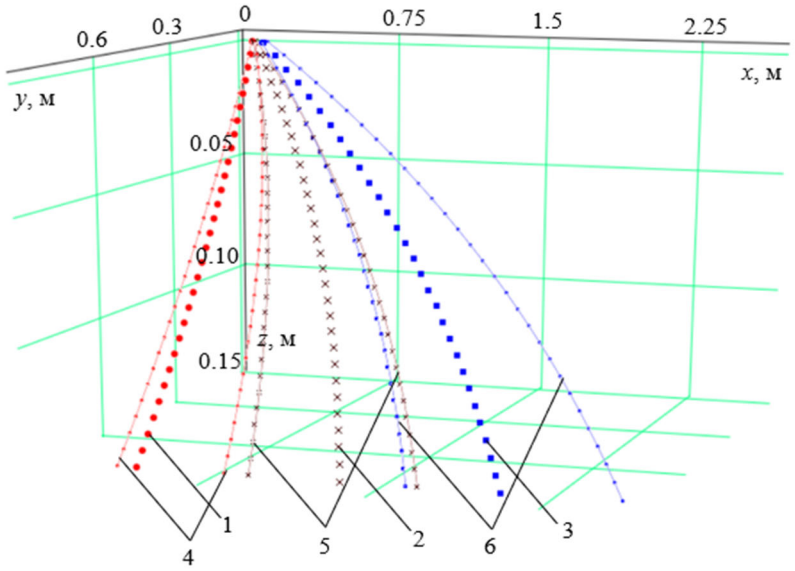


Рис. 2.2. Траєкторії руху НМ кукурудза (одержані теоретичним шляхом) при використанні оптимальних режимів: 1,4 – легка фракція; 2, 5 – середня фракція; 3,6 – важка фракція

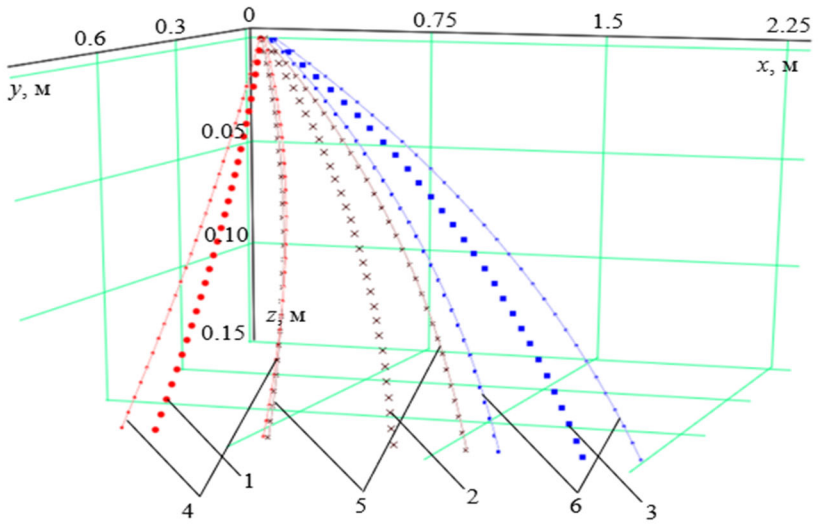


Рис. 2.3. Траєкторії руху НМ соняшнику (одержані теоретичним шляхом) при використанні оптимальних режимів: 1,4 – легка фракція; 2, 5 – середня фракція; 3,6 – важка фракція

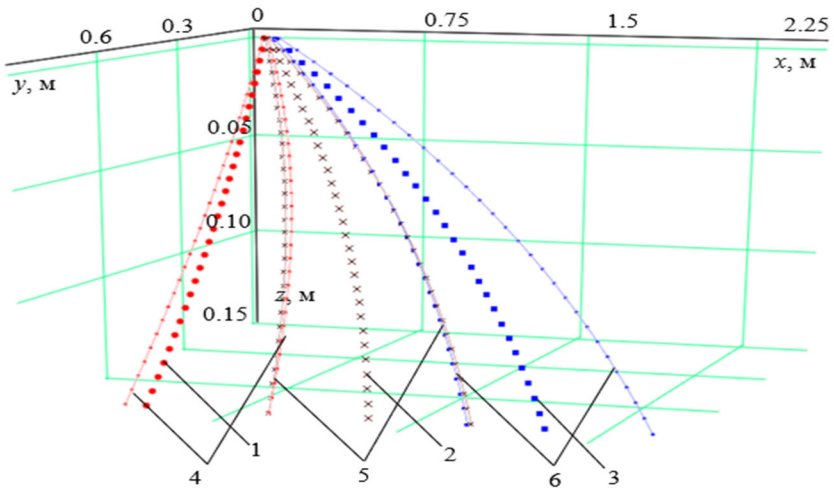


Рис. 2.4. Траєкторії руху НМ сої (одержані теоретичним шляхом) при використанні оптимальних режимів: 1,4 – легка фракція; 2, 5 – середня фракція; 3,6 – важка фракція

Аналіз траєкторій руху шарів НМ різної густини дозволяє визначити, що найбільший вплив на параметри процесу мають: повздовжній та поперечний кути нахилу робочої поверхні ПСС; амплітуда та частота коливань робочої поверхні і швидкість повітряного потоку на вході в шар НМ.

Визначено, що зі збільшенням значень повздовжнього кута нахилу робочої поверхні, НМ починає активно рухатись до вивантажувальних лотків легкої фракції.

Раціональні значення частоти та амплітуди коливань робочої поверхні знаходяться у діапазонах значень, при яких шар НМ рівномірно розподіляється по робочій поверхні ПСС.

В залежності від густин шарів частинок НМ, що обробляються, підбирається раціональна швидкість повітряного потоку на вході в нижній елементарний шар НМ. При дотриманні рівномірного розподілення повітряного напору по всій робочій поверхні ПСС, швидкість частинок нижнього елементарного шару, матиме більші показники ніж у шарів, що розташовано вище. Однак, при швидкості повітряного потоку, що перевищує 1,8 м/с, НМ переходить до «киплячого» стану, який характеризується постійним перемішуванням шарів та процес розділення припиняється.

Параметрами ПСС, які мають основной вплив на ефективність процесу розділення НМ, визначено: частота і амплітуда коливань; поздовжній і поперечний кути нахилу деки; швидкість повітряного потоку. При цьому дослідження проводились для визначеного матеріалу, а, саме: пшениці, кукурудзи, соняшника, сої.

Визначення раціональних параметрів проводилось поетапно. На першому етапі визначали діапазони раціональних частоти та амплітуди коливань деки ПСС за постійних значень поздовжнього та поперечного кутів її нахилу, а також постійної швидкості повітряного потоку. На другому етапі визначали раціональні поздовжній та поперечний кути нахилу деки за умови раціональних частоти та амплітуди її коливань і постійної швидкості повітряного потоку. На заключному етапі визначали раціональну швидкість повітряного потоку за умови вибору раціональних значень всіх інших параметрів.

У відповідності до механіко-математичної моделі, поставлено задачу з описання відносного руху фаз псевдорозрідженого НМ з урахуванням таких

параметрів, як: прискорення шару частинок дискретної фази відносно безперервної фази; миттєвий гідродинамічний опір; опір частинок дискретної фази; коефіцієнти динамічної в'язкості дискретної і неперервної фаз НМ.

Розв'язкам цієї задачі є траєкторії руху фаз із різною густиною та координата, у якій буде знаходитись частинка із визначеною густиною на виході з деки ПСС. Тобто відомі координати знаходження частинок матеріалу з різною густиною перед попаданням їх до збирального бункеру.

Розділення матеріалу на робочій поверхні ПСС проводиться на три фракції, які відрізняються одна від одної значеннями власної густини. Слід відмітити, що заводом виробником передбачається можливість видалення з матеріалу, що обробляється, каміння. Однак до обробки на ПСС, за технологічним процесом, потрапляє попередньо очищений та відкалібрований матеріал, без сторонньої домішки, а саме каміння.

Очевидно, у відповідності до рушійних сил, що лежать в основі способу розділення НМ на робочій поверхні ПСС, найменшого відхилення зазнає «легка» фракція, а найбільшого – «важка». Наявне також і проміжне значення густини насіння – позначено його як «середня» фракція. Біологічне активне насіння, яке відокремлюється даним способом, являє собою «важку» фракцію.

У досліджені зроблено припущення, що попадання частинок із визначеною густиною у відповідну координату підкорюється закону нормального розподілу. При цьому координати фракцій із різною густиною являють собою математичне очікування у нормальному розподілі:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (2.133)$$

де: $f_i(x)$ – функція розподілення імовірностей координати x; σ^2 – дисперсія координати; x_i – координата i-ої фракції сировини, яка має відповідну густину, на виході із пневмосортувального стола (математичне очікування).

Індекс *i* для ПСС відповідно змінюється від 1 до 3, тобто індекс «легкої» фракції – 1; «середньої» – 2; «важкої» – 3.

Густина матеріалу, яка являє собою НМ та має природнє походження, змінюється від мінімального свого значення до максимального неперервно, а не дискретно. Необхідно відмітити при цьому, що розподілення кількості частинок шару матеріалу за густиною є інформацією яка суттєво залежить від показників якості вихідного матеріалу. Врахування факторів, що впливають на розподілення частинок матеріалу за густиною, суттєво ускладнює поставлену задачу, тому зроблено спрощення задачі: розрахунок функцій розподілення проводився для усереднених значень густини «легкої», «середньої» та «важкої» фракцій насіннєвого матеріалу; дисперсія координати при цьому вважалась рівною одиниці.

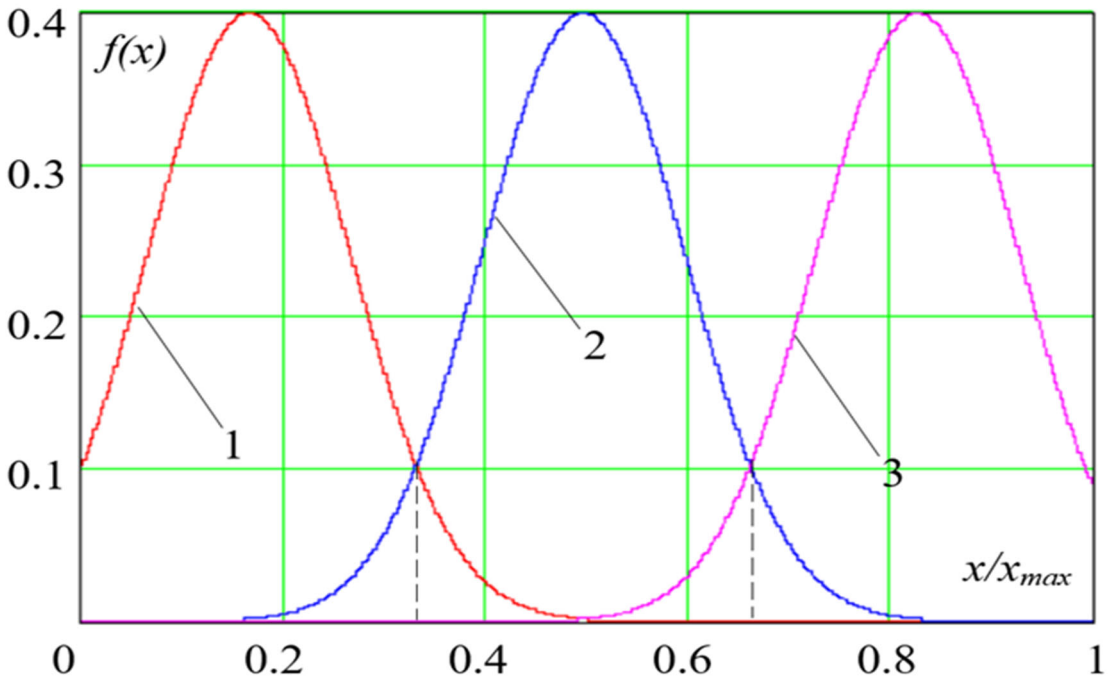


Рис. 2.5. Функції розподілення імовірності координат «легкої», «середньої» та «важкої» фракцій насіннєвого матеріалу за визначеної амплітуди (A=4 мм) та частоти (ν=800 кол/хв) коливань ПСС: 1 – «легка» фракція; 2 – «середня» фракція; 3 – «важка» фракція

Приклад наведений для випадку постійної амплітуди (A=4 мм) та частоти (ν=800 кол./хв) коливань ПСС. Координату x на графіку пронормовано на максимальне значення ширини сторони деки ПСС x_{max}, з якої розділений НМ надходить до збиральних бункерів. Координата «0» відповідає частині деки, з якої сходить «легка» фракція, а координата x_{max} – частині деки, з якої сходить «важка» фракція. При цьому вважалось, що частина матеріалу, яка попадає у проміжок від 0 до $0{,}33 \cdot x_{max}$, потрапляє до бункера для «легкої» фракції. Матеріал, який попадає у проміжок від $0{,}33 \cdot x_{max}$ до $0{,}66 \cdot x_{max}$, надходить до бункера для «середньої» фракції, а та, яка попадає у проміжок від $0{,}66 \cdot x_{max}$ до x_{max}, надходить до бункера для «важкої» фракції.

Очевидно слід вважати, що існує імовірність попадання до бункера для «важкої» фракції частинок, густина яких відповідає «легкій» та «середній» фракціям. Те ж стосується частинок матеріалу, густина якої відповідає «важкій» фракції – існує імовірність їх попадання в бункери для «легкої» та «середньої» фракцій.

Знайти кількість частинок «легкої», «середньої» та «важкої» фракцій НМ, які потрапляють у бункери призначені, відповідно, для «легкої» (i=1), «середньої» (i=2) та «важкої» (i=3) фракції, можна наступним чином:

$$S_1 = N_1 \cdot \int_{-\infty}^{0.33x_{max}} f_1(x)dx + N_2 \cdot \int_{-\infty}^{0.33x_{max}} f_2(x)dx + N_3 \cdot \int_{-\infty}^{0.33x_{max}} f_3(x)dx, \quad (2.134)$$

$$S_2 = N_1 \cdot \int_{0.33x_{max}}^{0.66x_{max}} f_1(x)dx + N_2 \cdot \int_{0.33x_{max}}^{0.66x_{max}} f_2(x)dx + N_3 \cdot \int_{0.33x_{max}}^{0.66x_{max}} f_3(x)dx, \quad (2.135)$$

$$S_3 = N_1 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_1(x)dx + N_2 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_2(x)dx + N_3 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx, \quad (2.136)$$

де S_1, S_2 та S_3 – кількість частинок у бункерах, призначених, відповідно, для «легкої» (i=1), «середньої» (i=2) та «важкої» (i=3) фракцій; $f_1(x)$, $f_2(x)$ та $f_3(x)$ – функції розподілення імовірностей для частинок «легкої» (i=1), «середньої» (i=2) та «важкої» (i=3) фракцій; N_1, N_2 та N_3 – кількість частинок

«легкої» (i=1), «середньої» (i=2) та «важкої» (i=3) фракцій у сировині, тобто насіннєвому матеріалі, що надходить на обробку.

Оскільки кінцевою метою розділення матеріалу на ПСС є високоякісне, біологічно активне насіння, то критерієм ефективності процесу розділення слід вважати чистоту «важкої» фракції. Під чистотою «важкої» фракції розуміється відношення кількості частинок «важкої» фракції у відповідному бункері (i=3), до загальної кількості частинок в ньому:

$$Purity = \frac{N_3 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx}{N_1 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_1(x)dx + N_2 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_2(x)dx + N_3 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx} \cdot 100\% \quad (2.137)$$

Враховуючи те, що відсутнє розподілення частинок за густиною у вихідному НМ у межах між «легкою», «середньою» та «важкою» фракціями, зроблено припущення, що N_1=N_2=N_3=N. З урахуванням цього для (2.137) можна отримати:

$$Purity = \frac{N \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx}{N \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_1(x)dx + N \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_2(x)dx + N \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{\int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx}{\int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_1(x)dx + \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_2(x)dx + \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx} \cdot 100\% \quad (2.138)$$

Обчислення чистоти «важкої» фракції проводили за почергової зміни обраних параметрів процесу розділення. Отримані при цьому значення чистоти «важкої» фракції апроксимувались поліноміальними функціями виду:

$$F(Purity) = \sum_{j=0}^{n} a_j \cdot Purity^j, \quad (2.139)$$

де a_j – апроксимаційні коефіцієнти; n – ступінь полінома.

Для наочності результати моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні ПСС наведено у вигляді поверхонь . При цьому зроблено спрощення за рахунок застосування квадратичної моделі, де аргументами є амплітуда (A) та частота коливань ПСС (v) (рис. 2.6. – 2.11). Рівняння квадратичної регресії при цьому мали вигляд:

$$Purity\ (A,\ v) = 84.889+7.5\cdot A\text{-}0.333\cdot v–14.833\cdot A^2–6.333\cdot v^2+1.25\cdot A\cdot v, \quad (2.140)$$

$$Purity\ (A,\ v) = 86.444+6.667\cdot A+0.5\cdot v–10.667\cdot A^2–6.167\cdot v^2\text{-}1.25\cdot A\cdot v, \quad (2.141)$$

$$Purity\ (A,\ v) = 80.111+2.833\cdot A\text{-}0\cdot v–6.167\cdot A^2–3.667\cdot v^2+0.75\cdot A\cdot v, \quad (2.142)$$

$$Purity\ (A,\ v) = 85.889+7.5\cdot A\text{-}3.333\cdot v–16.833\cdot A^2–3.333\cdot v^2+0.5\cdot A\cdot v, \quad (2.143)$$

На рис.2.6. наведено результати теоретичного багатофакторного моделювання процесу розділення НМ, де факторами є частота та амплітуда коливань деки ПСС, а критерієм оцінювання – чистота основної фракції. Поперечний та поздовжній кути при цьому дорівнювали 1°, а швидкість повітряного потоку – 1 м/с.

Для досліджень було обрано найбільш поширені зернові культури у виробництві в Україна (алгоритм вибору та фізико-механічні властивості НМ описано у розділі 5).

Аналіз поверхонь відгуку, що отримані розв’язком розробленої механіко-математичної моделі та які наведені на рис.2.6 поверхні мають екстремальний характер. На них наявні максимуми чистоти основної фракції, яким відповідають раціональні значення амплітуди та частоти коливань ПСС. Оскільки дані поверхні надають лише загальний вигляд залежностей, то для більш детального аналізу слід навести січні поверхонь, наведених на рис.2.6.

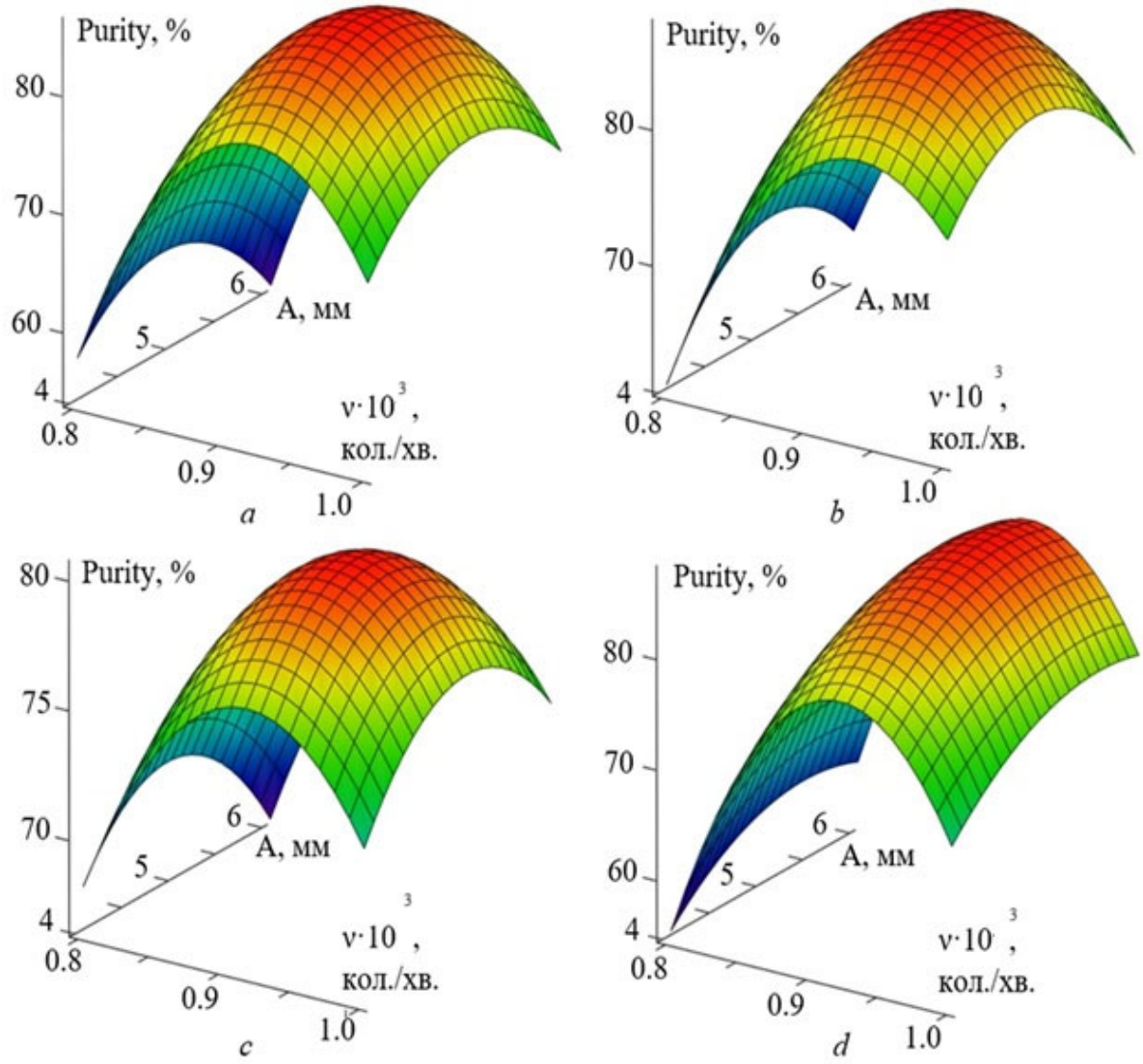


Рис.2.6. Результати теоретичного моделювання зміни чистоти основної фракції (Purity) НМ в залежності від частоти (*v*) та амплітуди (*A*) коливань ПСС в залежності від матеріалу: a – пшениці; b – кукурудзи; c – соняшнику; d – сої

На рис.2.7 – 2. 10 наведено січні поверхонь для різних матеріалів, при цьому вони являють собою залежності чистоти основної фракції від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС. Ці січні є апроксимаційними функціями даних отриманих теоретичним моделюванням з використанням розробленої механіко-математичної моделі.

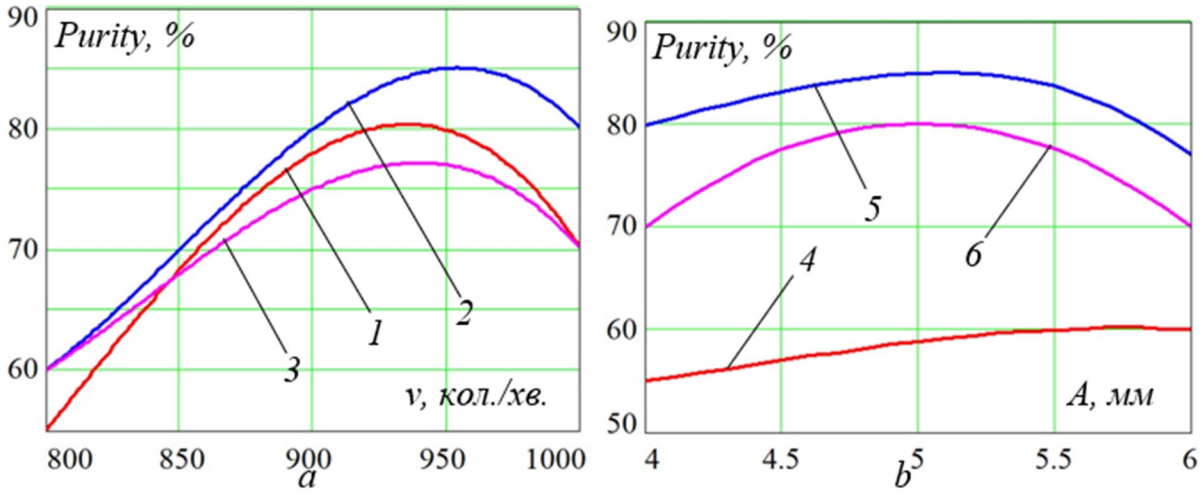


Рис.2.7. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС: частоти (1 – 800 кол./хв; 2 – 900 кол./хв; 3 – 1000 кол./хв) та амплітуди (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

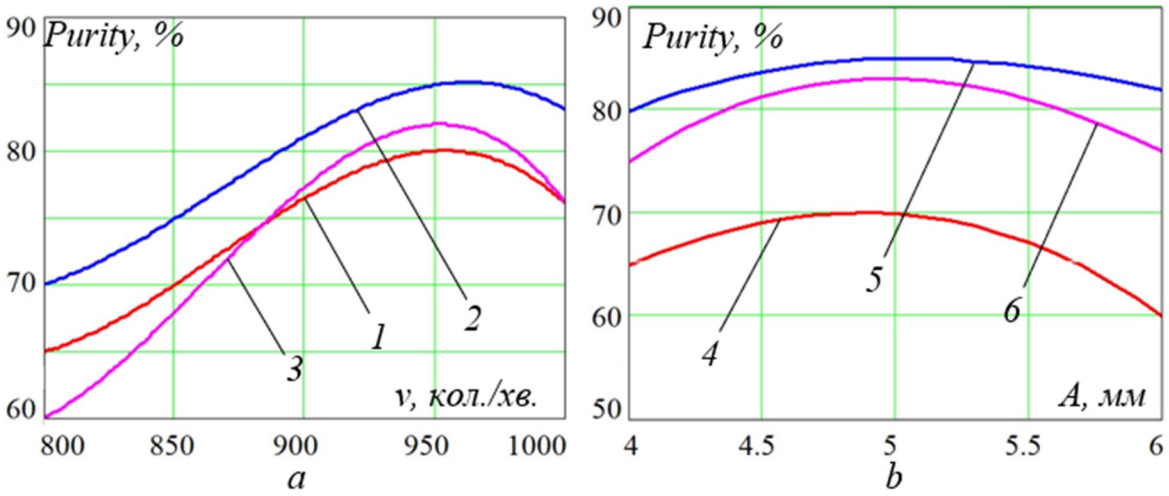


Рис.2.8. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ кукурудзи, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС: частоти (1 – 800 кол./хв; 2 – 900 кол./хв; 3 – 1000 кол./хв) та амплітуди (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

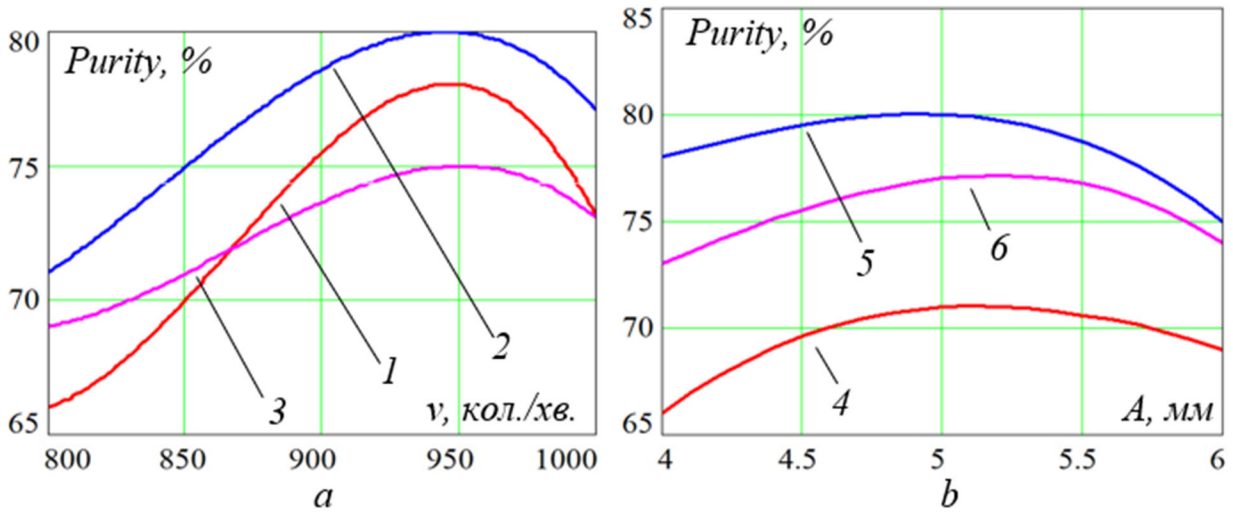


Рис.2.9. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС: частоти (1 – 800 кол./хв; 2 – 900 кол./хв; 3 – 1000 кол./хв) та амплітуди (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

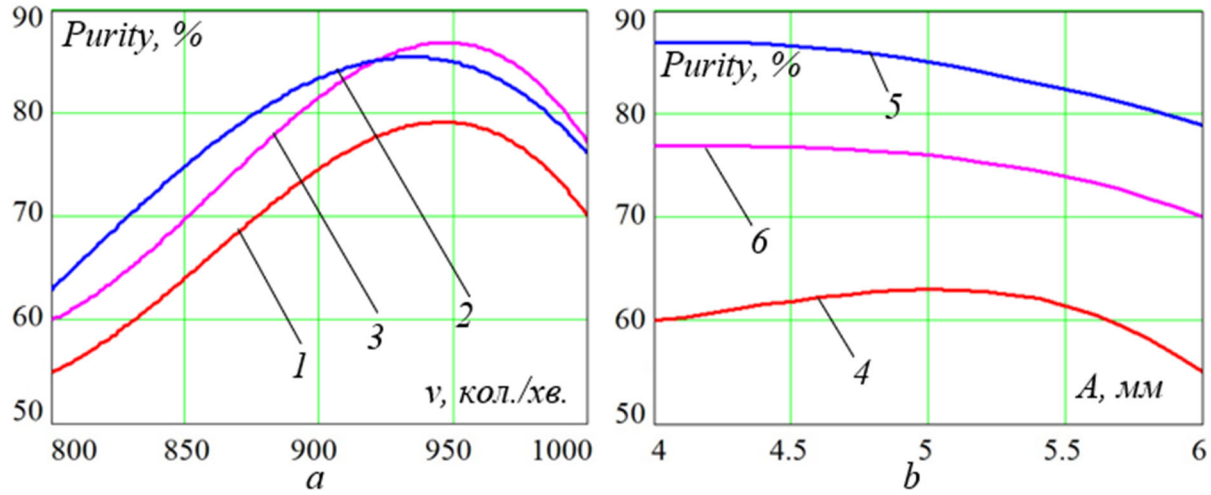


Рис.2.10. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС: частоти (1 – 800 кол./хв; 2 – 900 кол./хв; 3 – 1000 кол./хв) та амплітуди (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

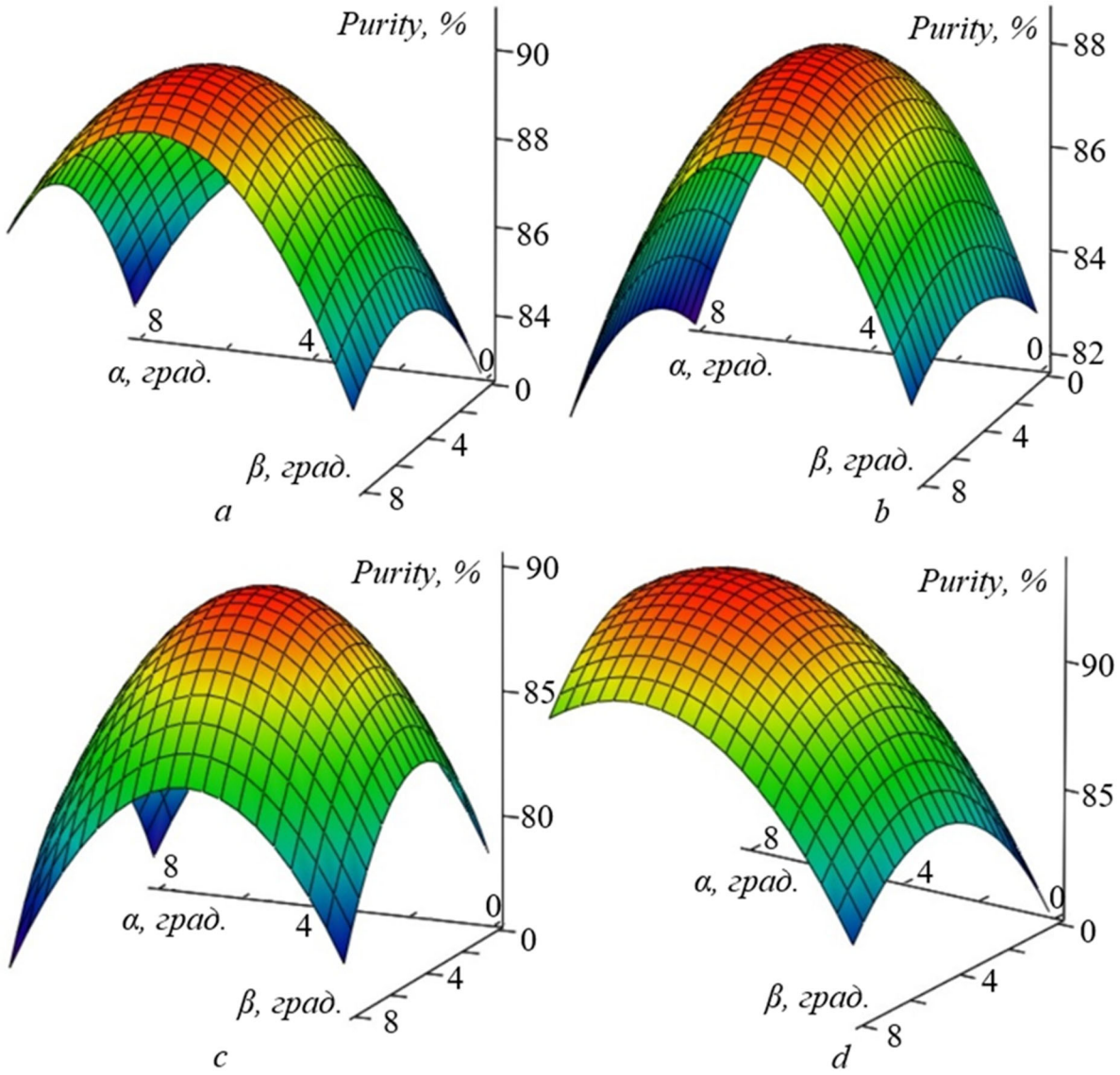


Рис.2.11. Результати теоретичного моделювання зміни чистоти основної фракції НМ в залежності від величини поздовжнього (α) та поперечного (β) кутів нахилу деки ПСС для матеріалу: a – пшениці; b – кукурудзи; c –соняшнику; d – сої

На рис.2.11 наведено результати теоретичного багатофакторного теоретичного моделювання процесу розділення НМ, де факторами є поздовжній (α) та поперечний (β) кути нахилу деки ПСС, критерієм оцінювання – чистота основної фракції. Частота та амплітуда коливань деки ПСС при цьому обирались виходячи із виду матеріалу: пшениця – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; кукурудза – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм;

соняшник – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; соя – частота 940 кол./хв, амплітуда 6 мм. Швидкість повітряного потоку дорівнювала 1 м/с.

Наведені залежності результатів теоретичних досліджень, як і залежності чистоти основної фракції НМ в залежності від частоти (v) та амплітуди (A) коливань ПСС для різного матеріалу, також мають екстремальний характер. Тобто поверхні мають вигин відносно площини $O\alpha \times O\beta$, що свідчить про наявність значень поздовжнього (α) та поперечного (β) кутів нахилу деки, за яких має місце максимальне значення чистоти основної фракції.

Для встановлення діапазонів поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки ПСС, за яких має місце максимальне значення чистоти основної фракції сировини, що використовувалась в дослідженні, слід навести січні поверхонь (Рис.2.12 – 2.15) та чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ на ПСС, в залежності від швидкості повітряного потоку з рис.2.11.

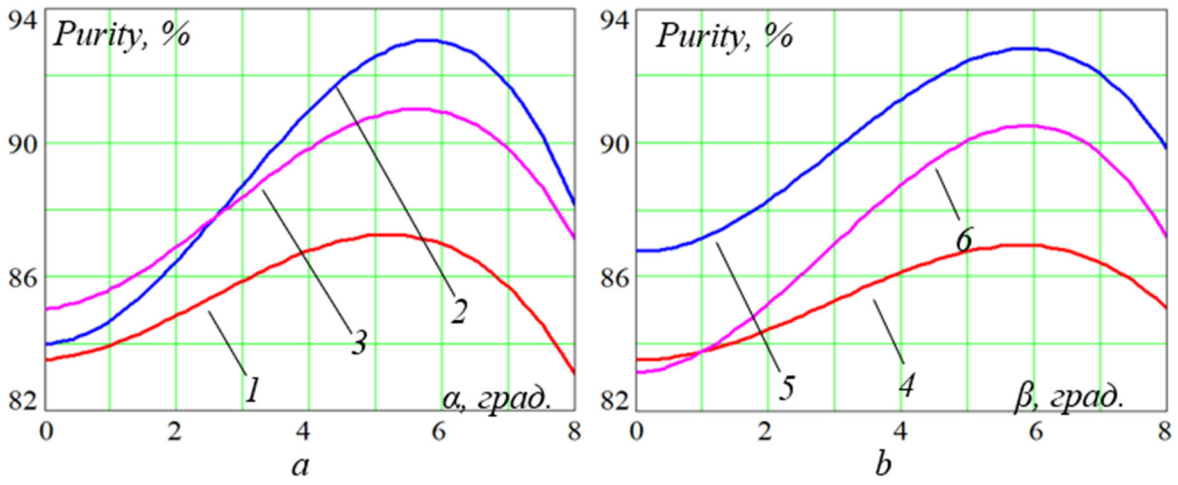


Рис.2.12. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці, в залежності від поздовжнього (a) та поперечного (b) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

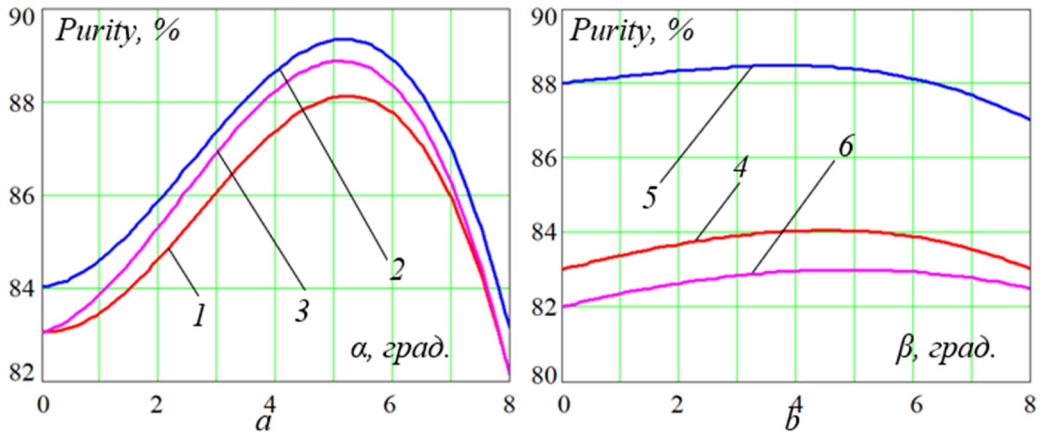


Рис.2.13. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ кукурудзи, в залежності від поздовжнього (*a*) та поперечного (*b*) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

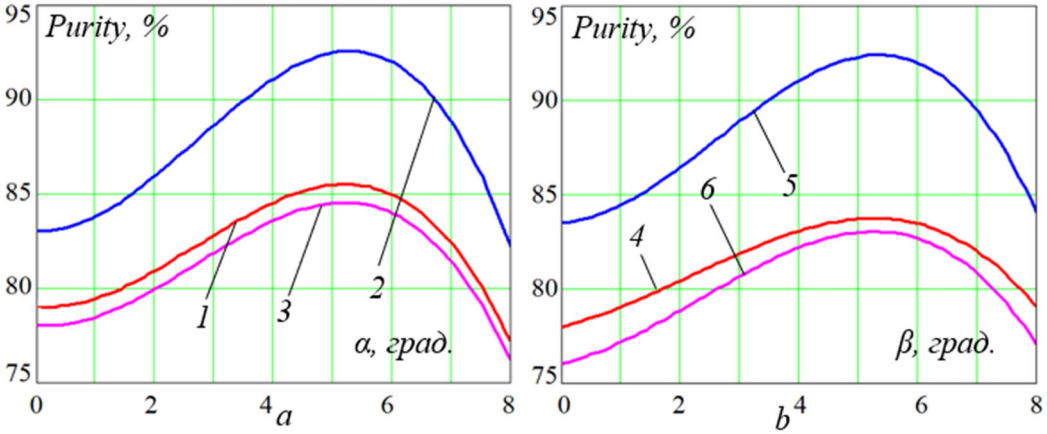


Рис.2.14. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику, в залежності від поздовжнього (*a*) та поперечного (*b*) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

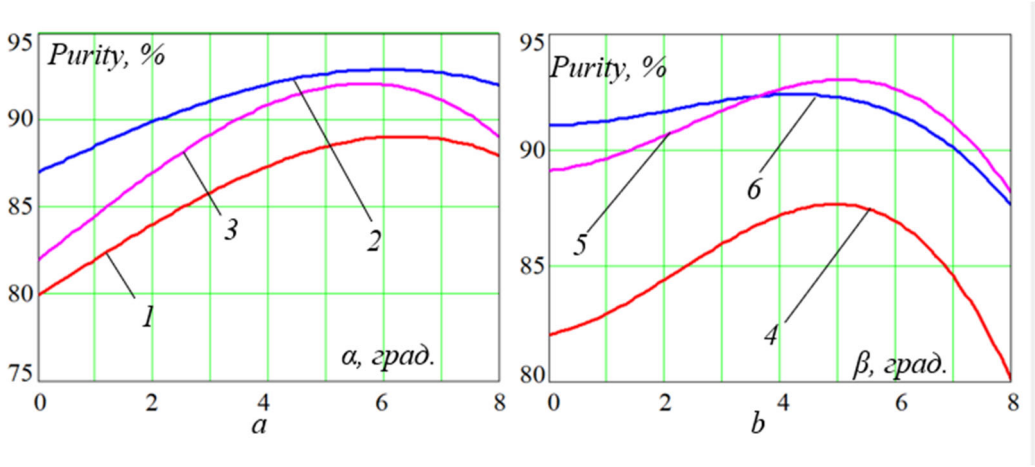


Рис.2.15. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої, в залежності від поздовжнього (*a*) та поперечного (*b*) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

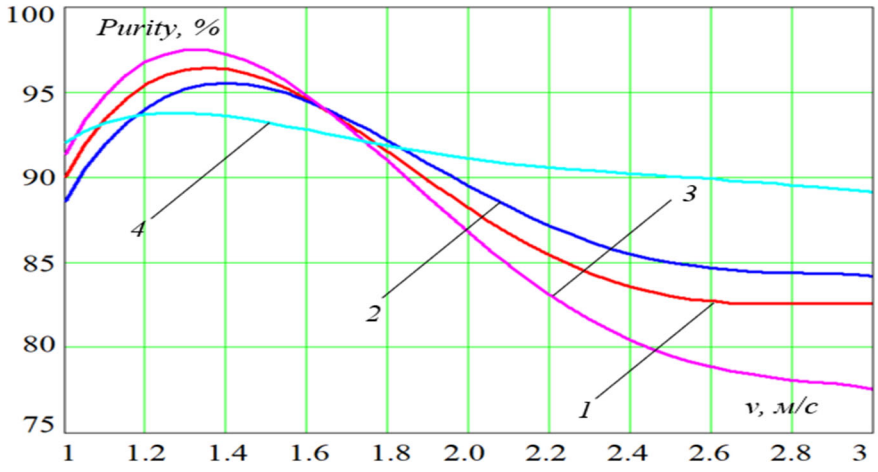


Рис.2.16. Чистота основної фракції, отриманої розділенням НМ на ПСС, в залежності від швидкості повітряного потоку для різних матеріалів: 1 – пшениці; 2 – кукурудзи; 3 – соняшнику; 4 – сої

За результатами теоретичного моделювання, визначено, що максимальна чистота основної фракції, отриманої розділенням матеріалу пшениці на ПСС, досягається за швидкості повітряного потоку із діапазону 1,3…1,5 м/с. Для кукурудзи раціональна швидкість повітряного потоку

лежить діапазоні 1,3…1,6 м/с, для соняшнику – 1,2…1,4 м/с, для сої – 1,2…1,4 м/с. Ці значення справедливі за умови використання під час розділення матеріалів відповідних раціональних значень частоти й амплітуди коливань деки ПСС та поздовжнього й поперечного кутів її нахилу.

Результати теоретичного моделювання процесу розділення НМ на плоскі повітропроникній поверхні ПСС потребують верифікації експериментальним шляхом та будуть наведені у розділі 5.

2.5. Висновки за розділом

1. На основі системного аналізу відомих досліджень технологій, процесів, машин, обладнання та наукових підходів до розв’язання проблеми підвищення ефективності процесу післязбиральної обробки НМ визначено, що при вібропневматичному розділенні, шар конечної кількості частинок, що різняться за власною густиною, знаходяться на повітропроникній поверхні та піддається впливу повітряного потоку, коливанням робочої поверхні. В результаті при досягненні оптимальних значень швидкості повітряного потоку, амплітуди і частоти коливань робочої поверхні, шар частинок НМ набуває властивостей псевдорозрідженої рідини, тобто властивості текучості. Це призводить до того, що починається процес розділення НМ на шари, що складаються з частинок відповідної густини, які рухаються за спорідненими траєкторіями: починають занурюватись або спливати (розшаровуватись) у псевдорозрідженому шарі.

2. Спираючись на системний аналіз попередній теоретичних досліджень встановлено, що НМ який піддається впливу повітряного потоку і вібраційних коливань повітропроникної робочої поверхні, ефективно моделюються багатофазною структурою, шо складається з дискретних компонент (конечною кількістю частинок, які різняться за густиною) і неперервної компоненти – газоподібного середовища (повітря). НМ розглядається, як «суцільні середовища», що взаємодіють між собою.

Дискретна фаза розглядається, як число N дискретних компонент, кожну з яких утворено твердими частинками з густиною $\bar{\rho}_n, n = 1,2,\dots N$.

3. Спираючись на створені дво- та тривимірні механіко-математичні моделі гідродинаміки багатофазних систем, які описують процес розділення псевдорозрідженого шару НМ на фракції, на робочих поверхнях плоскої форми за густиною насіння, шляхом теоретичного узагальнення обґрунтовано принципи та розроблено концепцію інтенсифікації процесу розділення НМ.

4. На основі розробленої механіко-математичної моделі встановлено, що відносна швидкість шарів частинок дискретної фази змінюється гармонічно за часом з частотою коливань робочої поверхні, а її амплітуда складним чином залежить від фізико-механічних параметрів НМ, швидкості повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару і ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості.

5. Аналіз механіко-математичної моделі дозволив встановити, що компонента швидкості V_{13} частинок дискретної фази, складним чином залежить від швидкості повітряного потоку: від об'ємної концентрації частинок дискретної фази, кінематичного режиму вібраційних коливань робочої поверхні, що враховується через ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази. Величина V_{13} менше середнього значення швидкості повітряного потоку.

6. На підставі одержаних теоретичних результатів, визначено, що амплітуда коливань робочої поверхні та швидкості частинок n -ої дискретної фази складаються з двох доданків. Один доданок квадратично залежить від координати x_3 (вісь x_3, що перпендикулярна до робочої поверхні). Другий доданок має більш складну залежність від координати x_3, а саме, є суперпозицією експоненційно зростаючих та убуваючих функцій. $e^{\pm\gamma_n x_3}$. Конкуренція цих двох доданків і визначає основний характер зміни швидкостей дискретних фаз за товщиною псевдорозрідженого шару частинок. Так, наприклад, при куті нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини, близькою до нуля, доданками з квадратичною залежністю від координати x_3

можна знехтувати. При коефіцієнті тертя f, що обумовлено робочою поверхнею, який наближається до нуля, домінуючим доданком буде доданок з квадратичною залежністю від координати x_3. При $f \to 0$ и $\alpha \to 0$ швидкості частинок дискретних фаз стають настільки малими, що ними можна знехтувати. Також слід відмітити, що доданок з квадратичною залежністю від координати x_3 залежить тільки від фізичних параметрів частинок відповідної дискретної та неперервної фаз. Другий доданок, натомість від вказаних фізичних параметрів, залежить від фізичних параметрів нижче розташованих дискретних фаз.

7. На основі аналізу отриманих теоретичних та експериментальних залежностей моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні пневмосепарувального столу досліджено залежність чистоти (***Purity***) основної фракції від визначальних параметрів процесу та визначено, що якість очищення основної фракції суттєво залежить від визначальних режимних параметрів: швидкості повітряного потоку (υ), частоти (ν) і амплітуди (A) коливань деки пневмосортувального столу та повздовжнього (α) й поперечного (β) кутів її нахилу.

Максимальна чистота основної фракції НМ, що було досліджено, досягається при дотриманні відповідних оптимальних значеннях визначальних факторів: пшениця: υ = 1,3…1,5 м/с; ν = 940 кол./хв, A = 5 мм; кукурудза: υ = 1,3…1,6 м/с; ν = 940 кол./хв, А = 5 мм; соняшник: υ = 1,2…1,4 м/с; ν = 940 кол./хв, A = 5 мм; соя: υ = 1,2…1,4 м/с; ν = 940 кол./хв, A = 6 мм.

8. Розрахункова максимальна чистота основної фракції, отриманої розділенням НМ із пшениці на ПСС, досягається за швидкості повітряного потоку із діапазону 1,3…1,5 м/с. Для кукурудзи раціональна швидкість повітряного потоку лежить діапазоні 1,3…1,6 м/с, соняшнику – 1,2…1,4 м/с, сої – 1,2…1,4 м/с.

Для верифікації розробленої механіко-математичної моделі та результатів теоретичного моделювання необхідне проведення експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 3

МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІБРОПНЕВМОВІДЦЕНТРОВОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

У розділі побудовано механіко-математичні моделі пошарового руху НМ по внутрішній поверхні повітропроникній робочій поверхні циліндричної форми, що обертається навколо вертикальної осі та виконує, по відношенні до цієї осі, гармонічні коливання. Механіко-математичні моделі базуються на системному підході використання гідродинаміки багатофазних середовищ (псевдорідин).

Цей метод моделює НМ у формі багатофазної структури, яка піддається впливу повітряного потоку, коливанням робочої поверхні та дії поля відцентрової сили і складається з кінцевої кількості шарів дискретних компонент (частинок НМ) та неперервної компоненти (газоподібне середовище). Ці дискретні та неперервна компонента розглядаються, як суцільні середовища, що взаємодіють між собою. Такі взаємодії моделюються відповідними умовами взаємодії на границі розділу середовищ.

3.1. Гідродинамічна модель пошарового руху насіннєвого матеріалу по повітропроникній робочій поверхні циліндричної форми

Постановка граничної задачі пошарового руху насіннєвого матеріалу

Розглянемо циліндричну робочу поверхню радіусом R, що виконує рівномірний обертальний рух навколо вертикальної осі (ось z) з кутовою швидкістю ω_1 коливальний гармонічний рух вздовж цієї ж осі з круговою частотою ω_2 та амплітудою A. Для опису руху шару частинок введемо дві

циліндричні системи координат з віссю z, що співпадає з віссю симетрії циліндричної поверхні [238]. Приймемо, що одна з систем координат жорстко зв'язана з рухомою циліндричною поверхнею, а інша є абсолютною. Будемо вважати, що в результаті дії повітряного потоку, поля відцентрових сил та гравітаційного поля утворилось N - кільцевих шарів частинок, які відрізняються за аерогравітаційними і гідродинамічними властивостями. Рух кожного шару частинок розглядається як рух суцільного середовища. Введемо приведену густину частинок n -го шару ρ_n і середню густину частинок $\bar{\rho}_n$, що утворюють n -й шар.

Маємо:

$$\rho_n = \delta_n \bar{\rho}_n, \tag{3.1}$$

де: δ_n – об'ємна доля частинок n -го шару (n -ої дискретної фази).

Введемо, ρ – приведена густина неперервної фази, $\bar{\rho}$ – середня густина газоподібної фази, що утворює загальну фазу. У такому випадку одержимо:

$$\rho = \bar{\rho}\left(1 - \sum_{n=1}^{N} \frac{\rho_n}{\bar{\rho}_n}\right) = \bar{\rho}(1 - \sum_{n=1}^{N} \delta_N)\ . \tag{3.2}$$

Позначивши середню товщину n -го кільцевого шару частинок через h_n, $n = 1,2,\dots,N$. Значення індексу $n = 1$ відповідає кільцевому шару, що знаходиться на циліндричній поверхні, а $n = N$ – кільцевому шару, одна з меж якого межує з повітрям.

Дослідження динаміки такої N - фазної структури проводимо відносно циліндричної системи координат, яка жорстко пов'язана з рухомою циліндричною поверхнею.

Припустимо, що $\vec{\omega}_1$ – вектор кутової швидкості циліндричної поверхні, яка направлена вздовж осі z циліндричної системи координат r, ϕ, z з ортами $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$. Згідно [16], абсолютне прискорення $\vec{a}_n$ і швидкість $\vec{V}_n$ елемента n -го кільцевого шару (n -ої дискретної фази) можна виразити через відносне прискорення $\vec{b}_n$ і швидкість $\vec{u}_n$ за допомогою:

$$\vec{a}_n = \vec{b}_0 + 2\vec{\omega}_1 \times \vec{u}_n + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{r}) + \vec{b}_n, \tag{3.3}$$

$$\vec{V}_n = \vec{u}_0 + \vec{\omega}_1 \times \vec{r} + \vec{u}_n, \tag{3.4}$$

де: $\vec{b}_0 = -A\omega_2^2 \sin \omega_2 t \vec{e}_z$, $\vec{u}_0 = A\omega_2 \cos \omega_2 t \vec{e}_z$ – відповідно прискорення і швидкість повздовжніх (вздовж осі z) коливань циліндричної поверхні, $\vec{r} = r\vec{e}_r$ – вектор, що відповідає радіусу елемента, який розглядається, n -го циліндричного шару часток.

З урахуванням вищеозначеного, рівняння, яке описує відносний рух n -го кільцевого шару частинок, згідно (2.42), можна навести у вигляді:

$$\rho_n \left(\frac{\partial \vec{u}_n}{\partial t} + (\vec{u}_n, \nabla)\vec{u}_n \right) = -\nabla P_n + \mu_n \Delta(\vec{u}_n + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}) + \rho_n \vec{F}_n + \vec{G}_n, \tag{3.5}$$

$$div\vec{u}_n = 0, \tag{3.6}$$

$$n = 1,2, \dots, N,$$

де: μ_n - ефективний коефіцієнт динамічної в’язкості n -го шару частинок НМ.

$$\vec{F}_n = \frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\vec{V}-\vec{u}_n) + (\vec{V}-\vec{u}_n,\nabla)(\vec{V}-\vec{u}_n) + 2\vec{\omega}_1 \times (\vec{V}-\vec{u}_n) + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{r})\right] + F_n(\vec{V}-\vec{u}_n) + \frac{9\bar{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\bar{\rho}_n}\int_0^t \left[\frac{\partial(\vec{V}-\vec{u}_n)}{\partial t} + (\vec{V}-\vec{u}_n,\nabla)(\vec{V}-\vec{u}_n) + 2\vec{\omega}_1 \times (\vec{V}-\vec{u}_n) + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{r})\right](t-r)^{-1/2}dr, \quad (3.7)$$

$$\vec{G}_n = -\rho_n g\vec{e}_z - \vec{b}_0\rho_n - 2\rho_n(\vec{\omega}_1 \times \vec{u}_n) - \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{r})\rho_n, \quad (3.8)$$

де: $\vec{V}$ – відносна швидкість неперервної фази,

P_n – тиск у n -ому кільцевому шарі,

ν – ефективний коефіцієнт кінематичної в’язкості неперервної фази,

a_n – еквівалентний середній радіус за об’ємом частинок n -го шару,

F_n – коефіцієнт, що характеризує взаємодію неперервної фази з частинками n -го шару, який можна навести у вигляді (3.9):

$$F_n = \frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n(1-\delta_n)^2 a_n}\left(1.75V_{0n} + \frac{75\nu\delta_n}{a_n}\right), \quad (3.9)$$

де: V_{0n} – середня швидкість неперервної фази на межі n -го шару $\left(r = R - \sum_{p=1}^{n} h_p\right)$.

Окрім (3.5), (3.6), які описують відносний рух n -ої дискретної фази (n -ий кільцевий шар частинок), слід розглядати рівняння відносного руху неперервної фази. Обмежимось лінійним наближенням, у такому випадку ці рівняння для n -го кільцевого шару, згідно (2.45), можна навести у формі:

$$\rho\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} = -(1-\delta)\nabla P + \mu\Delta\left(\vec{V} + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}\right) - \rho_n\vec{F}_n + \vec{G}, \tag{3.10}$$

$$div\vec{u}_n = 0, \tag{3.11}$$

де: μ – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості неперервної фази, P – надлишковий тиск, $\delta = \sum_{n=1}^{N}\delta_n$,

$$G = -\rho g\vec{e}_z - \vec{b}_0\rho - 2\rho\left(\vec{\omega}_1 \times \vec{V}\right) - \vec{\omega}_1 \times (\omega_1 \times \vec{r})\rho. \tag{3.12}$$

З рівняння (2.42) та (3.5) легко побачити, що основна відмінність цих рівнянь складає у введенні для масової сили додаткових складових у (3.5). Дійсно, перехід до відносного руху призводить до доповнення реальної масової сили (сили тяжіння), силою інерції: $\vec{b}_0\rho_n$ – сила інерції поступового руху циліндричної поверхні; $2(\vec{\omega}_1 \times \vec{u}_n)\rho_n$ – Сила Коріоліса, $\vec{\omega}_1 \times (\omega_1 \times \vec{r})\rho_n$ – відцентрова сила.

У рівняннях (3.5) і (3.10) складова $\Delta(\vec{\omega}_1 \times \vec{r}) = 0$, оскільки функція $\vec{\omega}_1 \times \vec{r}$ є гармонічною [16]. Окрім рівнянь (3.5), (3.6) і (3.10), (3.11), поля швидкостей $\vec{u}_n$, $\vec{V}$ і тиск P_n та P повинні задовольняти початковим і граничним умовам – умови сполучення на границях розділення дискретних фаз і умовам на поверхні повітропроникної циліндричної робочої поверхні. Не обмежуючи загальності, будемо вважати, що для моменту часу $t \le 0$, поле швидкостей $\vec{u}_n$ і $\vec{V}$та надлишковий тиск P_n і P наближається до нуля.

$$P|_{t\le 0} = P_n|_{t\le 0} = 0, \quad \vec{u}_n|_{t\le 0} = \vec{V}\big|_{t\le 0} = 0. \tag{3.13}$$

Зміна $\vec{u}_n$, $\vec{V}$, P_n, P для моментів часу $t > 0$ моделюються рівняннями (3.5) та (3.10).

Розглянемо умови сполучення на межі розділення кільцевих шарів НМ (дискретної фази). Для цього необхідно ввести тензор напружень $\sigma^n = \left(\sigma_{ij}^n\right)_{i,j=1}^3$ для n -го кільцевого шару НМ. У відповідності до [8, 39], компоненти тензору напружень можна навести у вигляді:

$$\sigma_{ij}^n = -P_n\delta_{ij} + 2\mu_n e_{ij}^n, \quad n = 1,2,\dots N,\ i,j = 1,\dots,3. \tag{3.14}$$

Де: $e^n = \left(e_{ij}^n\right)_{i,j=1}^3$ – тензор швидкісної деформації, δ_{ij} – символ Кронекера.

У циліндричній системі координат маємо:

$$e_{11}^n = \frac{\partial u_z^n}{\partial z}, \quad e_{22}^n = \frac{\partial u_r^n}{\partial r}, \quad e_{33}^n = \frac{1}{r}\frac{\partial u_\phi^n}{\partial \phi} + \frac{u_r}{r},$$
$$e_{23}^n = e_{32}^n = \frac{r}{2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\phi^n}{r}\right) + \frac{1}{2r}\frac{\partial u_r^n}{\partial \phi},$$
$$e_{31}^n = e_{13}^n = \frac{1}{2r}\frac{\partial u_z^n}{\partial \phi} + \frac{1}{2}\frac{\partial u_\phi^n}{\partial z},$$
$$e_{12}^n = e_{21}^n = \tfrac{1}{2}\tfrac{\partial u_r^n}{\partial z} + \tfrac{1}{2}\tfrac{\partial u_z^n}{\partial r}. \tag{3.15}$$

Підставивши (3.15) у (3.14) отримаємо вираз для компонент тензору напружень у циліндричній системі координат:

$$\sigma_{11}^n = -P_n + 2\mu_n\tfrac{\partial u_z^n}{\partial z}, \quad \sigma_{22}^n = -P_n + 2\mu_n\tfrac{\partial u_r^n}{\partial r},$$

$$\sigma_{33}^n = -P + \frac{2\mu_n}{r}\left(\frac{\partial u_\phi^n}{\partial \phi} + \frac{u_r}{}\right),$$

$$\sigma_{23}^n = \sigma_{32}^n = \mu_n\left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_r^n}{\partial \phi} + \frac{\partial u_\phi^n}{\partial r} - \frac{u_\phi^n}{r}\right), \tag{3.16}$$

$$\sigma_{31}^n = \sigma_{13}^n = \mu_n\left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_z^n}{\partial \phi} + \frac{\partial u_\phi^n}{\partial z}\right),$$

$$\sigma_{12}^n = \sigma_{21}^n = \mu_n\left(\frac{\partial u_r^n}{\partial z} + \frac{\partial u_z^n}{\partial r}\right).$$

У (3.15) і (3.16) $u_z^n,\ u_r^n,\ u_\phi^n$ – компоненти відносної швидкості $\vec{u}_n$.

Умови сполучення на границях кільцевих шарів складаються з неперервності швидкостей і напружень. Відповідно, на границі сполучення n -го і $n+1$-го шарів повинні бути неперервними швидкості:

$$\vec{u}_n|_{r=\bar{h}_n} = \vec{u}_{n+1}|_{r=\bar{h}_n}, \quad n = 1,2,\dots,N-1, \tag{3.17}$$

де: $\bar{h}_n = R - \sum_{p=1}^{n} h_p$.

На цих межах повинні бути неперервними дотичні і нормальні компоненти тензорів напружень дискретних фаз:

$$\mu_n e_{ij}^n \tau_i n_j\big|_{r=\bar{h}_n} = \mu_{n+1} e_{ij}^{n+1} \tau_i n_j\big|_{r=\bar{h}_n}, \tag{3.18}$$

$$\left(P_n - 2\mu_n e_{ij}^n n_i n_j\right)\Big|_{r=\bar{h}_n} = \left(P_{n+1} - 2\mu_{n+1} e_{ij}^{n+1} n_i n_j\right)\Big|_{r=\bar{h}_n}. \quad (3.19)$$

Тут, за індексами, що повторюються, мається на увазі додавання, а через n_i і τ_i позначені компоненти одиничних векторів нормальних і дотичних до границі сполучення шарів. Окрім умов сполучення (3.18), (3.19) слід встановити граничні умови на циліндричній поверхні і на межі кільцевого шару з повітрям (вільна межа). На вільній межі, у випадку, якщо знехтувати впливом повітряного потоку на динаміку НМ, напруження повинно обертатись у нуль:

$$\vec{n} \cdot \sigma^N|_{r=R-\sum_{p=1}^{n} h_p}^{=0}, \quad (3.20)$$

де: $\vec{n}$-орт нормалі до вільної границі; σ^N- тензор напружень N -го кільцевого шару.

Векторна рівність (3.20) еквівалентна трьом скалярним рівностям, а саме:

$$\sigma_{22}^N|_{r=h} = \sigma_{12}^N|_{r=h} = \sigma_{32}^N|_{r=h} = 0, \quad (3.21)$$

де: $h = R - \sum_{p=1}^{N} h_p$ – сумарна товщина кільцевих шарів НМ.

Розглянемо граничні умови на циліндричній поверхні. Будемо вважати, що швидкість часток, що знаходяться на циліндричній поверхні не дорівнює нулю, і, відповідно, можливе прослизання. Це означає, що має місце рівність дотичних напружень кільцевого шару, що взаємодіє з циліндричною

поверхнею, яку віднесено до одиниці площі. Таким чином, будемо вважати, що на циліндричній поверхні $(r = R)$ виконується умова:

$$\sigma_{12}^{1}|_{r=R} = fN, \quad \sigma_{32}^{1}|_{r=R} = fN, \tag{3.22}$$

де: N - нормальний тиск; f - коефіцієнт тертя ковзання.

Нормальний тиск на одиницю площі буде дорівнювати:

$$P = |\vec{n}\sigma^{1}\vec{n}|\big|_{r=R} = |\sigma_{22}^{1}|\big|_{r=R} \tag{3.23}$$

Враховуючи (4.23) отримаємо:

$$\sigma_{12}^{1}|_{r=R} = f|\sigma_{22}^{1}|\big|_{r=R}, \quad \sigma_{32}^{1}|_{r=R} = f|\sigma_{22}^{1}|\big|_{r=R} \tag{3.24}$$

Базуючись на вищенаведеному, задача моделювання пошарового руху НМ по циліндричній повітропроникній поверхні, що обертається, складається з побудови розв'язку системи інтегро-диференційних нестаціонарних рівнянь (3.6), (3.10), що задовольняють початковим рівнянням (3.13) та граничним умовам (3.18), (3.19), (3.21), (3.24).

Для подальшого дослідження системи рівнянь (3.6), (3.10) наведемо її у циліндричній системі координат. Після низки перетворень будемо мати:

$$\frac{\partial u_z^n}{\partial t} + \vec{u}_n \nabla u_z^n = -\frac{1}{\rho_n}\frac{\partial P_n}{\partial z} + \nu_n \nabla u_z^n + F_z^n - g - A\omega_2^2 \sin \omega_2 t, \tag{3.25}$$

$$\frac{\partial u_r^n}{\partial t} + \vec{u}_n \nabla u_r^n - \frac{u_\phi^{n^2}}{r} = -\frac{1}{\rho_n}\frac{\partial P_n}{\partial z} + \nu_n \left(\Delta u_r^n - \frac{u_r^n}{r^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial u_\phi^n}{\partial \phi} \right) +$$

$$+ F_r^n + 2\omega_1 u_\phi^n + r\omega_1^2, \tag{3.26}$$

$$\frac{\partial u_\phi^n}{\partial t} + \vec{u}_n \nabla u_\phi^n + \frac{u_r^n u_\phi^n}{r} = -\frac{1}{\rho_r}\frac{\partial P_n}{\partial \phi} + \nu_n \left(\Delta u_\phi^n + \frac{2}{r^2}\frac{\partial u_r^n}{\partial \phi} - \frac{u_\phi^n}{r^2} \right) +$$

$$+ F_\phi^n - 2u_r^n \omega_1, \tag{3.27}$$

$$\frac{\partial u_z^n}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r u_r^n) + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\phi^n}{\partial \phi} = 0, \tag{3.28}$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{(1-\delta)}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \nu \Delta V_z - \frac{\rho_n}{\rho} F_z^n - g - A\omega_2^2 \sin \omega_2 t, \tag{3.29}$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = -\frac{(1-\delta)}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\Delta V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} \right) -$$

$$- \frac{\rho_n}{\rho} F_r^n + 2\omega_1 V_\phi + r\omega_1^2,$$

$$\frac{\partial V_\phi}{\partial t} = -\frac{(1-\delta)}{\rho r}\frac{\partial P}{\partial \phi} + \nu \left(\Delta V_\phi + \frac{2}{r^2}\frac{\partial V_r}{\partial \phi} - \frac{V_\phi}{r^2} \right) - \frac{\rho_n}{\rho} F_\phi^n - 2V_r \omega_1, \tag{3.30}$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rV_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial V_\phi}{\partial \phi}=0. \tag{3.31}$$

Тут:

$$F_z^n=\frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n}\left[\frac{\partial}{\partial t}(V_z-u_z^n)+\left(\vec{V}-\vec{u}_n\right)\nabla(V_z-u_z^n)\right]+F_n(V_z-u_z^n)+$$

$$+\frac{9\bar{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\bar{\rho}_n}\int_0^t\left[\frac{\partial(V_z-u_z^n)}{\partial t}+\left(\vec{V}-\vec{u}_n\right)\nabla(V_z-u_z^n)\right](t-\tau)^{-1/2}d\tau, \tag{3.32}$$

$$F_r^n=\frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n}\left[\frac{\partial}{\partial t}(V_r-u_r^n)+\left(\vec{V}-\vec{u}_n\right)\nabla(V_r-u_r^n)-\frac{\left(V_\phi-u_\phi^n\right)}{r}-2\omega_1(V_r-u_r^n)\right.$$
$$\left.-\omega_1^2 r\right]+$$

$$+F_n(V_r-u_r^n)$$
$$+\frac{9\bar{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\bar{\rho}_n}\int_0^t\left[\frac{\partial(V_r-u_r^n)}{\partial t}+\left(\vec{V}-\vec{u}_n\right)\nabla(V_r-u_r^n)-\frac{\left(V_\phi-u_\phi^n\right)^2}{r}-\right.$$

$$\left.-2\omega_1\left(V_\phi-u_\phi^n\right)-r\omega_1^2\right](t-\tau)^{-1/2}d\tau, \tag{3.33}$$

$$F_\phi^n=\frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n}\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(V_\phi-u_\phi^n\right)+\left(\vec{V}-\vec{u}_n\right)\nabla\left(V_\phi-u_\phi^n\right)+\frac{(V_r-u_r^n)\left(V_\phi-u_\phi^n\right)}{r}+\right.$$

$$+2(V_r - u_r^n)\omega_1] + F_n(V_\phi - u_\phi^n) + \frac{9\bar{\rho}\sqrt{\nu}}{2\sqrt{\pi}a_n\bar{\rho}_n}\int_0^t \left[\frac{\partial(V_\phi - u_\phi^n)}{\partial t} + (\vec{V} - \vec{u}_n)\nabla(V_\phi - u_\phi^n) + \frac{(V_r - u_r^n)(V_\phi - u_\phi^n)}{r} + 2(V_r - u_r^n)\omega_1\right](t-\tau)^{-1/2}d\tau, \quad (3.34)$$

де:

$\vec{u}_n = u_z^n\vec{e}_z + u_r^n\vec{e}_r + u_\phi^n\vec{e}_\phi$, $\vec{V} = V_z\vec{e}_z + V_r\vec{e}_r + V_\phi\vec{e}_\phi$, u_z^n, u_r^n, u_ϕ^n (V_z, V_r, V_ϕ) - осьова, радіальна та окружна проекції швидкості n -го кільцевого шару (осьова, радіальна та окружна проекції швидкості неперервної фази).

Нижче, базуючись на розв'язку системи рівнянь (3.25) – (3.31) будуть побудовані математичні моделі, що описують різноманітні режими руху НМ по повітропроникній циліндричні поверхні.

3.2. Розв'язок системи рівнянь, що моделює кільцевий, асиметричний, пошаровий, усталений рух насіннєвого матеріалу

При побудові моделі усталеного режиму руху будемо вважати, що нелінійні члени типу $(\vec{u}_n, \nabla)\vec{u}_n$ малі у порівнянні з іншими членами рівнянь. Крім того, знехтуємо осьовими коливаннями циліндричної поверхні, тобто $A \cong 0$ (A - амплітуда коливань). У такому випадку рівняння (3.30) – (3.31) після низки перетворень можна навести у вигляді:

$$O = -\frac{1}{\rho_n}\frac{\partial P_n}{\partial z} + \nu_n\Delta u_z^n + F_z^n - g, \quad (3.35)$$

$$O = -\frac{1}{\rho_n}\frac{\partial P_n}{\partial r} + \nu_n\left(\Delta u_r^n - \frac{u_r^n}{r^2}\right) + F_r^n + 2\omega_1 u_\phi^n + r\omega_1^2, \quad (3.36)$$

$$O = \nu_n\left(\Delta u_\phi^n - \frac{u_\phi^n}{r^2}\right) + F_\phi^n - 2u_r^n\omega_1, \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial u_z^n}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru_r^n) = 0, \quad (3.38)$$

$$O = -\frac{(1-\delta)}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \nu\Delta V_z - \frac{\rho_n}{\rho}F_z^n - g, \quad (3.39)$$

$$O = -\frac{(1-\delta)}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r} + \nu\left(\Delta V_r - \frac{V_r}{r^2}\right) - \frac{\rho_n}{\rho}F_r^n + 2\omega_1 V_\phi + r\omega_1^2, \quad (3.40)$$

$$O = \nu\ \left(\Delta u_\phi - \frac{u_\phi}{r^2}\right) - \frac{\rho_n}{\rho}F_\phi^n - 2V_r\omega_1, \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rV_r) = 0. \quad (3.42)$$

Де:

$$F_z^n = F_n(V_z - U_z^n), \quad F_r^n = \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_n}\left(\omega_1\left(u_\phi^n - V_\phi\right) - 0{,}5r\omega_1^2\right) + F_n(V_r - V_r^n), \quad (3.43)$$

$$F_\phi^n = \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_n}\omega_1(V_r - u_r^n) + F_n\left(V_\phi - u_\phi^n\right).$$

Оскільки розглядається тільки усталений режим руху, то, природньо припустити, що проекції швидкостей $\vec{u}_n$ і $\vec{V}$ не залежать від осьової координати z.

В такому випадку із рівняння (3.38) та (3.42) витікає, що компоненти u_r^n і V_r залежать від радіальної координати r наступним чином:

$$u_r^n = \frac{A_{1n}}{r}, \quad (3.44)$$

$$V_r = \frac{A_{2n}}{r}, \tag{3.45}$$

де: A_{1n} та A_{2n} – довільні постійні величини для n -го кільцевого шару НМ.

Далі, з рівнянь (3.36) і (3.40) витікає, що похідна по осьовій координаті z від тисків P_n і P є постійними величинами, а саме:

$$\frac{\partial P_n}{\partial z} = \Delta P_1, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = \Delta P_2 \tag{3.46}$$

Розглянемо рівняння (3.37) і (3.40). За допомогою (3.44) і (3.45) легко переконатись, що:

$$\Delta V_r - \frac{V_r}{r^2} = 0, \quad \Delta u_r^n - \frac{u_r^n}{r^2} = 0.$$

В такому випадку (3.37) і (3.40) можна навести у наступному вигляді:

$$\frac{\partial P_n}{\partial r} = \rho_n F_r^n + 2\rho_n \omega_1 u_\phi^n + \rho_n r \omega_1^2, \tag{3.47}$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{\rho_n}{1-\delta} F_r^n + \frac{2\rho\omega_1}{1-\delta} V_\phi + \frac{r\rho\omega_1^2}{1-\delta}. \tag{3.48}$$

У подальшому будемо вважати, що величина сили Коріоліса достатньо мала у порівнянні з величиною відцентрової сили. У такому випадку величина F_r^n спрощується:

$$F_r^n \cong -\frac{\bar{\rho} r}{2\bar{\rho}_n}\omega_1^2 + F_n(V_r - u_r^n). \tag{3.49}$$

Підставляючи (3.49) у (3.47), (3.48) та враховуючи (3.44), (3.45), одержимо:

$$\frac{\partial P_n}{\partial r} = \rho_n r\omega_1^2\left(1 - \frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n}\right) + \frac{\rho_n F_n(A_{1n} - A_{2n})}{r}, \tag{3.50}$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\rho r\omega_1^2}{1-\delta}\left(1 + \frac{\rho_n\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n\rho}\right) - \frac{\rho_n F_n(A_{2n} - A_{1n})}{(1-\delta)r}. \tag{3.51}$$

Інтегруючи рівняння (3.50), (3.51), одержимо:

$$P_n = \frac{\rho_n r^2\omega_1^2}{2}\left(1 - \frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n}\right) + \frac{\rho_n F_n(A_{1n} - A_{2n})}{\bar{h}_n}\ell n\frac{r}{\bar{h}_n} + B_{1n}, \tag{3.52}$$

$$P = \frac{\rho r^2\omega_1^2}{2(1-\delta)}\left(1 + \frac{\rho_n\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_n\rho}\right) - \frac{\rho_n F_n(A_{2n} - A_{1n})}{(1-\delta)\bar{h}_n}\ell n\frac{r}{\bar{h}_n} + B_{2n}. \tag{3.53}$$

Вираз для тисків справедливий для n -го кільцевого шару $\bar{h}_{n+1} < r < \bar{h}_n, \quad n = 0,1,2,\dots,N-1$:

$$\bar{h}_n = \begin{cases} R, n = 0, \\ R - \sum_{p=1}^{n} h_p, \ n \neq 0. \end{cases} \tag{3.54}$$

Величини B_{1n} і B_{2n} залежать тільки від координати z. Як слідує з (3.46) $B_{1n} = \Delta P_1 z, \quad B_{2n} = \Delta P_2 z.$

Розглянемо рівняння (3.36) і (3.39). Використаємо (3.43), в такому випадку будемо мати:

$$\frac{\partial^2 u_z^n}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_z^n}{\partial r} - \frac{F_n}{\nu_n} u_z^n + \frac{F_n}{\nu_n} V_z = \frac{\Delta P_1}{\rho_n \nu_n} + \frac{g}{\nu_n}, \tag{3.55}$$

$$\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_z}{\partial r} - \frac{F_n \rho_n}{\nu_\rho} V_z + \frac{\rho_n F_n}{\rho \nu} u_z^n = \frac{(1-\delta)\Delta P_2}{\rho \nu} + \frac{g}{\nu}. \tag{3.56}$$

Як видно, (3.55) і (3.56) – це система двох нелінійних диференційних рівнянь другого порядку. Загальний розв’язок системи є суперпозиція приватного розв’язку і загального розв’язку однорідної системи рівнянь (праві частини у (3.55) і (3.56) дорівнюють нулю).

Представимо рівняння (3.55) і (3.56) у наступній формі:

$$L(u_z^n) - a u_z^n + a V_z = b_1, \tag{3.57}$$

$$L(V_z) - b V_z + b u_z^n = b_2, \tag{3.58}$$

де: $L(\dots) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}$ – диференційний оператор, $a = F_n/\nu_n$, $b = F_n\rho_n/\nu\rho$, $b_1 = \frac{\Delta P_1}{\rho_n \nu_n} + \frac{g}{\nu_n}$, $b_2 = \frac{(1-\delta)\Delta P_2}{\rho\nu} + \frac{g}{\nu}$.

Помножимо рівняння (4.58) на a^{-1}, а рівняння (4.59) на b^{-1} і додаємо рівняння, що одержано. Одержимо:

$$L(u_n) = b_1 a^{-1} + b_2 b^{-1}, \tag{3.59}$$

де: $u_n = a^{-1}u_z^n + b^{-1}V_z$.

Загальний розв'язок рівняння (4.59) має вигляд:

$$u_n = C_{1n} + C_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right) + \frac{b_1 a^{-1} + b_2 b^{-1}}{4}. \tag{3.60}$$

де: C_{1n} і C_{2n} – постійні величини на межі n -го кільцевого шару.

Відповідно:

$$a^{-1}u_z^n + b^{-1}V_z = C_{1n} + C_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right) + \frac{b_1 a^{-1} + b_2 b^{-1}}{4}. \tag{3.61}$$

Із (3.62) одержимо:

$$u_z^n = -ab^{-1}V_z + aC_{1n} + aC_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right) + \frac{b_1+b_2b^{-1}a}{4}, \quad (3.62)$$

$$V_z = -a^{-1}bu_z^n + bC_{1n} + bC_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right) + \frac{b_1a^{-1}b+b_2}{4}. \quad (3.63)$$

Підставимо (3.63) і (3.64) у рівняння (3.58) і (3.59). Після низки перетворень одержимо:

$$L(u_z^n) - (a+b)u_z^n = -ab\left(C_{1n} + C_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right)\right) - \frac{b_1b+b_2a}{4} + b_1, \quad (3.64)$$

$$L(V_z) - (a+b)V_z = -ab\left(C_{1n} + C_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right)\right) - \frac{b_1b+b_2a}{4} + b_2. \quad (3.65)$$

Як бачимо з (3.64) і (3.65), розв’язок системи рівнянь (3.55) і (3.56) задовольняє одному і тому ж рівнянню, але з різними правими боками. Тому, для побудови загального розв’язку системи рівнянь (3.55), (3.56) достатньо отримати загальний розв’язок однорідного рівняння (3.64) і два приватних розв’язку з правими боками:

$$\bar{b}_1 = b_1 - ab\left(C_{1n} + C_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right)\right) - \frac{b_1b+b_2a}{4}, \quad (3.66)$$

$$\bar{b}_2 = b_2 - ab\left(C_{1n} + C_{2n}\ell n\left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right)\right) - \frac{b_1 b + b_2 a}{4}. \quad (3.67)$$

Розглянемо однорідне рівняння, яке відповідає рівнянню (3.65)

$$\frac{\partial^2 u_z^n}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_z^n}{\partial r} - \lambda_n^2 u_z = 0, \quad (3.68)$$

де:

$$\lambda_n^2 = \frac{F_n}{\nu_n}\left(1 + \frac{\rho_n \nu_n}{\rho \nu}\right). \quad (3.69)$$

Базуючись на [8] робимо висновок, що загальний розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$u_z^n = C_{3n} I_0(\lambda_n r) + C_{4n} K_0(\lambda_n r), \quad (3.70)$$

де: $I_0(\ldots)$ и $K_0(\ldots)$ - модифіковані Бесселеві функції першого і другого роду.

Приватний розв'язок рівняння (3.64) будуємо методом варіації постійних [8]. Відповідно даному методу приватний розв'язок наведемо у вигляді:

$$\bar{u}_z^n = B_{1n}(r) I_0(\lambda_n r) + B_{2_n}(r) K_0(\lambda_n r), \quad (3.71)$$

де: шукані функції $b_{1n}(r)$ і $b_{2n}(r)$ задовольняють системі рівнянь:

$$\dot{B}_{1n}I_0(\lambda_n r) + \dot{B}_{2_n}K_0(\lambda_n r) = 0,$$

$$\dot{B}_{1n}\dot{I}_0(\lambda_n r) + \dot{B}_{2_n}\dot{K}_0(\lambda_n r) = \bar{b}_1. \tag{3.72}$$

В даному випадку і надалі точкою позначено операцію диференціювання за аргументом. З (3.72) одержимо:

$$B_{1n} = \lambda_n \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_1\, K_0(\lambda_n r) r dr, \quad B_{2n} = -\lambda_n \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_1\, I_0(\lambda_n r) r dr. \tag{3.73}$$

Таким чином, загальний розв’язок рівняння (3.64) має вигляд:

$$u_z^n = C_{3n}I_0(\lambda_n r) + C_{4n}K_0(\lambda_n r) + \lambda_n \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_1\, K_0(\lambda_n r) r dr I_0(\lambda_n r) -$$

$$-\lambda_n \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_1\, I_0(\lambda_n r) r dr K_0(\lambda_n r). \tag{3.74}$$

За аналогією отримаємо загальний розв’язок рівняння (4.65)

$$V_z = C_{3n}I_0(\lambda_n r) + C_{4n}K_0(\lambda_n r) + \lambda_n \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_2\, K_0(\lambda_n r) r dr I_0(\lambda_n r) -$$

$$-\lambda_n \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_2\, I_0(\lambda_n r) r dr K_0(\lambda_n r). \tag{3.75}$$

Інтеграли у (3.74), (3.75) можуть бути вирахувані у аналітичній формі, які містять модифіковані Бесселеві функції. З цією ціллю будемо користуватись табличними інтегралами [40]:

$$\int_{x_1}^{x_2} xK_0(x)dx = x_1K_1(x_1) - x_2K_1(x_2), \tag{3.76}$$

$$\int_{x_1}^{x_2} xI_0(x)dx = x_2I_0(x_2) - x_1I_0(x_1), \tag{3.77}$$

$$\int_{x_1}^{x_2} x\ell nxK_0(x)dx = x_1\ell nx_1K_1(x_1) - x_2\ell nx_2K_1(x_2) + K_0(x_1) - K_0(x_2), \tag{3.78}$$

$$\int_{x_1}^{x_2} x\ell nxI_0(x)dx = x_2\ell nx_2I_1(x_2) - x_1\ell nx_1I_1(x_1) + I_0(x_1) - I_0(x_2). \tag{3.79}$$

Оскільки алгоритми вирахування інтегралів у (3.74) та (3.75) ідентичні, то можна обмежитись вираховуванням першого інтегралу у (3.74), а для інтегралів, що залишились, наведемо кінцеві результати.

Розглянемо інтеграл:

$$I_{n1} = \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_1\, K_0(\lambda_n r) r dr \tag{3.80}$$

Підставимо у (3.80) вирази для $\bar{b}_1$ (3.66). В такому випадку будемо мати:

$$I_{n1} = \left(b_1 - abC_{1n} - \frac{b_1 b + ab_2}{4}\right) \int_r^{\bar{h}_n} K_0(\lambda_n r) r dr$$

$$- abC_{2n} \int_r^{\bar{h}_n} \ell n\left(r/\bar{h}_n\right) K_0(\lambda_n r) r dr. \tag{3.81}$$

Зробимо у (3.81) заміну змінних $x = \lambda_n r$. В такому випадку (3.81) набуде вигляду:

$$I_{n1} = \lambda_n^{-2} D_{n1} \int_x^{\lambda_n \bar{h}_n} K_0(x) x dx + D_{n2} \lambda_n^{-2} \int_x^{\lambda_n \bar{h}_n} \left(\ell n x - \ell n \lambda_n \bar{h}_n\right) K_0(x) x dx,$$

де: $D_{n1} = \left(b_1 - abC_{1n} - \frac{b_1 b + ab_2}{4}\right), \quad D_{n2} = -abC_{2n}$ (3.82)

Достатньо використати формули (3.76) і (3.78).

Одержимо:

$$I_{n1} = \int_r^{\bar{h}_n} \bar{b}_1 K_0(\lambda_n r) r dr = \lambda_n^{-2} D_{n1} \left(\lambda_n r K_1(\lambda_n r) - \lambda_n \bar{h}_n K_1\left(\lambda_n \bar{h}_n\right)\right) +$$

$$+ \lambda_n^{-2} D_{n2} \left(r \lambda_n \ell n \left(\frac{r}{\bar{h}_n}\right) K_1(\lambda_n r) + K_0(\lambda_n r) - K_0\left(\lambda_n \bar{h}_n\right)\right). \tag{3.83}$$

Аналогічно для інших інтегралів маємо:

$$I_{n2} = \int_r^{\bar{b}_n} \bar{b}_1 \, I_0(\lambda_n r) r dr = \lambda_n^{-2} D_{n1} \left(\lambda_n \bar{h}_n I_1(\lambda_n \bar{h}_n) - \lambda_n r I_1(\lambda_n r) \right) +$$

$$+\lambda_n^{-2} D_{n2} \left(r \lambda_n \ell n \left(\frac{r}{\bar{h}_n} \right) I_1(\lambda_n r) + I_0(\lambda_n \bar{h}_n) - I_0(\lambda_n r) \right), \quad (3.84)$$

$$I_{n3} = \int_r^{\bar{b}_n} \bar{b}_2 \, K_0(\lambda_n r) r dr = \lambda_n^{-2} D_{n3} \left(\lambda_n r K_1(\lambda_n r) - \lambda_n \bar{h}_n K_1(\lambda_n \bar{h}_n) \right) +$$

$$+\lambda_n^{-2} D_{n4} \left(r \lambda_n \ell n \left(\frac{r}{\bar{h}_n} \right) K_1(\lambda_n r) + K_0(\lambda_n r) - K_0(\lambda_n \bar{h}_n) \right), \quad (3.85)$$

$$I_{n4} = \int_r^{\bar{b}_n} \bar{b}_2 \, I_0(\lambda_n r) r dr = \lambda_n^{-2} D_{n3} \left(\lambda_n \bar{h}_n I_1(\lambda_n \bar{h}_n) - \lambda_n r I_1(\lambda_n r) \right) +$$

$$+\lambda_n^{-2} D_{n4} \left(r \lambda_n \ell n \left(\frac{r}{\bar{h}_n} \right) I_1(\lambda_n r) + I_0(\lambda_n \bar{h}_n) - I_0(\lambda_n r) \right), \quad (3.86)$$

де:

$$D_{n3} = D_{n1} + b_2 - b_1, \quad D_{n4} = D_{n2}. \quad (3.87)$$

Перейдемо до дослідження рівнянь (3.38) і (3.41). Як і при розв’язку рівнянь (3.36) та (3.40) знехтуємо силою Коріоліса. У такому випадку початкові рівняння набудуть вигляду:

$$\frac{\partial^2 u_\phi^n}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\phi^n}{\partial r} - \left(\frac{F_n}{\nu_n} + \frac{1}{r^2}\right) u_\phi^n + \frac{F_n}{\nu_n} V_\phi = 0, \tag{3.88}$$

$$\frac{\partial^2 V_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_\phi}{\partial r} - \left(\frac{\rho_n F_n}{\rho\nu} + \frac{1}{r^2}\right) V_\phi + \frac{F_n \rho_n}{\rho\nu} u_\phi^n = 0. \tag{3.89}$$

Покажемо, що система рівнянь (3.88) , (3.89) зводиться до розв'язку одного рівняння. Для цього представимо (3.89), (3.90) у формі:

$$L\left(u_\phi^n\right) - c u_\phi^n + c V_\phi = 0, \tag{3.90}$$

$$L\left(V_\phi\right) - d V_\phi + d u_\phi^n = 0. \tag{3.91}$$

де: $L(\dots) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2}$ – диференційний оператор,

$$c = \frac{F_n}{\nu_n}, \quad d = \frac{\rho_n F_n}{\rho\nu}. \tag{3.92}$$

З (3.90) та (3.91) маємо:

$$L\left(c^{-1} u_\phi^n + d^{-1} V_\phi\right) = 0 \tag{3.93}$$

Загальний розв'язок рівняння (3.93) наведемо у вигляді:

$$c^{-1} u_\phi^n + d^{-1} V_\phi = P_{n1} r + P_{n2} r^{-1}, \tag{3.94}$$

де: P_{n1} и P_{n2} – довільні постійні величини для n -го кільцевого шару.

З (3.94) одержимо:

$$u_\phi^n = -cd^{-1}V_\phi + cP_{n1}r + cP_{n2}r^{-1}, \tag{3.95}$$

$$V_\phi = -dc^{-1}u_\phi^n + dP_{n1}r + dP_{n2}r^{-1}.$$

За допомогою (3.95) із (3.90) та (3.91) одержимо:

$$L\left(u_\phi^n\right) - (c+d)u_\phi^n + cd(P_{n1}r + P_{n2}r^{-1}) = 0, \tag{3.96}$$

$$L\left(V_\phi\right) - (c+d)V_\phi + cd(P_{n1}r + P_{n2}r^{-1}) = 0.$$

З (3.96) одержимо:

$$L\left(U_\phi^n - V_\phi\right) - (c+d)\left(U_\phi^n - V_\phi\right) = 0. \tag{3.97}$$

Загальний розв’язок рівняння (3.98) набуде вигляду:

$$U_\phi^n - V_\phi = Q_{n1}I_1(\lambda_n\Gamma) + Q_{n2}K_1(\lambda_n\Gamma), \tag{3.98}$$

де:

$$\lambda_n = \sqrt{c+d} = \sqrt{\frac{F_n(P\nu+\rho_n\nu)}{\rho\nu_n\nu}}, \tag{3.99}$$

Q_{n1} и Q_{n2} – довільні постійні величини на межі n -го кільцевого шару, $I_1(\cdots)$ і $K_1(\cdots)$ – модифікування беселевої функції першого і другого роду [8].

Для того, щоб отримати уявлення для загального розв'язку системи рівнянь (3.88), (3.89) достатньо визначити U_ϕ^n і V_ϕ з рівнянь (3.94) та (3.98). Після низки перетворень одержимо:

$$U_\phi^n = \frac{cd}{c+d}(P_{n1}\Gamma + P_{n2}\Gamma^{-1}) + \frac{c}{c+d}\big(Q_{n1}I_1(\lambda_n\Gamma) + Q_{n2}K_1(\lambda_n\Gamma)\big), \quad (3.100)$$

$$V_\phi = \frac{cd}{c+d}(P_{n1}\Gamma + P_{n2}\Gamma^{-1}) - \frac{d}{c+d}\big(Q_{n1}I_1(\lambda_n\Gamma) + Q_{n2}K_1(\lambda_n\Gamma)\big). \quad (3.101)$$

Таким чином, отримано загальний розв'язок системи рівнянь (3.36) – (3.43), що моделює встановлений режим руху n -го кільцевого шару. Компоненти швидкостей n -ой дискретної фази $\vec{U}_n$ і неперервної фази $\vec{V}$ має вид:

$$U_z^n = C_{3n}I_0(\lambda_n\Gamma) + C_{4n}K_0(\lambda_n\Gamma) + \lambda_n(I_{n1} - I_{n2}), \quad (3.102)$$

$$U_\Gamma^n = \frac{A_{1n}}{\Gamma}, \quad (3.103)$$

$$U_\phi^n = \frac{F_n\rho_n}{\rho\nu+\rho_n\nu_n}\Big[P_{n1}\Gamma + P_{n2}\Gamma^{-1} + \frac{\rho\nu}{\rho_m F_n}\big(Q_{n1}I_1(\lambda_n\Gamma) + Q_{n2}K_1(\lambda_n\Gamma)\big)\Big], \quad (3.104)$$

$$V_z = C_{3n}I_0(\lambda_n\Gamma) + C_{4n}K_0(\lambda_n\Gamma) + \lambda_n(I_{n3} - I_{n4}), \quad (3.105)$$

$$V_\Gamma = \frac{A_{2n}}{\Gamma}, \tag{3.106}$$

$$V_\phi = \frac{F_n\rho_n}{\rho\nu+\rho_n\nu_n}\left[P_{n1}\Gamma + P_{n2}\Gamma^{-1} + \frac{\nu_n}{F_n}\left(Q_{n1}I_1(\lambda_n\Gamma) + Q_{n2}K_1(\lambda_n\Gamma)\right)\right]. \tag{3.107}$$

Формули (3.102) – (3.107) справедливі для n -го кільцевого шару: $\bar{h}_{n+1} < \Gamma < \bar{h}_n$, $n = 0,1,\ 2,\ \ldots$, величини $\bar{h}_n$ визначаються за формулою (3.54). Величини I_{n1}, I_{n2}, I_{n3} і I_{n4} визначаються згідно формулам (3.83) – (3.87), а величина λ_n– за формулою (3.99).

Компоненти U_z^n і V_z можна навести у формі більш зручній для подальших розрахунків. З цією метою підставимо (3.83) – (3.87) у (3.102) і (3.105). Після ряду перетворень маємо:

$$U_z^n = \frac{b_1 b + b_{2a}}{4(a+b)}\Gamma^2 - \frac{a(b_1-b_2)}{(a+b)^2} + \frac{ab}{a+b}\left[C_m + C_{2n}\,ln\left(\frac{\Gamma}{\bar{h}_n}\right) + b^{-1}C_{3n}I_0(\lambda_n\Gamma)\right.$$
$$+$$
$$\left. + b^{-1}C_{4n}K_0(\lambda_n\Gamma)\right], \tag{3.108}$$

де:

$$b_1 = \frac{\Delta P_1}{\rho_n\nu_n} + \frac{g}{\nu_n}, \quad b_2 = \frac{(1-\delta)\Delta P_2}{\rho\nu} + \frac{g}{\nu}, \tag{3.109}$$

$$a = \frac{F_n}{\nu_n}, \quad b = \frac{F_n\rho_n}{\nu\rho}. \tag{3.110}$$

Як слідує з (3.108) – (3.110), компоненти швидкостей n -ої дискретної і неперервної фаз НМ залежать від довільних постійних величин A_{1n}, A_{2n}, C_{1n}, C_{2n}, C_{3n}, C_{4n}, P_{n1}, P_{n2}, $\rightleftarrows$ Q_{n1}, Q_{n2}. Для визначення цих величин скористаємось сполученням на границях розділення дискретних фаз, граничними умовами на циліндричній поверхні $(r = R)$ і вільній межі НМ:

$$(r = R - \sum_{P=1}^{N} h_P).$$

Розглянемо, насамперед, компоненти u_r^n і V_r. Виходячи із умови сполучення (3.17), з урахуванням (3.103) та (3.106), одержимо:

$$A_{1N} = A_{1N-1} = \cdots A_{11},$$

$$A_{2N} = A_{2N-1} = \cdots A_{21}. \qquad (3.111)$$

Далі, припустимо, що швидкість неперервної фази поблизу циліндричної поверхні $(r = R)$ співпадає з середньою швидкістю повітряного потоку V_0. В такому випадку, для компоненти швидкості V_r неперервної фази одержимо:

$$V_r = \frac{V_0 R}{r}. \qquad (3.112)$$

Підставивши (3.103) до умов (3.21) для вільної границі шару НМ $\left(r = \bar{h}_N = R - \sum_{p=1}^{N} h_p\right)$ будемо мати:

$$P_N + 2\mu_N \frac{A_{1N}}{\bar{h}_N^2} = 0. \quad (3.113)$$

Тут, згідно (3.52):

$$P_N = \frac{\rho_N \bar{h}_N^2 \omega_1^2}{2}\left(1 - \frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_N}\right). \quad (3.114)$$

З (3.113) та (3.114) визначимо величину A_{1N}:

$$A_{1N} = -\frac{\rho_N \bar{h}_N^4 \omega_1^2}{4\mu_N}\left(1 - \frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_N}\right).$$

Відповідно, для компоненти швидкості u_r^n дискретних фаз одержимо кінцеву залежність:

$$u_r^n = -\frac{\rho_N \bar{h}_N^4 \omega_1^2}{4\mu_N r}\left(1 - \frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_N}\right). \quad (3.115)$$

Перейдемо до визначення постійних величин у виразах для визначення компонент швидкості u_z^n і V_z.

Підставимо (3.108) і (3.109) у вигляді:

$$u_z^n = a_{1n} r^2 - a_{2n} + \bar{C}_{1n} + \bar{C}_{2n} \ell n \frac{r}{\bar{h}_n} + b_n \bar{C}_{3n} I_0(\lambda_n r) + b_n \bar{C}_{4n} K_0(\lambda_n r), \quad (3.116)$$

$$V_z = a_{1n} r^2 + a_{3n} + \bar{C}_{1n} + \bar{C}_{2n} \ell n \frac{r}{\bar{h}_n} - a_n \bar{C}_{3n} I_0(\lambda_n r) - a_n \bar{C}_{4n} K_0(\lambda_n r), \quad (3.117)$$

де:

$$\bar{C}_{pn} = C_{pn}\frac{F_n\rho_n}{\nu\rho+\nu_n\rho_n}, \quad p = 1,2,3,4, \quad n = 1,2,\dots,N, \tag{3.118}$$

$$a_{1n} = \frac{\Delta P_1+(1-\delta)\Delta P_2+g(\rho+\rho_n)}{4(\nu\rho+\nu_n\rho_n)}, \tag{3.119}$$

$$a_{2n} = \frac{\Delta P_1-\frac{\nu_n\rho_n}{\nu\rho}(1-\delta)\Delta P_2+g\rho_n\left(1-\frac{\nu_n}{\nu}\right)}{\rho_n F_n\left(1+\frac{\nu_n\rho_n}{\nu\rho}\right)^2}, \tag{3.120}$$

$$a_{3n} = a_{2n}\frac{\rho_n\nu_n}{\rho\nu}, \quad a_n = \frac{\nu\rho}{F_n\rho_n}, \quad b_n = \frac{\nu_n}{F_n}. \tag{3.121}$$

Підставимо (3.117) і (3.118) в умову сполучення на границі розділення $n+1$-ої дискретних фаз:

$$\mu_n\frac{\partial u_z^n}{\partial r}\Big|r = \bar{h}_n + 0 = \mu_{n=1}\frac{\partial u_z^{n+1}}{\partial r}\Big|r = \bar{b}_n - 0\text{'} \qquad \frac{\partial V_z}{\partial r}\Big|r = \bar{h}_n + 0 = \frac{\partial V_z}{\partial r}\Big|r = \bar{h}_n - 0\text{.}$$

Після низки перетворень одержимо наступне співвідношення:

$$\mu_n(X_n + b_nY_n) = \mu_{n+1}(X_{n+1} + b_{n+1}Y_{n+1}), \tag{3.122}$$

$$X_n - a_nY_n = X_{n+1} - a_{n+1}Y_{n+1}, \tag{3.123}$$

де:

$$X_n = 2a_{1n}\bar{h}_n + \frac{\bar{C}_{2n}}{\bar{h}_n}, \tag{3.124}$$

$$Y_n = \lambda_n \left(\bar{C}_{3n} I_1(\lambda_n \bar{h}_n) - \bar{C}_{4n} K_1(\lambda_n \bar{h}_n)\right). \tag{3.125}$$

Підставимо (3.122) і (4.123) у матричні формі:

$$A_n \begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \end{pmatrix} = A_{n+1} \begin{pmatrix} X_{n+1} \\ Y_{n+1} \end{pmatrix}, \tag{3.126}$$

де:

$$A_n = \begin{pmatrix} \mu_n, & \mu_n b_n \\ 1, & -a_n \end{pmatrix}. \tag{3.127}$$

Дійсно:

$$det\, A_n = -\mu_n(a_n + b_n) \neq 0.$$

Тому з (3.128) маємо:

$$\begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \end{pmatrix} = A_n^{-1} A_{n+1} \begin{pmatrix} X_{n+1} \\ Y_{n+1} \end{pmatrix}, \tag{3.128}$$

$$n = 1,2, \dots, N-1.$$

З (3.128) одержимо:

$$\begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \end{pmatrix} = A_n^{-1} A_N \begin{pmatrix} X_N \\ Y_N \end{pmatrix}, \tag{3.129}$$

$$n = 1,2, \dots, N-1.$$

Скористаємось граничною умовою (3.21) на вільній поверхні НМ, тобто при $r = \bar{h}_N = R - \sum_{p=1}^{N} h_p$.

$$\left.\frac{\partial u_z^N}{\partial r}\right|_{r=\bar{h}_N} = 0, \quad \left.\frac{\partial V_z}{\partial r}\right|_{r=\bar{h}_N} = 0. \tag{3.130}$$

Підставимо (3.119), (3.118) у (3.131) будемо мати:

$$2a_{1N}\bar{h}_N + \frac{\bar{C}_{2N}}{\bar{h}_N} + b_N\lambda_N\left[\bar{C}_{3N}I_1\left(\lambda_N\bar{h}_N\right) - \bar{C}_{4N}K_1\left(\lambda_N\bar{h}_N\right)\right] = 0, \tag{3.132}$$

$$2a_{1N}\bar{h}_N + \frac{\bar{C}_{2N}}{\bar{h}_N} - a_N\lambda_N\left[\bar{C}_{3N}I_1\left(\lambda_N\bar{h}_N\right) - \bar{C}_{4N}K_1\left(\lambda_N\bar{h}_N\right)\right] = 0. \tag{3.133}$$

Згідно (3.125) та (3.126), рівняння (3.132) і (3.133) набуває вигляду:

$$X_N + b_N Y_N = 0, \quad X_N - a_N Y_N = 0 \tag{3.134}$$

З (3.134) одержимо:

$$X_N = 0, \quad Y_N = 0. \tag{3.135}$$

Відповідно, за допомогою (3.135) і (3.130), одержимо:

$$X_n = \ Y_n = 0, \quad n = 1,2, \dots, N. \tag{3.136}$$

Таким чином, встановлено, що:

$$\bar{C}_{2n} = -2a_{1n}\bar{h}_n{}^2, \tag{3.137}$$

$$\bar{C}_{3n} I_1\left(\lambda_n \bar{h}_n\right) - \bar{C}_{4n} K_1\left(\lambda_n \bar{h}_n\right) = 0, \tag{3.138}$$

$$n = 1,2, \dots, N.$$

Звернемось до умов сполучення (3.17), які для компонент u_z^n і V_z мають вид:

$$u_z^n|_{r = \bar{h}_n + 0} = u_z^{n+1}|_{r = \bar{h}_n - 0}, \ V_z|_{r = \bar{h}_n + 0} = V_z|_{r = \bar{h}_n - 0}, \tag{3.139}$$

$$n = 1,2, \dots, N - 1.$$

Після підстановки (3.117) і (3.118) у (3.139) одержимо наступні реккурентні (кожна наступна величина визначається з попередньої) формули:

$$\bar{C}_{1n} + b_n Z_n + d_{1n} = \bar{C}_{1n+1} + b_{n+1} Z_{n+1}, \tag{3.140}$$

$$\bar{C}_{1n} - a_n Z_n + d_{2n} = \bar{C}_{1n+1} - a_{n+1} Z_{n+1}, \tag{3.141}$$

$$n = 1,2, \dots, N-1.$$

Тут введено позначення:

$$Z_n = \bar{C}_{3n} I_0(\lambda_n \bar{h}_n) + \bar{C}_{4n} K_0(\lambda_n \bar{h}_n), \tag{3.142}$$

$$d_{1n} = \bar{h}_n{}^2 \left(a_{1n} - a_{1n+1} + 2a_{1n+1} \ell n \frac{\bar{h}_n}{\bar{h}_{n+1}} \right) + a_{2n+1} - a_{2n}, \tag{3.143}$$

$$d_{2n} = d_{1n} + a_{3n} - a_{3n+1} - a_{2n+1} + a_{2n}. \tag{3.144}$$

Представимо формули (3.140), (3.141) у матричній формі:

$$A_{n+1} \begin{pmatrix} \bar{C}_{1n+1} \\ Z_{n+1} \end{pmatrix} = A_n \begin{pmatrix} \bar{C}_{1n} \\ Z_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{1n} \\ d_{2n} \end{pmatrix}, \tag{3.145}$$

де:

$$A_n = \begin{pmatrix} 1, & b_n \\ 1, & -a_n \end{pmatrix}.$$

Так, як $det\, A_n = -(a_n + b_n) \neq 0$, то (3.146) можна навести у формі:

$$\begin{pmatrix} \bar{C}_{1n+1} \\ Z_{n+1} \end{pmatrix} = A_{n+1}^{-1} A_n \begin{pmatrix} \bar{C}_{1n} \\ Z_n \end{pmatrix} + A_{n+1}^{-1} \begin{pmatrix} d_{1n} \\ d_{2n} \end{pmatrix}. \quad (3.146)$$

З (3.146) одержимо:

$$\begin{pmatrix} \bar{C}_{1n} \\ Z_n \end{pmatrix} = A_n^{-1} \left[A_1 \begin{pmatrix} \bar{C}_{11} \\ Z_1 \end{pmatrix} + \sum_{p=1}^{n-1} \begin{pmatrix} d_{1p} \\ d_{2p} \end{pmatrix} \right], \quad (3.147)$$

$$n = 2,3, \dots, N.$$

Як видно з (3.147), величини C_{1n}, Z_n для значення індексу $n = 2,3, \dots, N$ виражається через величини C_{11}, Z_1 и d_{1n}, d_{2n}.

За допомогою (3.147) маємо:

$$\bar{C}_{1n} = \bar{C}_{11} + \frac{a_n b_1 - a_1 b_n}{a_n + b_n} Z_1 + \frac{1}{a_n + b_n} \sum_{p=1}^{n-1} \left(a_n d_{1p} + b_n d_{2p} \right), \quad (3.148)$$

$$Z_n = Z_1 \frac{a_1 + b_1}{a_n + b_n} + \frac{1}{a_n + b_n} \sum_{p=1}^{n-1} \left(d_{1p} - d_{2p} \right), \quad (3.149)$$

$n = 2,3, \dots, N.$

При одержанні формул (3.148), (3.149) було враховано, що зворотна матриця A_n^{-1}має вигляд:

$$A_n^{-1} = \frac{1}{a_n + b_n}\begin{pmatrix} a_n, & b_n \\ 1, & -1 \end{pmatrix}.$$

Для визначення величин $\bar{C}_{11}$ и Z_1 будемо користуватись граничними умовами на циліндричній поверхні $(r = R)$, які зводяться до наступних співвідношень:

$$\mu_1 \frac{\partial u_z^1}{\partial r}\Big|_{r = R} = fN, \tag{3.150}$$

$$V_z|_{r = R} = 0.$$

Де: f – коефіцієнт тертя ковзання вздовж твірної циліндричної поверхні, ρ_1 і h_1 – відповідно, приведена густина та товщина шару частинок, що знаходяться у нижньому елементарному шарі та рухаються безпосередньо по робочій поверхні, N - сила нормального тиску на одиницю площі:

$$N = 0{,}5\rho_1(2R - h_1)h_1\omega_1^2 \tag{3.151}$$

Підставимо (3.117) та (3.118) у (3.151).

Виконавши необхідні математичні перетворення, одержимо:

$$2a_{11}R + \frac{\bar{C}_{21}}{R} + b_1\lambda_1\left(\bar{C}_{31}I_1(\lambda_1 R) - \bar{C}_{41}K_1(\lambda_1 R)\right) = \frac{fN}{\mu_1}, \qquad (3.152)$$

$$a_{11}R^2 + a_{31} + \bar{C}_{11} + \bar{C}_{21}\ell n\frac{R}{\bar{h}_1} - a_1\bar{C}_{31}I_0(\lambda_1 R) - a_1\bar{C}_{41}K_0(\lambda_1 R) = 0. \qquad (3.153)$$

Скористаємось співвідношеннями (3.137) і (3.138), підставимо (3.137) у (3.152) і (3.153), а з (3.138) визначимо $\bar{C}_{31}$ через $\bar{C}_{41}$:

$$\bar{C}_{31} = \bar{C}_{41}\frac{K_1(\lambda_1\bar{h}_1)}{I_1(\lambda_1\bar{h}_1)}.$$

В такому випадку (3.152) та (3.153) перетворюються до вигляду:

$$\frac{2a_{11}}{R}\left(R^2 - \bar{h}_1{}^2\right) + b_1\lambda_1\bar{C}_{41}\left(\frac{K_1(\lambda_1\bar{h}_1)}{I_1(\lambda_1\bar{h}_1)}I_1(\lambda_1 R) - K_1(\lambda_1 R)\right) = \frac{fN}{\mu_1}, \qquad (3.154)$$

$$a_{11}\left(R^2 - 2\bar{h}_1{}^2\ell n\frac{R}{\bar{h}_1}\right) + \bar{C}_{11} - a_1\bar{C}_{41}\left(\frac{K_1(\lambda_1\bar{h}_1)}{I_1(\lambda_1\bar{h}_1)}I_0(\lambda_1 R) - K_0(\lambda_1 R)\right) = 0 \qquad (3.155)$$

З (3.155) знаходимо величину $\bar{C}_{41}$, а з (3.156) величину $\bar{C}_{11}$:

$$\bar{C}_{41} = \frac{\left(2a_{11}\left(\bar{h}_1{}^2 - R^2\right) + fNR\mu_1^{-1}\right)I_1(\lambda_1\bar{h}_1)}{Rb_1\lambda_1\left(K_1(\lambda_1\bar{h}_1)I_1(\lambda_1 R) - K_1(\lambda_1 R)I_1(\lambda_1\bar{h}_1)\right)}, \qquad (3.156)$$

$$\bar{C}_{11} = a_{11}\frac{\left(2a_{11}\left(\bar{h}_1{}^2 - R^2\right) + fNR\mu_1^{-1}\right)\left(K_1(\lambda_1\bar{h}_1)I_0(\lambda_1 R) - K_0(\lambda_1 R)I_1(\lambda_1\bar{h}_1)\right)}{Rb_1\lambda_1\left(K_1(\lambda_1\bar{h}_1)I_1(\lambda_1 R) - K_1(\lambda_1 R)I_1(\lambda_1\bar{h}_1)\right)}$$

$$-$$

$$-a_{11}\left(R^2 - 2\bar{h}_1{}^2\ell n\frac{R}{\bar{h}_1}\right). \qquad (3.157)$$

Далі, з (3.142) одержимо:

$$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{C}_{41}}{I_1(\lambda_1\bar{h}_1)\lambda_1\bar{h}_1} = \frac{2a_{11}\left(\bar{h}_1{}^2 - R^2\right) + fNR\mu_1^{-1}}{Rb_1\lambda_1^2\bar{h}_1\left(K_1(\lambda_1\bar{h}_1)I_1(\lambda_1 R) - K_1(\lambda_1 R)I_1(\lambda_1\bar{h}_1)\right)}. \qquad (3.158)$$

Таким чином, за допомогою формул (3.157) та (3.158)можна визначити величини $\bar{C}_{11}$ і $\bar{Z}_1$, а за допомогою (3.148) і (3.149) знаходимо величини $\bar{C}_{1n}$ і Z_n, $n = 2,3,\ldots,N$.

Для визначення величин $\bar{C}_{3n}$ і $\bar{C}_{4n}$ скористаємось співвідношеннями (3.138) і (3.142), з яких одержимо:

$$\bar{C}_{3n} = -\lambda_n\bar{h}_n K_1(\lambda_n\bar{h}_n)Z_n, \qquad (3.159)$$

$$\bar{C}_{4n} = -\lambda_n\bar{h}_n I_1(\lambda_n\bar{h}_n)Z_n. \qquad (3.160)$$

Таким чином, формули (3.148), (3.149) і (3.156) – (3.160) дозволяють розрахувати компоненти швидкості u_z^n і V_z дискретної і неперервної фаз НМ.

Перейдемо до знаходження величин P_{n1}, P_{n2}, Q_{n1} и Q_{n2}, що входять до формул для компоненти швидкості u_ϕ^n, V_ϕ (див. (3.105), (3.108)). З цією метою скористаємось умовою співдотичності (3.17) і (3.18), які мають вигляд:

$$u_\phi^n\big|_{r=\bar{h}_n+0} = u_\phi^n\big|_{r=\bar{h}_n-0}, \qquad V_\phi\big|_{r=\bar{h}_n+0} = V_\phi\big|_{r=\bar{h}_n-0}, \tag{3.161}$$

$$\mu_n \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\phi^n}{r}\right)\Big|_{r=\bar{h}_n+0} = \mu_{n+1} \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\phi^n}{r}\right)\Big|_{r=\bar{h}_n-0}, \tag{3.162}$$

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{V_\phi}{r}\right)\Big|_{r=\bar{h}_n+0} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{V_\phi}{r}\right)\Big|_{r=\bar{h}_n-0}. \tag{3.163}$$

Підставимо рівняння для u_ϕ^n і V_ϕ у вигляді:

$$u_\phi^n = \bar{P}_{n1} r + \bar{P}_{n2} r^{-1} + a_n\Big(\bar{Q}_{n1} I_1(\lambda_n r) + \bar{Q}_{n2} K_1(\lambda_n r)\Big), \tag{3.164}$$

$$V_\phi = \bar{P}_{n1} r + \bar{P}_{n2} r^{-1} - b_n\Big(\bar{Q}_{n1} I_1(\lambda_n r) + \bar{Q}_{n2} K_1(\lambda_n r)\Big), \tag{3.165}$$

де: величини a_n і b_n визначаються за формулою (3.123)

$$\bar{P}_{np} = P_{np} \frac{F_n \rho_n}{\rho\nu + \rho_n \nu_n}, \qquad \bar{Q}_{np} = Q_{np} \frac{F_n \rho_n}{\rho\nu + \rho_n \nu_n}. \tag{3.166}$$

Підставивши (3.164), (3.165) в умови сполучення (3.161). Одержимо:

$$\bar{P}_{n1}\bar{h}_n + \bar{P}_{n2}{\bar{h}_n}^{-1} + a_n X_n = \bar{P}_{n+11}\bar{h}_n + \bar{P}_{n+12}{\bar{h}_n}^{-1} + a_{n+1} X_{n+1}, \tag{3.167}$$

$$\bar{P}_{n1}\bar{h}_n + \bar{P}_{n2}\bar{h}_n{}^{-1} - b_n X_n = \bar{P}_{n+11}\bar{h}_n + \bar{P}_{n+12}\bar{h}_n{}^{-1} - b_{n+1}X_{n+1}, \quad (3.168)$$

де:

$$X_n = \bar{Q}_{n1} I_1(\lambda_n \bar{h}_n) + \bar{Q}_{n2} K_1(\lambda_n \bar{h}_n) \quad (3.169)$$

Віднімемо з (3.167) рівняння (3.168), одержимо:

$$(a_n + b_n)X_n = (a_{n+1} + b_{n+1})X_{n+1}, \quad (3.170)$$

$$n = 1,2, \dots, N-1.$$

З (3.170) одержимо:

$$X_n = \frac{a_1 + b_1}{a_n + b_n} X_1. \quad (3.171)$$

Скористаємось умовами сполучення (3.162), (3.163). Підставимо (3.164), (3.165) у (3.162), (3.163) і використаємо формули для модифікації Бесселивих функцій [40]:

$$z\dot{K}_1(z) - K_1(z) = -zK_2(z),$$

$$z\dot{I}_1(z) - I_1(z) = -zI_2(z),$$

Після низки перетворень, одержимо:

$$\frac{2\bar{P}_{n2}}{\bar{h}_n} + b_n Y_n = \frac{2\bar{P}_{n+12}}{\bar{h}_n} + b_{n+1} Y_{n+1}, \tag{3.172}$$

$$\mu_n \left(\frac{2\bar{P}_{n2}}{\bar{h}_n} - a_n Y_n \right) = \mu_{n+1} \left(\frac{2\bar{P}_{n+12}}{\bar{h}_n} - a_{n+1} Y_{n+1} \right). \tag{3.173}$$

Тут:

$$Y_n = \lambda_n \bar{h}_n \left(\bar{Q}_{n1} I_2(\lambda_n \bar{h}_n) - \bar{Q}_{n2} K_2(\lambda_n \bar{h}_n) \right). \tag{3.174}$$

Представимо (3.172), (3.173) у матричній формі:

$$B_n \begin{pmatrix} \bar{P}_{n2} \\ Y_n \end{pmatrix} = B_{n+1} \begin{pmatrix} \bar{P}_{n+12} \\ Y_{n+1} \end{pmatrix}, \tag{3.175}$$

де:

$$B_n = \begin{pmatrix} \frac{2}{\bar{h}_n}, & b_n \\ \\ \frac{2\mu_n}{\bar{h}_n}, & -\mu_n a_n \end{pmatrix} \tag{3.176}$$

Легко впевнитись, що матриця (3.176) є квадратичною і такою, що невироджена ($det\, B_n \neq 0$). У такому випадку з (3.175) одержимо:

$$\begin{pmatrix} \bar{P}_{n2} \\ Y_n \end{pmatrix} = B_n^{-1} B_N \begin{pmatrix} \bar{P}_{N2} \\ Y_N \end{pmatrix}, \quad n = 1,2,\dots,N-1. \tag{3.177}$$

Тут B_n^{-1} – матриця, що є зворотною до матриці B_n.

Як видно з (3.177), величини $\bar{P}_{n2}$ и Y_n, $n = 1,2,\dots,N-1$ визначаються через $\bar{P}_{N2}$ і Y_N. Для визначення останніх розглянемо краєві умови на вільній поверхні НМ $\left(r = \bar{h}_N\right)$. Згідно з (3.21), одержимо:

$$\frac{2\bar{P}_{N2}}{h_N} - b_N Y_N = 0 \tag{3.178}$$

$$\frac{2P_{N2}}{h_N} + a_N Y_N = 0$$

З (3.178) маємо: $P_{N2} = X_N = 0$.

Відповідно, з (3.177) для значень індексу $n = 1,2,\dots,N$

$$\bar{P}_{n2} = X_n = 0. \tag{3.179}$$

Таким чином, визначено, що коефіцієнти $\bar{Q}_{n1}$ та $\bar{Q}_{n2}$ пов’язані наступними співвідношеннями:

$$\bar{Q}_{n1} I_2\left(\lambda_n \bar{h}_n\right) - \bar{Q}_{n2} K_2\left(\lambda_n \bar{h}_n\right) = 0. \tag{3.180}$$

Для знаходження величин $\bar{P}_{n1}$, $\bar{Q}_{n1}$ та $\bar{Q}_{n2}$ будемо користуватись граничними умовами на циліндричній робочій поверхні. Крім того, визначимо, що компонента відносної швидкості V_ϕ неперервної фази перетворювалась у нуль на циліндричні поверхні $(r = R)$. Ця умова достатньо відома у гідродинаміці (на твердій нерухомій поверхні швидкість газоподібного середовища дорівнює нулю).

Підставимо (3.165) при значенні індексу $n = 1$ у (3.22).

Одержимо:

$$\mu_1 \left(\frac{\partial u_\phi^1}{\partial r} - \frac{u_\phi^1}{r} \right) \Big|_{r = R} = f_1 N, \tag{3.181}$$

Раніше було введено коефіцієнт ковзання f частинок НМ вздовж осі Z. Слід відмітити, що в загальному вигляді $f \neq f_1$.

З (3.182) одержимо:

$$\bar{Q}_{11} I_2(\lambda_1 R) - \bar{Q}_{12} K_2(\lambda_1 R) = \frac{f_1}{\mu_1 a_1 \lambda_1} N. \tag{3.182}$$

Силу нормального тиску N можна визначити у вигляді:

$$N = 0{,}5 \rho_1 \left(2R - \bar{h}_1\right) \bar{h}_1 \omega_1^2.$$

З (3.182) і (3.180) визначимо $\bar{Q}_{11}$ і $\bar{Q}_{12}$:

$$\bar{Q}_{11} = -\frac{f_1 N}{\mu_1 \lambda_1 a_1 \Delta} K_2\left(\lambda_1 \bar{h}_1\right), \tag{3.183}$$

$$\bar{Q}_{12} = -\frac{f_1 N}{\mu_1 \lambda_1 a_1 \Delta} I_2\left(\lambda_1 \bar{h}_1\right), \tag{3.184}$$

де:

$$\Delta = I_2\left(\lambda_1 \bar{h}_1\right) K_2(\lambda_1 R) - I_2(\lambda_1 R) K_2\left(\lambda_1 \bar{h}_1\right).$$

За допомогою (3.183) , (3.184) і (3.171) визначимо X_n:

$$X_n = -\frac{(a_1+b_1) f_1 N}{(a_n+b_n)\mu_1 \lambda_1^2 a_1 \Delta \bar{h}_1}. \tag{3.185}$$

Скориставшись (3.185) і (3.180) визначимо $\bar{Q}_{n1}$ і $\bar{Q}_{n2}$ для значень індексу $n = 2,3, \dots, N$

$$\bar{Q}_{n1} = -\frac{(a_1+b_1) f_1 N K_2\left(\lambda_n \bar{h}_n\right) \lambda_n \bar{h}_n}{(a_n+b_n)\mu_1 \lambda_1^2 a_1 \Delta \bar{h}_1}, \tag{3.186}$$

$$\bar{Q}_{n2} = -\frac{(a_1+b_1) f_1 N I_2\left(\lambda_n \bar{h}_n\right) \lambda_n \bar{h}_n}{(a_n+b_n)\mu_1 \lambda_1^2 a_1 \Delta \bar{h}_1}. \tag{3.187}$$

Для визначення $\bar{P}_{n1}$ скористаємось рівнянням (3.167). Одержимо:

$$\bar{P}_{n+11} = \bar{P}_{n1} + D_n, \quad n = 1,2, \dots, N-1. \tag{3.188}$$

Тут:

$$D_n = X_1 \frac{(a_1 + b_1)(a_n b_{n+1} - a_{n+1} b_n)}{(a_n + b_n)(a_{n+1} + b_{n+1})} =$$

$$= \frac{f_1 N (a_{n+1} b_n - a_n b_{n+1})(a_1 + b_1)}{\mu_1 \lambda_1^2 a_1 \Delta \bar{h}_1 (a_n + b_n)(a_{n+1} + b_{n+1})}. \quad (3.189)$$

З (3.188) одержимо:

$$\bar{P}_{n1} = \bar{P}_{11} + \frac{f_1 N (a_1 + b_1)}{\mu_1 \lambda_1^2 a_1 \Delta \bar{h}_1} \sum_{p=1}^{n-1} \frac{a_{p+1} b_p - a_p b_{p+1}}{(a_p + b_p)(a_{p+1} + b_{p+1})}, \quad (3.190)$$

$$n = 2,3, \dots, N.$$

Відповідно, для визначення $\bar{P}_{n1}$ достатньо знайти величину $\bar{P}_{11}$. Для цієї мети потрібно, щоб компонента відносної швидкості V_ϕ неперервної фази оберталась у нуль на циліндричній робочій поверхні $(r = R)$. Підставивши у (3.166) $r = R$, одержимо:

$$\bar{P}_{11} = \frac{b_1}{R} \left(\bar{Q}_{11} I_1(\lambda_1 R) + \bar{Q}_{12} K_1(\lambda_1 R) \right) \quad (3.191)$$

Підставимо у (3.191) значення $\bar{Q}_{11}$ і $\bar{Q}_{12}$ з (4.183) та (4.184). Після перетворення одержимо:

$$\bar{P}_{11} = \frac{b_1 f_1 N \left(I_1(\lambda_1 R) K_2(\lambda_1 \bar{h}_1) + K_1(\lambda_1 R) I_2(\lambda_1 \bar{h}_1) \right)}{R \mu_1 \lambda_1 a_1 \left(K_2(\lambda_1 \bar{h}_1) I_2(\lambda_1 R) - I_2(\lambda_1 \bar{h}_1) K_2(\lambda_1 R) \right)}. \quad (3.192)$$

Таким чином, за допомогою (3.164) – (3.166) та (3.183), (3.184), (3.190) та (3.192) можна визначити компоненти u_ϕ^n та V_ϕ відносної швидкості дискретних та неперервної фаз шарів частинок НМ.

Таким чином, побудовано механіко-математичну модель, яка описує стаціонарний асиметричний режим руху частинок НМ. Шар частинок НМ в цій моделі розглянуто, як N - фазна структура, що утворена дискретними і неперервною компонентою. Поля швидкостей цих компонент, як і наведено вище, визначаються:

$$u_z^n = A_{1n}\left(r^2 - 2\bar{h}_n{}^2 \ell n \frac{r}{\bar{h}_n}\right) - A_{2n} + A_{3n} + \tag{3.193}$$

$$+\mu_n\left(A_{4n} I_0(\lambda_n r) + A_{5n} K_0(\lambda_n r)\right),$$

$$V_z = A_{1n}\left(r^2 - 2\bar{h}_n{}^2 \ell n \frac{r}{\bar{h}_n}\right) + \frac{\mu_n}{\mu} A_{2n} + A_{3n} - \tag{3.194}$$

$$-\mu\left(A_{4n} I_0(\lambda_n r) + A_{5n} K_0(\lambda_n r)\right),$$

де:

$$A_{1n} = \frac{\Delta P_1 + (1-\delta)\Delta P_2 + g(\rho + \rho_n)}{4(\mu + \mu_n)},$$

$$A_{2n} = \frac{\Delta P_1 - \frac{\mu_n}{\mu}(1-\delta)\Delta P_2 + g\rho_n\left(1 - \frac{\nu_n}{\nu}\right)}{F_n \rho_n \left(1 + \frac{\mu_n}{\mu}\right)^2},$$

$$A_{3n} = \frac{\left(\bar{h}_1{}^2 - R^2\right)(2A_{11} - 0.5f\omega_1^2 R\nu_1^{-1})}{R\Delta_1}\left(\frac{\mu\Delta_2}{\mu_1\sqrt{\frac{F_1}{\nu_1}\left(1+\frac{\mu_1}{\mu}\right)}}\right.$$

$$\left. + \frac{\mu_1 - \mu}{F_1\rho_1\bar{h}_1\left(1+\frac{\mu_n}{\mu}\right)\left(1+\frac{\mu_1}{\mu}\right)}\right) +$$

$$+A_{21}\frac{\mu_n\mu_1-\mu^2}{\mu(\mu+\mu_n)} + A_{2n}\left(1-\frac{\mu_n}{\mu}\right) + \sum_{p=1}^{n-1}\bar{h}_p{}^2\left[A_{1p} - A_{1p+1}\left(1 - 2\ell n\frac{\bar{h}_p}{\bar{h}_{p+1}}\right)\right],$$

$$A_{4n} = -\lambda_n\bar{h}_n K_1(\lambda_n\bar{h}_n)B_n,$$

$$A_{5n} = -\lambda_n\bar{h}_n I_1(\lambda_n\bar{h}_n)B_n,$$

$$B_n = \frac{\mu\left(\bar{h}_1{}^2 - R^2\right)(2A_{11} - 0.5f\omega_1^2 R\nu_1^{-1})}{F_1\rho_1 R\bar{h}_1(\mu+\mu_n)\Delta_1} +$$

$$+(\mu_n+\mu)^{-1}\left[A_{2n}\left(1+\frac{\mu_n}{\mu_1}\right) - A_{21}\left(1+\frac{\mu_1}{\mu}\right)\right],$$

$$\Delta_1 = K_1(\lambda_1\bar{h}_1)I_1(\lambda_1 R) - K_1(\lambda_1 R)I_1(\lambda_1\bar{h}_1),$$

$$\Delta_2 = K_1(\lambda_1\bar{h}_1)I_0(\lambda_1 R) - K_0(\lambda_1 R)I_1(\lambda_1\bar{h}_1),$$

Азимутальні компоненти n -ої дискретної та неперервної фаз:

$$u_\phi^n = Q_n r + \mu\big(Q_{n1} I_1(\lambda_n r) + Q_{n2} K_1(\lambda_n r)\big), \tag{3.195}$$

$$V_\phi = Q_n r - \mu_n\big(Q_{n1} I_1(\lambda_n r) + Q_{n2} K_1(\lambda_n r)\big), \tag{3.196}$$

де:

$$Q_{n1} = \frac{0.5\bar{h}_n\sqrt{\frac{F_n}{\nu_n}\left(1+\frac{\mu_n}{\mu}\right)}\left(R^2 - \bar{h}_1{}^2\right) f_1\omega_1^2}{F_1(\mu+\mu_n)\Delta_3} K_2\big(\lambda_n\bar{h}_n\big),$$

$$Q_{n2} = \frac{0.5\bar{h}_n\sqrt{\frac{F_n}{\nu_n}\left(1+\frac{\mu_n}{\mu}\right)}\left(R^2 - \bar{h}_1{}^2\right) f_1\omega_1^2}{F_1(\mu+\mu_n)\Delta_3} I_2\big(\lambda_n\bar{h}_n\big),$$

$$Q_n = \frac{0.5 f_1\rho_1\left(R^2 - \bar{h}_1{}^2\right)\omega_1^2}{\Delta_3\mu_1\bar{h}_n\sqrt{\frac{F_1}{\nu_1}\left(1+\frac{\mu_1}{\mu}\right)}}\left(\frac{\mu(\mu+\mu_1)}{\mu_1(\mu+\mu_n)\bar{h}_1\sqrt{\frac{F_1}{\nu_1}\left(1+\frac{\mu_1}{\mu}\right)}} - \frac{\bar{h}_1\Delta_4}{R}\right),$$

$$\Delta_3 = I_2\big(\lambda_1\bar{h}_1\big)K_2(\lambda_1 R) - I_2(\lambda_1 R)K_2\big(\lambda_1\bar{h}_1\big),$$

$$\Delta_4 = I_1(\lambda_1 R)K_2\big(\lambda_1\bar{h}_1\big) + K_1(\lambda_1 R)I_1\big(\lambda_1\bar{h}_1\big),$$

радіальні компоненти n -ої дискретної та неперервної фаз:

$$u_r^n = \frac{\rho_N \bar{h}_N{}^4 \omega_1^2}{4\mu_N r}\left(\frac{\bar{\rho}}{2\bar{\rho}_N} - 1\right), \tag{3.197}$$

$$V_r = \frac{V_0 R}{r}. \tag{3.198}$$

Як видно з (3.193) – (3.198), для визначення компоненти швидкості шару частинок НМ необхідно обрати наступні фізико-механічні параметри частинок матеріалу та геометричні і механічні параметри циліндричної поверхні обертання: μ_n та μ – ефективні коефіцієнти динамічної в'язкості n -го шару частинок та неперервної фази; ρ_n і ρ – питома вага n -го шару частинок та неперервної фази; ν_n та ν – эефективні коефіцієнти кінематичної в'язкості n -го шару частинок та неперервної фази; F_n – коефіцієнт, що характеризує взаємодію неперервної фази з частинками НМ n -го шару.

3.3. Аналіз результатів механіко-математичного моделювання процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння

Використавши запропоновану механіко-математичну модель процесу розділення НМ на робочій поверхні циліндричної форми, розраховано абсолютні траєкторії (рис. 3.1) руху компонентів вібропневморозрідженого шару.

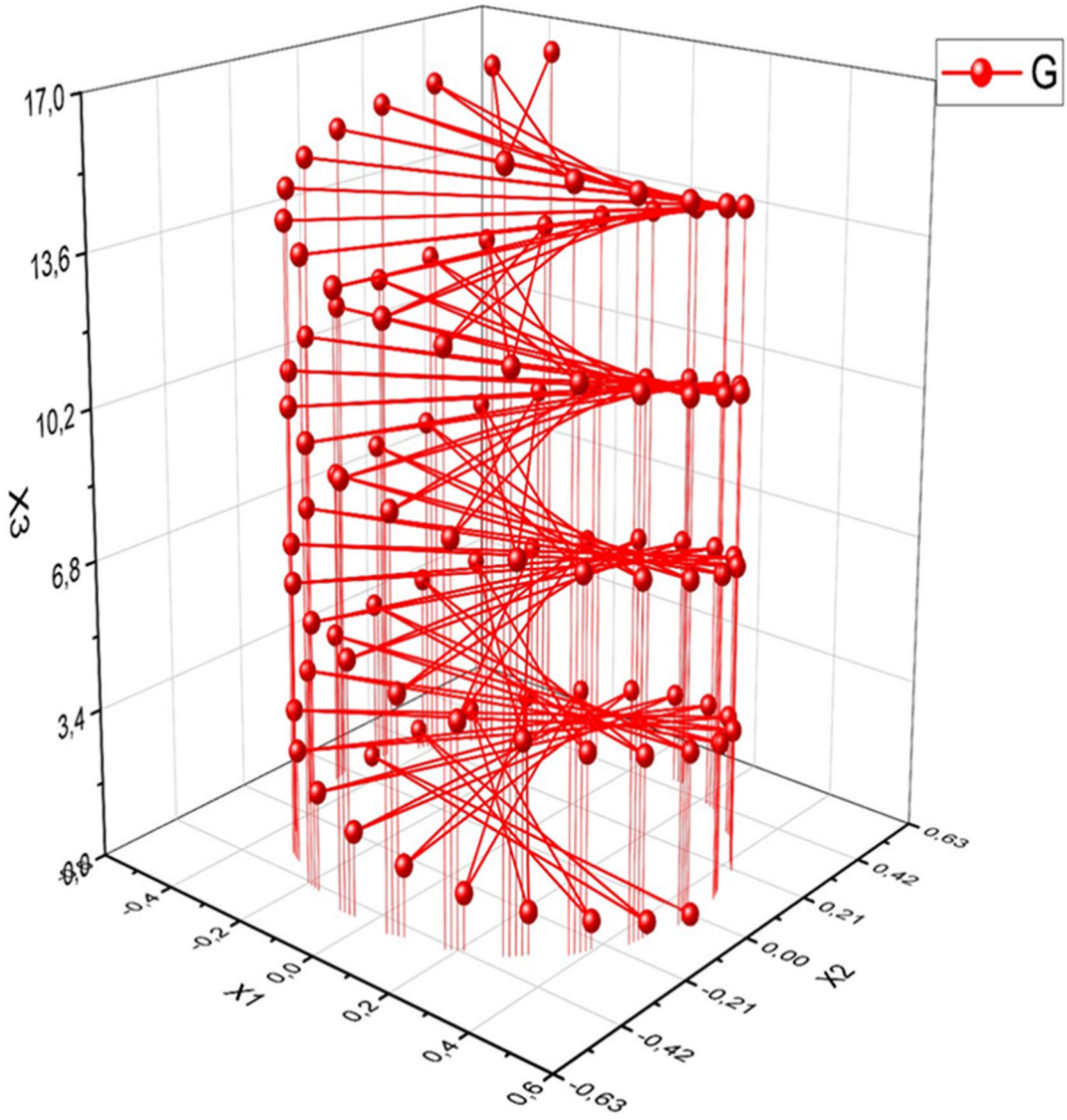


Рис. 3.1. Траєкторія абсолютного руху дискретних компонентів вібропневморозрідженого шару НМ

Аналіз рис. 3.1. дозволяє розглядати складний рух дискретної компоненти: траєкторія абсолютного руху складається з відносного руху дискретної компоненти по відношенню до рухомої системи відліку (робочої поверхні циліндричної форми, що обертається навколо нерухомої осі) та

переносної складової траєкторії руху (робочої поверхні циліндричної форми до нерухомої системи відліку).

В шарі вібропневморозрідженого матеріалу, що рухається вздовж робочої поверхні, частинки (компоненти) різної густини виконують складний рух: частинки більшої густини, що опинились на поверхні шару, занурюються вглиб до робочої поверхні. Одночасно з тим, частинки, що мають меншу густину та опинились при завантаженні у нижньому елементарному шарі, спливають на поверхню шару. Разом з тим, весь шар насіннєвого матеріалу рухається до вивантажувальних лотків.

Визначальними параметрами вібропневмовідцентрового розділення, які розглядаються у дослідженні, є частота коливань робочої поверхні (ротора) та швидкість потоку повітря. Виходячи з цього, доцільним було проведення двофакторного моделювання процесу розділення НМ, де одним фактором є частота коливань ротора, а другим – швидкість потоку повітря. Моделювання проводилось наступним чином.

В роботі [238] поставлено задачу з описання відносного руху *i*-го колового шару матеріалу з визначеною густиною з урахуванням частоти коливань робочої поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора та швидкості потоку повітря, що надає матеріалу властивостей псевдозрідженого, багатофазного середовища. Одним із рішень цієї задачі є значення радіусу *i*-го колового шару матеріалу на виході із сепаратора. Тобто відома координата знаходження частинок із визначеною густиною перед відведенням їх у відповідний збиральний бункер.

Граничні значення густини матеріалу, для якої проводили моделювання, визначались відповідно до її виду та сортових особливостей. Під граничними значеннями густини мається на увазі густина «легкої» (важковідокремлювана домішка – хворе та ушкоджене насіння, що має менше значення густини) та «важкої» (біологічно активне насіння з більшою власною густиною) фракцій.

Зроблено припущення, що попадання частинок із визначеною густиною у відповідну координату підкорюється закону нормального розподілу. При

цьому координати фракцій із різною густиною являють собою математичне очікування у нормальному розподілі:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{(x-r_i)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.199)$$

де $f_i(x)$ – функція розподілення імовірностей координати x; σ^2 – дисперсія координати; r_i – радіус i-го колового шару матеріалу на виході із сепаратора (математичне очікування).

Густина частинок шару матеріалу, що підлягає розділенню, змінюється від мінімального свого значення до максимального не дискретно, а неперервно. При цьому відсутня інформація про розподіл кількості частинок матеріалу за густиною. Врахування цих факторів ускладнює поставлену задачу та унеможливлює її точне вирішення. Виходячи з цього зроблено спрощення задачі: розрахунок функцій розподілення проводився для усереднених значень густини «легкої» та «важкої» фракцій НМ; дисперсія координати при цьому вважалась рівною одиниці. Слід відмітити, що розділення матеріалу у даній конструкції вібропневмовідцентрового сепаратора проводиться на дві фракції, що можливо робить допустимим це спрощення.

Для наочності на рис. 2 наведено функції розподілення імовірності знаходження «легкої» та «важкої» фракцій матеріалу перед відведенням їх у збиральні бункери після розділення за одних і тих параметрів процесу розділення (швидкості потоку повітря υ та частоти коливань ротора ν).

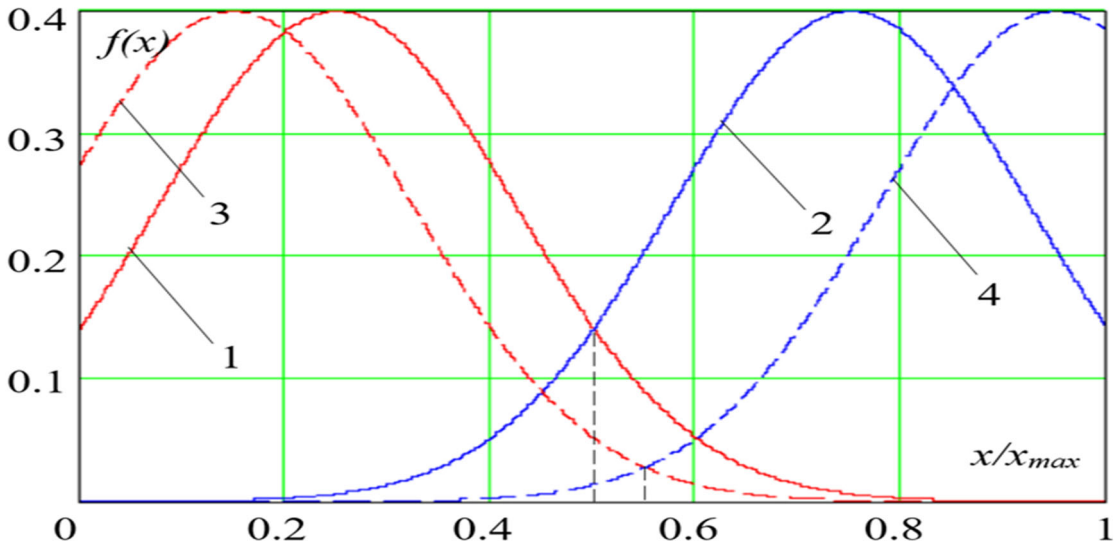


Рис. 3.2. Функції розподілення імовірності координат «легкої» та «важкої» фракцій НМ за різної швидкості потоку повітря під час розділення у вібропневмовідцентровому сепараторі: 1 – «легка» фракція, υ = 1 м/с, ν = 4000 кол./хв; 2 – «важка» фракція, υ = 1 м/с, ν = 4000 кол./хв; 3 – «легка» фракція, υ = 1.5 м/с, ν = 4000 кол./хв; 4 – «важка» фракція, υ = 1.5 м/с, ν = 4000 кол./хв

Приклад наведений для випадку постійної частоти коливань ротора та для двох значень швидкості потоку повітря (υ = 1 м/с – суцільна лінія; υ = 1.5 м/с – пунктирна лінія). Координата x на графіку пронормована на максимальне значення відстані x_{max} між робочими органами вібропневмовідцентрового сепаратора, які являють собою коаксиальні порожні циліндри. Координата стінки внутрішньої робочої поверхні (порожнього циліндра із меншим радіусом) – 0, а координата зовнішньої робочої поверхні (циліндра із більшим радіусом) – x_{max}. При цьому вважалось, розділення між збиральними бункерами знаходиться на відстані $0.5 \cdot x_{max}$ від кожної із робочих поверхонь.

Виходячи з того, що розділення між збиральними бункерами має координату $0.5 \cdot x_{max}$, очевидно слід вважати що частка «важкої» фракції, частинки якої будуть мати координату менше $0.5 \cdot x_{max}$ потрапить у бункер,

призначений для «легкої» фракції НМ. Такий же висновок можна зробити і для частини «легкої» фракції, частинки якої будуть мати координату більше $0.5 \cdot x_{\max}$. Результатом цього буде зниження якості отримуваного насіння.

Знайти кількість частинок «легкої» та «важкої» фракцій насіннєвого матеріалу, які потрапляють у бункери призначені, відповідно, для «легкої» (i=1) та «важкої» (i=2) фракції, можна наступним чином:

$$S_1 = N_1 \cdot \int_{-\infty}^{0.5 \cdot x_{max} \int_2 \int_{-\infty}^{0.5 \cdot x_{max} \int} f_2(x)dx} f_1(x)dx \qquad (3.200)$$

$$S_2 = N_1 \cdot \int_{0.5 \cdot x_{max}}^{+\infty \int_2 \int_{0.5 \cdot x_{max}}^{+\infty \int} f_2(x)dx} f_1(x)dx \qquad (3.201)$$

де: S_1 та S_2 – кількість частинок у бункерах, призначених, відповідно, для «легкої» (i=1) та «важкої» (i=2) фракцій; $f_1(x)$ та $f_2(x)$ – функції розподілення імовірностей для частинок «легкої» (i=1) та «важкої» (i=2) фракцій; N_1 та N_2 кількість частинок «легкої» (i=1) та «важкої» (i=2) фракцій у матеріалі що надходить на обробку.

Оскільки кінцевою продукцією розділення у вібропневмовідцентровому сепараторі, що розглядається в роботі, є насіння, то критерієм ефективності процесу розділення слід вважати чистоту «важкої» фракції. Під чистотою «важкої» фракції розуміється відношення кількості частинок «важкої» фракції у відповідному бункері (i=2), до загальної кількості частинок в ньому:

$$Purity = \frac{N_2 \cdot \int_{0.5 \cdot x_{max}}^{+\infty \int} f_2(x)dx}{N_1 \cdot \int_{0.5 \cdot x_{max}}^{+\infty \int_2 \int_{0.5 \cdot x_{max}}^{+\infty \int} f_2(x)dx} f_1(x)dx.} \qquad (3.202)$$

Враховуючи те, що відсутнє розподілення частинок за густиною у вихідному НМ у межах між «легкою» та «важкою» фракціями, зроблено припущення, що N_1=N_2. З урахуванням цього для (3.202) можна отримати:

$$Purity = \\ = \frac{N \cdot \int_{0.5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x)\,\mathrm{d}x}{N \cdot \int_{0.5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_1(x)\,\mathrm{d}x + N_2 \cdot \int_{0.5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x)\,\mathrm{d}x} \cdot 100\ \% = \\ = \frac{\int_{0.5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x)\,\mathrm{d}x}{\int_{0.5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_1(x)\,\mathrm{d}x + \int_{0.5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x)\,\mathrm{d}x} \cdot 100\ \%. \quad (3.203)$$

З рис. 3.2. видно, що чистота «важкої» фракції буде визначатись параметрами процесу розділення: площа функцій розподілення у межах $[0.5 \cdot x_{\max}, +\infty]$ буде різною за різних значень швидкості потоку повітря та частоти коливань ротора.

Значення чистоти «важкої» фракції визначали для значень швидкості потоку повітря та частоти коливань ротора із діапазонів: швидкість потоку повітря – 1…2 м/с; частота коливань робочої поверхні (ротора) – 4000…6000 кол./хв. Дискретність зміни швидкості повітряного потоку під час моделювання обиралась кратною 0.1 м/с. Частота коливань ротора змінювалась з дискретністю – 250 кол./хв.

Обчислення чистоти «важкої» фракції проводили за почергової зміни обраних параметрів процесу розділення. Тобто за постійного значення частоти коливань ротора змінювали із відповідною дискретністю швидкість потоку повітря, при цьому для кожного значення швидкості розраховували чистоту «важкої» фракції. Далі збільшували частоту коливань на величину дискретності її зміни та проводили розрахунок чистоти за різної швидкості потоку повітря.

Отримані моделюванням значення чистоти «важкої» фракції за різних швидкості потоку повітря та значення чистоти «важкої» фракції за різної частоти коливань ротора апроксимувались поліноміальними функціями виду:

$$F(Purity) = \sum_{j=0}^{n} a_j \cdot Purity^j, \quad (3.204)$$

де a_j – апроксимаційні коефіцієнти; n – ступінь полінома.

Таким чином, отримано апроксимаційні функції, які описують зміну чистоти «важкої» фракції за зміни швидкості потоку повітря за різних значень частоти коливань ротора, та апроксимаційні функції, які описують зміну чистоти «важкої» фракції за зміни частоти коливань ротора за різних значень швидкості потоку повітря.

Результати моделювання процесу розділення НМ у вібропневмовідцентровому сепараторі наведені у вигляді поверхонь. При цьому зроблено спрощення за рахунок застосування квадратичної моделі, де аргументами є швидкість повітряного потоку (υ) та частота коливань ротора (ν) (рис. 3.3 – 3.6). Рівняння квадратичної регресії при цьому мали вигляд:

$$Purity(\upsilon,\nu)=94.556+3.333\cdot\upsilon+2.333\cdot\nu-15.333\cdot\upsilon^2-6.333\cdot\nu^2-1.5\cdot\upsilon\cdot\nu, \quad (3.205)$$

$$Purity(\upsilon,\nu)=97.556+13.167\cdot\upsilon+0.583\cdot\nu-25.333\cdot\upsilon^2-2.083\cdot\nu^2-0.5\cdot\upsilon\cdot\nu, \quad (3.206)$$

$$Purity(\upsilon,\nu)=95.889+3.667\cdot\upsilon+1.167\cdot\nu-17.333\cdot\upsilon^2-9.833\cdot\nu^2+0.5\cdot\upsilon\cdot\nu. \quad (3.207)$$

Критерієм ефективності процесу розділення НМ, при моделювання процесу розділення НМ за густиною на насіння на робочій поверхні циліндричної форми, була чистота основної фракції.

Швидкість потоку повітря змінювалась в діапазоні від 1 до 2 м/с. Для теоретичного моделювання дискретність зміни швидкості повітряного потоку обиралась кратною 0,1 м/с, а для випробувань у виробничих умовах – кратною 0,25 м/с. Частота коливань ротора змінювалась в діапазоні від 400 до 600 кол./хв. Дискретність зміни цієї частоти для теоретичного моделювання складала 250 кол/хв, а для експериментального дослідження – 500 кол/хв.

Матеріалами, які використано у дослідженні, були НМ пшениці, соняшнику та сої.

Наведені на рис.3.3 поверхні, які являють собою значення чистоти основної фракції НМ, що підлягає сепаруванню у вібропневмовідцентровим сепаратор, мають екстремальний вигин до площини Ov×Ov. Наявні максимальні значення цієї величини, яку обрано як критерій ефективності процесу сепарування, в залежності від швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора.

Для визначення адекватності розробленої механіко-математичної моделі розділення НМ за густиною насіння зроблено січні поверхонь відгуку рис. 3.3.

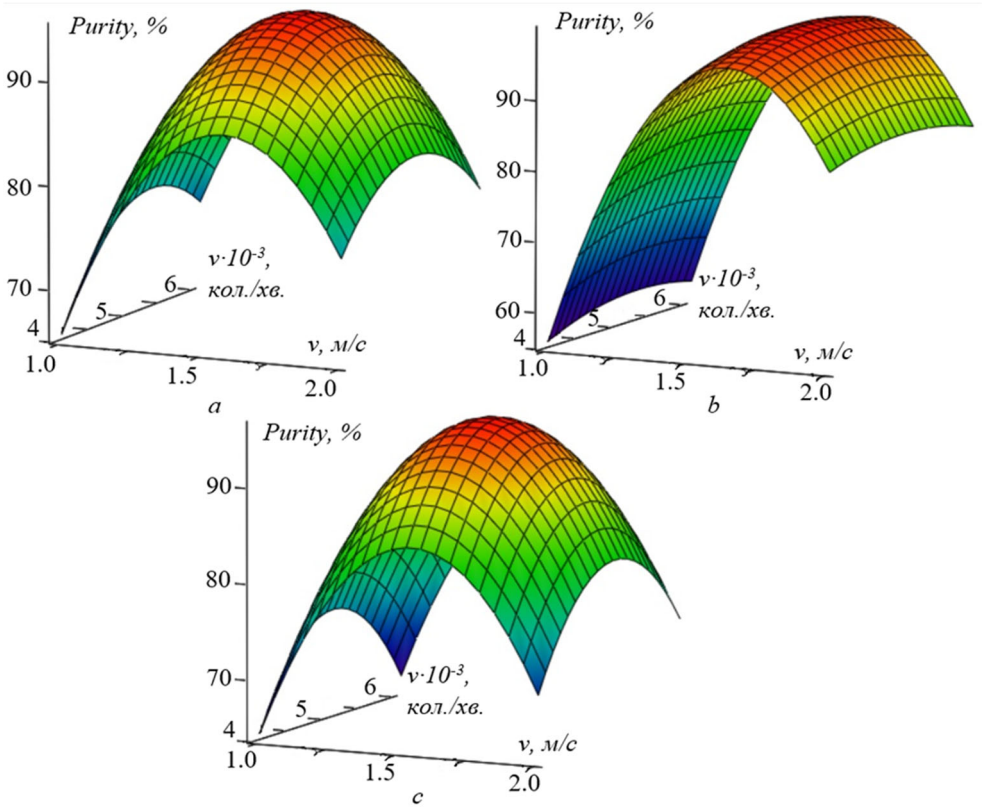


Рис.3.3. Результати теоретичного моделювання зміни чистоти основної фракції НМ в залежності від частоти коливань ротора та швидкості повітряного потоку під час розділення у вібропневмовідцентровому сепараторі обраного типу сировини: a – пшениці; b – соняшнику; c – сої

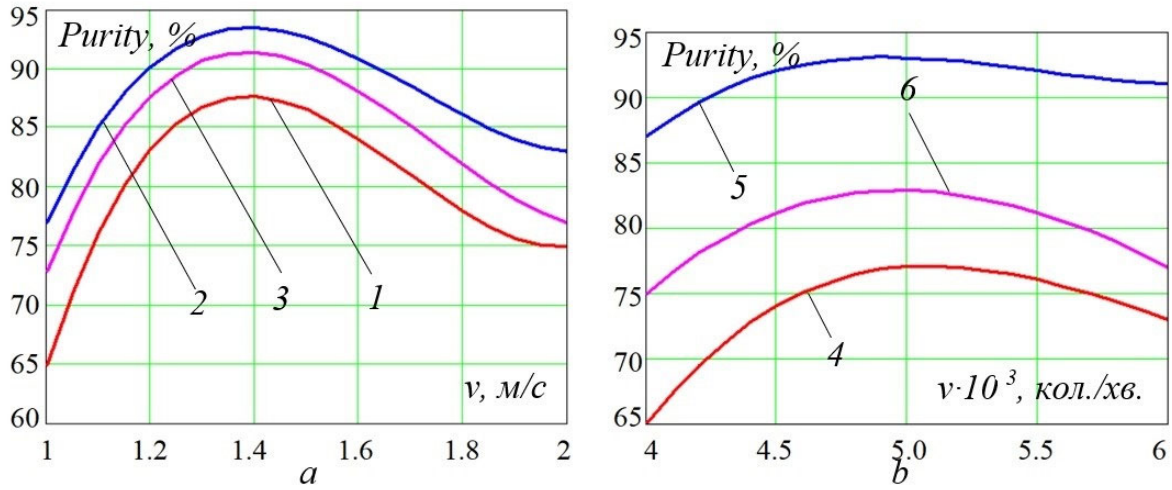


Рис. 3.4. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці у вібропневмовідцентровому сепараторі, в залежності від швидкості повітряного потоку (*a*) та частоти коливань ротора (*b*), відповідно, за різних значень повітряного потоку (1 – 1; 2 – 1,5; 3 – 2 м/с) та частоти коливань ротора (4 – 4000; 5 – 5000; 6 – 6000 кол./хв)

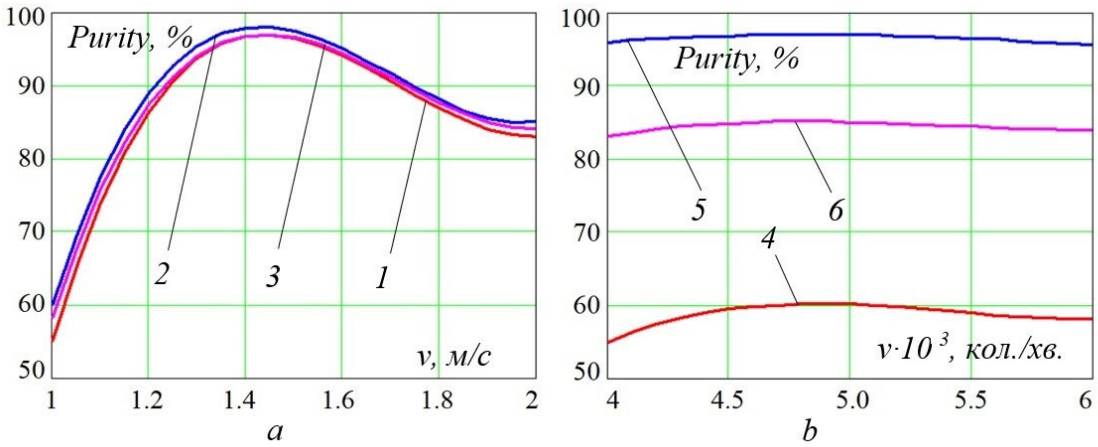


Рис. 3.5. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшника вібропневмовідцентровим сепаратором, в залежності від швидкості повітряного потоку (*a*) та частоти коливань ротора (*b*), відповідно, за різних частоти коливань ротора(1 – 4000; 2 – 5000; 3 – 6000 кол./хв) та швидкості повітряного потоку (4 – 1; 5 – 1,5; 6 – 2 м/с)

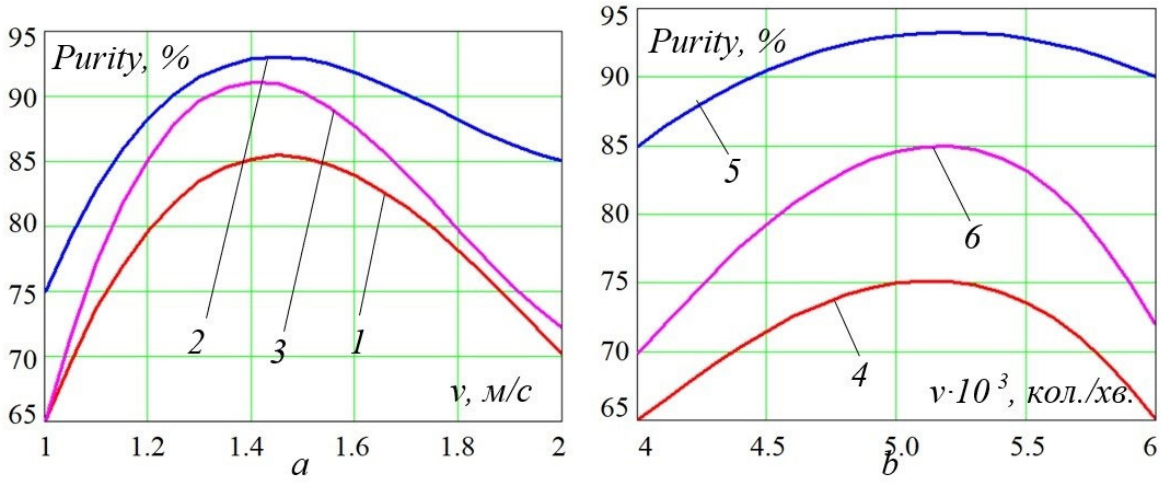


Рис. 3.6. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої вібропневмовідцентровим сепаратором, в залежності від швидкості повітряного потоку (*a*) та частоти коливань ротора (*b*), відповідно, за різних частоти коливань ротора(1 – 4000; 2 – 5000; 3 – 6000 кол./хв) та швидкості повітряного потоку (4 – 1; 5 – 1,5; 6 – 2 м/с)

Аналіз результатів теоретичних досліджень дозволив встановити, що найбільший вплив на параметри процесу розділення НМ має частота коливань робочої поверхні. Так, збільшення частоти коливань робочої поверхні, значно збільшує абсолютну швидкість руху шарів насіннєвого матеріалу вздовж робочої поверхні в напрямку вивантаження, тим самим скорочуючи час протікання процесу майже в три рази.

Швидкість повітряного потоку на вході в нижній елементарний шар насіння є фактором, що регулює характер протікання процесу. Так, при наближенні швидкості повітря на вході в шар до позначки 1,5 м/с, чистота основної фракції починає знижуватись, оскільки збільшується швидкість переміщення шарів НМ в напрямку вивантаження та у шарах НМ починають виникати передумови для виникнення «кипіння» матеріалу, що характеризує стан постійного перемішування шарів.

3.4. Висновки за розділом

1. На основі розробленої просторової механіко-математичної моделі пошарового руху та розділення псевдорозрідженого НМ за густиною насіння на робочих поверхнях циліндричної форми одержано аналітичні залежності процесу розділення, що узагальнюють взаємозв'язок кінематичних режимів і конструктивних параметрів вібропневмовідцентрових сепараторів з фізико-механічними властивостями матеріалу і параметрами технологічного процесу розділення НМ та досліджено рух кільцевих шарів частинок різної густини.

Механіко-математичні моделі базуються на системному підході використання гідродинаміки багатофазних середовищ (псевдорідин). Цей метод моделює НМ у формі багатофазної структури, яка піддається впливу повітряного потоку, коливанням робочої поверхні та дії поля відцентрової сили і складається з кінцевої кількості шарів дискретних компонент (частинок НМ) та неперервної компоненти (газоподібне середовище). Ці дискретні та неперервна компонента розглядаються, як суцільні середовища, що взаємодіють між собою. Такі взаємодії моделюються відповідними умовами взаємодії на границі розділу середовищ.

2. На підставі результатів теоретичних досліджень доведено, що для визначення компоненти швидкості шару частинок НМ визначальними є наступні фізико-механічні параметри частинок матеріалу та геометричні і механічні параметри циліндричної поверхні обертання: μ_n та μ – ефективні коефіцієнти динамічної в'язкості n -го шару частинок та неперервної фази; ρ_n і ρ – питома вага n -го шару частинок та неперервної фази; ν_n та ν – ефективні коефіцієнти кінематичної в'язкості n -го шару частинок та неперервної фази; F_n – коефіцієнт, що характеризує взаємодію неперервної фази з частинками НМ n -го шару.

3. Аналіз результатів теоретичних досліджень дозволив встановити, що найбільший вплив на параметри процесу розділення НМ має частота коливань робочої поверхні. Так, збільшення частоти коливань робочої поверхні, значно

збільшує абсолютну швидкість руху шарів насіннєвого матеріалу вздовж робочої поверхні в напрямку вивантаження, тим самим скорочуючи час протікання процесу майже в три рази. Швидкість повітряного потоку на вході в нижній елементарний шар насіння є фактором, що регулює характер протікання процесу. Так, при наближенні швидкості повітря на вході в шар до позначки 1,5 м/с, чистота основної фракції починає знижуватись, оскільки збільшується швидкість переміщення шарів НМ в напрямку вивантаження та у шарах НМ починають виникати передумови для виникнення «кипіння» матеріалу, що характеризує стан постійного перемішування шарів.

4. За результатами чисельного розв'язку розроблених механіко-математичних моделей, розраховано траєкторії та визначено швидкості руху кільцевих шарів насіннєвого матеріалу, які утворено частинками різної густини та виконано їх аналіз.

Досліджено залежність чистоти (***Purity***) основної фракції від визначальних параметрів процесу та визначено значення раціональних параметрів швидкості повітряного потоку (υ) та частоти коливань робочої поверхні (ν):

пшениці υ = 1,2…1,5 м/с; ν = 4500…5100 кол./хв;

соняшнику υ = 1,3…1,5 м/с; ν = 4500…5000 кол./хв;

сої υ = 1,3…1,6 м/с; ν = 5000…5500 кол./хв.

Одержані результати теоретичного моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні циліндричної форми необхідно верифікувати шляхом проведення експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 4
МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

Отримані математичні моделі, які описують інтенсифікацію процесів вібропневмовідцентрового розділення НМ за густиною насіння, є ефективним інструментом для обґрунтування конструктивних параметрів та кінематичних режимів машин, обладнання та процесів розділення НМ за густиною насіння, а саме дозволяють оптимізувати: швидкість повітряного потоку, частоту і амплітуду коливань та кути нахилу робочої поверхні та пов'язати ці показники з фізико-механічними, аерогравітаційними та гідродинамічними властивостями НМ.

Однак, з метою встановлення адекватності одержаних результатів теоретичних досліджень необхідно провести експериментальні дослідження.

4.1. Характеристика об'єктів досліджень

4.1.1. Пневмосортувальний стіл

Дослідження закономірностей процесу вібропневматичного розділення НМ проводились на ПСС (рис. 4.1), який складається зі станини, столу, кузову, камери аспіраційної, каменевідбірнику, деки, живильнику, клапану регулювальному, клапану повітряного, механізму регулювання витрати повітря, патрубків вивантажувальних, ємності для відбору каменів, патрубку завантажувального, механізмів регулювання повздовжнього та поперечного кутів нахилу [136].

Технологічну схему розділення НМ за фракціями які різної густини представлено на рис. 4.2.

Схему підключення ПСС наведено на рис. 4.3. інформацію запозичено з «Паспорту з експлуатації» ПСС виробництва «Хорольський механічний завод» (м. Хорол).

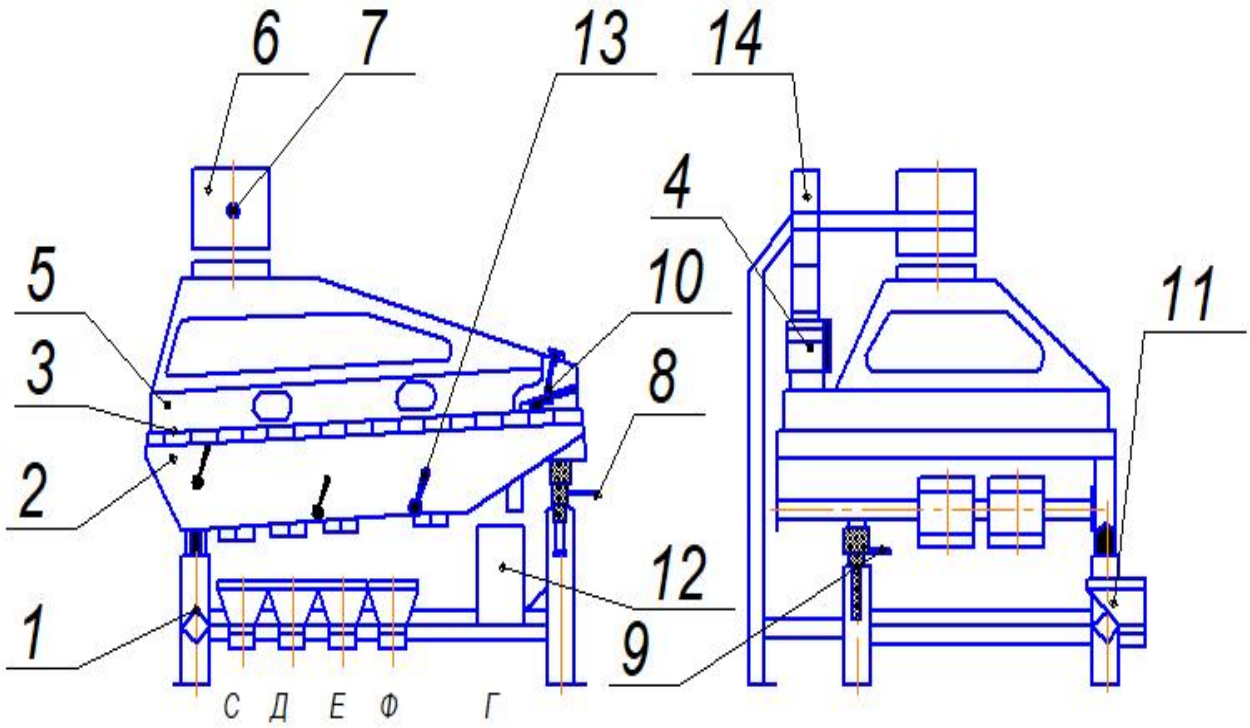


Рис. 4.1. Конструктивна схема ПСС:

1 – станина; 2 – вібростіл; 3 – кузов; 4 – камера аспіраційна; 5 – каменевідбірник; 6 – дека; 7 – живильник; 8 – клапан регулювальний; 9 – клапан повітряний; 10 – механізм регулювання витрати повітря; 11 – патрубки вивантажувальні; 12 – ємкість для каменів; 13 – патрубок завантажувальний; 14 – механізм регулювання повздовжнього кута нахилу; С – фракція легка; Д – фракція середня; Е – фракція змішана; Ф – фракція важка; Г – каміння

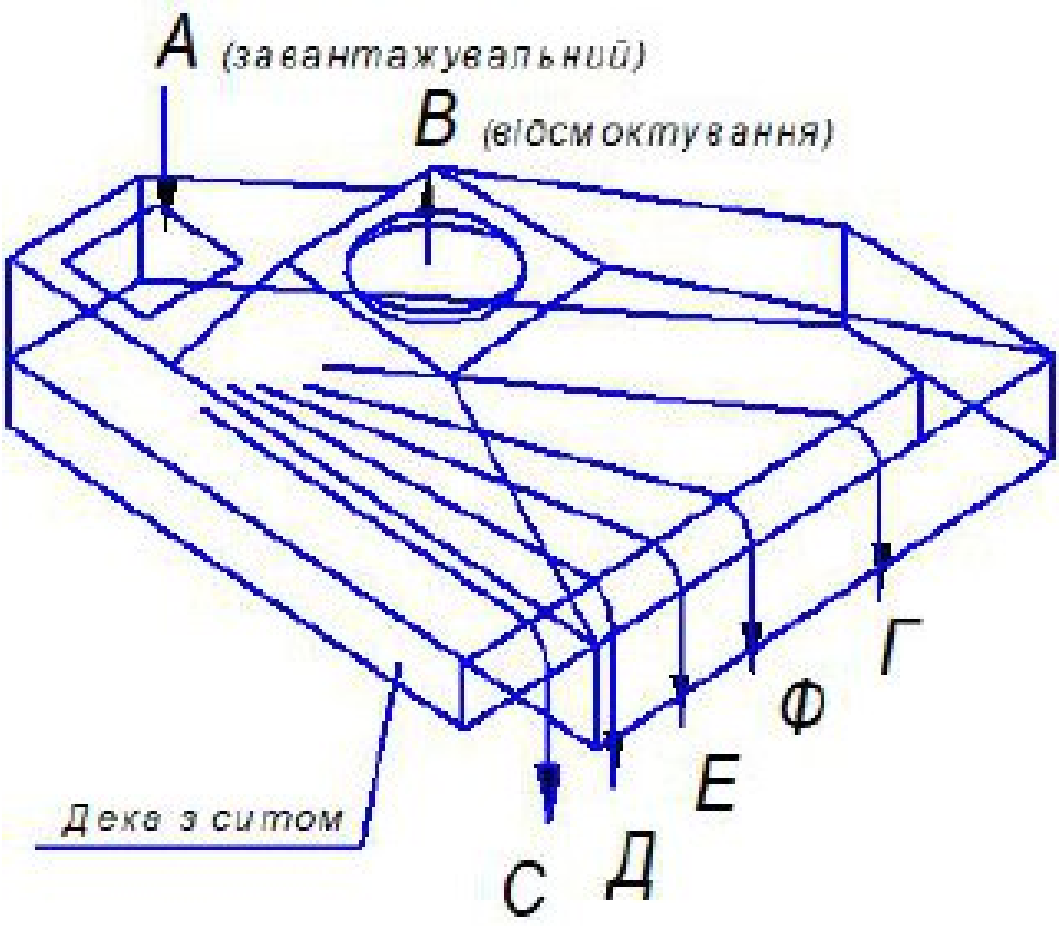


Рис. 4.2. Технологічна схема розділення НМ

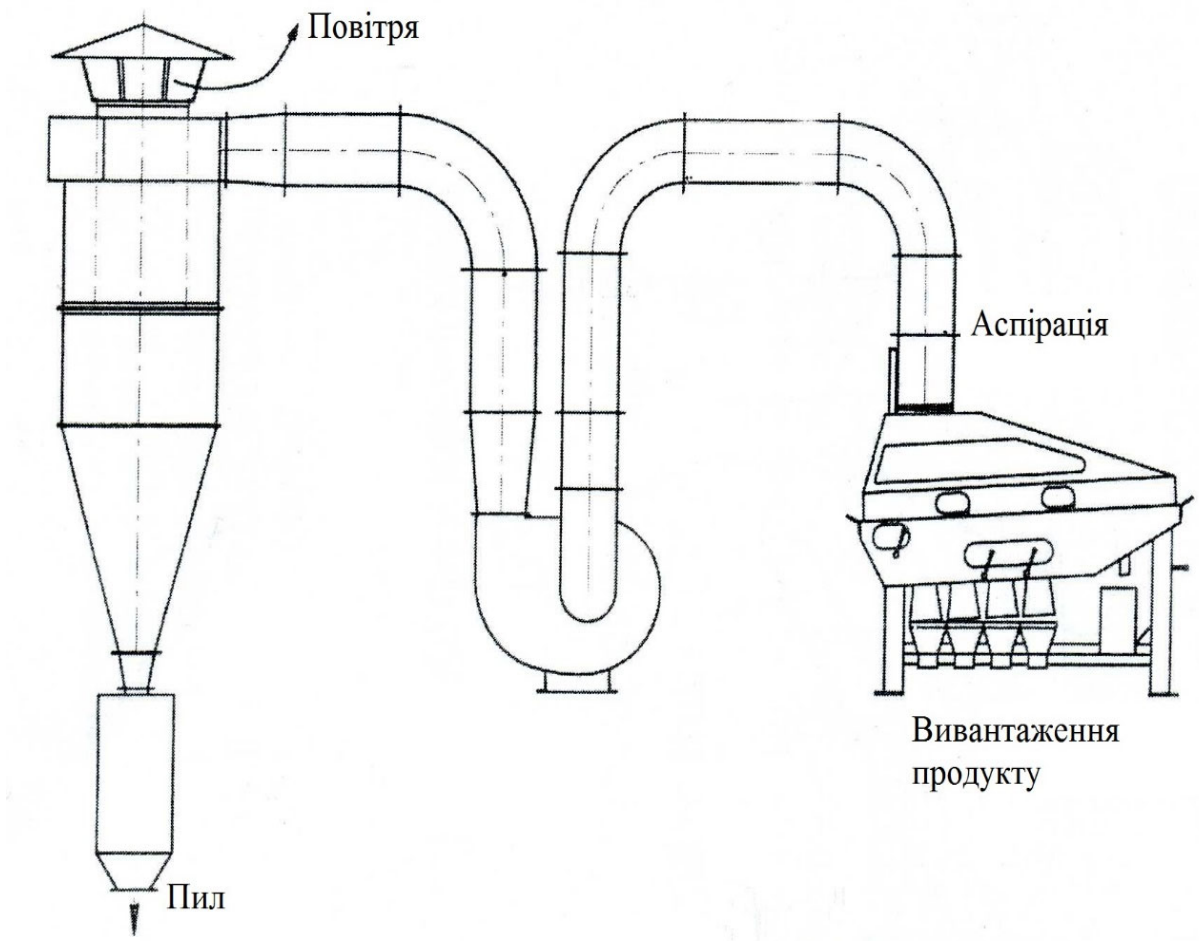


Рис. 4.3. Схема підключення ПСС

НМ через живильник 7 потрапляє на деку 6 і починає рухатись по поверхні деки у бік патрубків вивантажувальних 11. Під одночасною дією повітряного потоку, що проходить крізь деку 6, і коливань деки НМ переходить у псевдорозріджений стан. НМ розшаровується на фракції, які складаються з частинок, що різняться за власною густиною. Розділення відбувається таким чином, що легка фракція вивантажується до патрубку С, фракція частинок середньої густини – до патрубку Д, фракція частинок зі змішаною густиною до патрубку – Е, важка фракція до патрубку – Ф, а каміння (за наявності) вивантажується – до патрубку Г. Час знаходження і швидкість руху НМ на поверхні деки 6 можна змінювати шляхом підбору повздовжнього і поперечного кутів нахилу робочої поверхні.

Станина 1 є несучою конструкцією, на якій змонтовано вібростіл 2, кузов 3, деку 6 та інші вузли ПСС.

Вібростіл 2 призначено для кріплення деки 6 і, відповідно, для приймання вхідного матеріалу та виводу розділених фракцій НМ.

Живильник 7 призначено для подачі вхідного матеріалу. Подача матеріалу на деку 6 через живильник 7 відбувається рівномірно та стало.

Робочим органом ПСС є дека на якій відбувається процес розділення НМ на фракції та транспортування фракцій до вивантаження. Дека складається з корпусу, повітряпроникного, транспортувального полотна та решітки для вирівнювання повітряного потоку, які скріплено болтами.

В залежності від культури, що обробляється, транспортувальне полотно може мати різні розміри отворів. Поверхня транспортувального полотна не повинна мати механічних дефектів.

Регулювання витрат повітря відбувається з метою забезпечення швидкості повітря, оптимальної для протікання процесу розділення НМ. При малій швидкості повітряного потоку поблизу робочої поверхні деки НМ рухається вздовж деки до вивантаження «важкої» фракції. У такому разі, швидкість повітряного потоку підвищується до значення, при якому матеріал, що знаходиться на поверхні деки починає «кипіти». Утворення «фонтанів» не

дозволяється, оскільки буде перемішування шарів матеріалу і процес розшарування припиняється.

Основні характеристики ПСС: номінальна продуктивність від 2500 до 3500 кг/год (в залежності від культури), частота коливань – 940 кол./хв., амплітуда коливань 5 – 6 мм., необхідна витрата повітря – не більше 140 $м^3$/хв., кут нахилу деки повздовжній 0 – 8 град., кут нахилу деки поперечний 0-8 град., встановлена потужність – 0,74 кВт. Габаритні розміри: довжина – 2020 мм, ширина – 1858 мм, висота – 2010 мм.

Налаштування оптимального режиму роботи ПСС в залежності від культури, що обробляється, досягається відповідними регулюваннями визначальних факторів процесу:

- продуктивності;
- питомої подачі матеріалу;
- витрат повітряного потоку;
- поперечного кута нахилу ПСС;
- повздовжнього кута нахилу ПСС;
- положення клапану видалення каміння;
- положення розподільних клапанів;
- амплітуди коливань;
- частота коливань ПСС.

Вимоги до налаштувань:

- продуктивність вирівнюється шляхом налаштування продуктивності всієї поточної лінії виробництва НМ, до якої включено відповідний ПСС;

- питома подача матеріалу з живильника на деку пневмосортувального столу повинна відбуватись постійно, без порушень герметичності технологічного процесу;

- контроль витрати повітряного потоку проводиться для дотримання оптимальної швидкості повітряного потоку, необхідної для ефективного розшарування НМ;

- регулювання поперечного кута нахилу ПСС оптимізує швидкість сходу НМ з робочої поверхні, збільшення кута нахилу – пришвидшує рух матеріалу до вивантаження, зменшення – уповільнює рух НМ;
- регулювання повздовжнього кута нахилу ПСС змінює швидкість переміщення НМ у напрямку до клапану видалення каміння. При оптимальному значенні повздовжнього кута нахилу товщина шару матеріалу поступово знижується. Найвища товщина шару в зоні завантаження, найменша – поблизу каменевідбірника;
- регулюванням положення клапану для видалення каміння мінімізується вивантаження матеріалу до лотків каменевідбору;
- регулюванням положення розподільних клапанів пневмосортувального столу оптимізується кількісне співвідношення відповідних фракцій;
- регулюванням амплітуди коливань досягається рівномірний розподіл шару НМ на робочій поверхні;
- регулюванням частоти коливань ПСС досягається оптимальні значення процесу псевдорозрідження НМ.

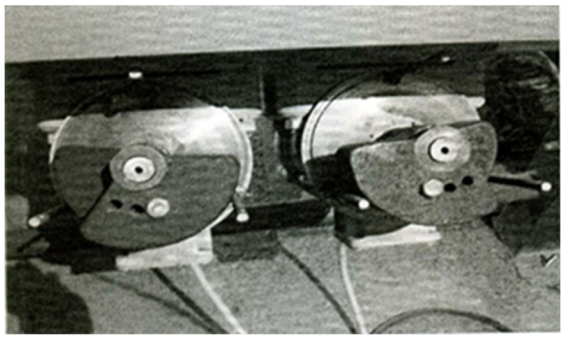
ПСС маже працювати у режимах: очищення, сепарування, очищення + сепарування, видалення важких домішок (каміння).

При проведенні експериментальних досліджень використовувались ваги типу ВЛКТ – 5, похибка яких складає ± 200мг.

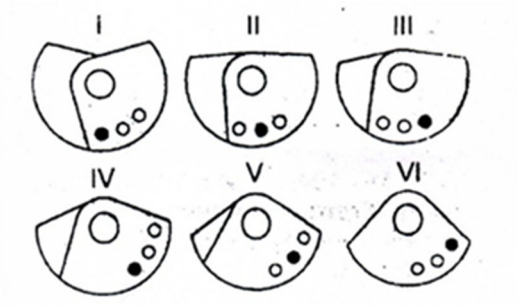
Під час досліджень регулювальною заслінкою, яка знаходиться у живильнику 7, змінювалась подача НМ. Незалежно один від одного змінювались наступні параметри:

- швидкість повітряного потоку варіювалась частотним перетворювачем ПЧВ203 – 5К5-В;
- частота коливань варіювалась частотним перетворювачем ПЧВ102- 1К5-В;
- амплітуда коливань варіювалась дебалансними вібраторами ІВ -104Б-6, які мають шість рекомендованих положень (рис. 4.4);

- повздовжній кут нахилу змінювався механізмом повздовжнього регулювання;
- поперечний кут нахилу змінювався механізмом поперечного регулювання.



(а)



(б)

Рис. 4.4. Загальний вид (а) і схема регулювання дебалансних вібраторів ІВ – 104Б-6 (б)

Швидкість повітряного потоку визначалась термоанемометром DT3880 (діапазон вимірювання 0,1 – 25 м/с) і анемометром з трубкою Піто DT8920 (діапазон вимірювання 1 – 80 м/с). Вимірювання швидкості повітряного потоку проводилось під розподільчою решіткою у різних її частинах (рис. 4.5).

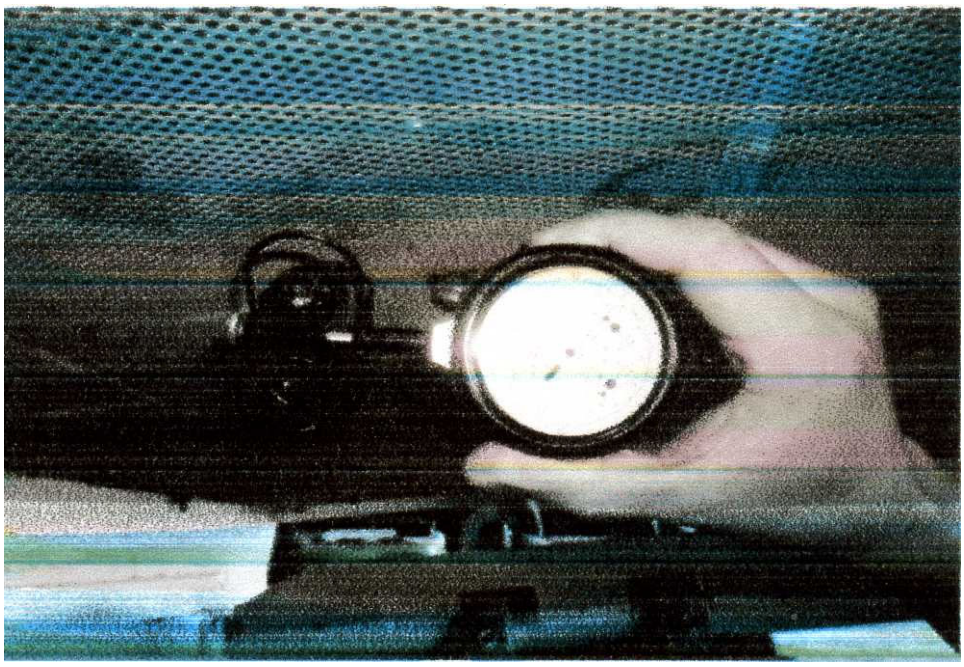


Рис. 4.5. Вимірювання швидкості повітряного потоку крильчастим анемометром

Поле швидкостей при штатному варіанті гідравлічного опору наведено на рис. 4.6.

Дослідження проведено у співдружності з ТОВ «Спецелеватормельмаш» («Фадєєв Агро») (м. Харків).

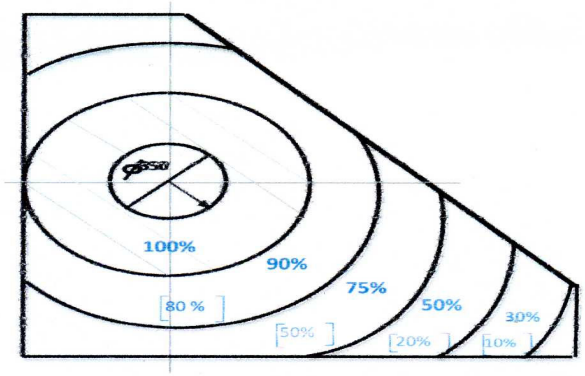


Рис. 4.6. Схема розподілу поверхні деки за зонами різних швидкостей повітряного потоку

Оскільки організація руху повітряного потоку виконана по схемі «зонт», то деку було розділено на кільцеві зони з центром на осі всмоктування. Поле швидкостей при штатному варіанті опору (перфоровані робочі поверхні на вході і виході повітря з деки) має нерівномірність, яка характерна для такої схеми руху: зменшення швидкості руху повітря по мірі віддалення від всмоктуючого каналу. Слід відмітити, що безпосередньо над всмоктуючим каналом, швидкість повітря близька до рівномірної.

Для визначення поля швидкостей при зменшенні гідравлічного опору деки проводилась заміна двох перфорованих поверхонь на одну легкопроникну сітку (встановлено поверхню з отвором 0,9×0,9 мм., при проникності 65%), що значно вплинуло на поле швидкостей по зонам.

Зміну газодинамічних параметрів у проточній частині ПСС представлено на рис. 4.7.

Дослідження проведено у співдружності з ТОВ «Спецелеватормельмаш» («Фадєєв Агро») (м. Харків).

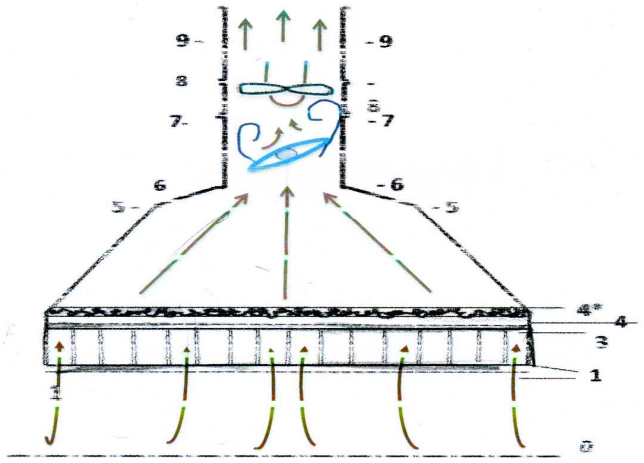


Рис. 4.7. Схема зміни газодинамічних параметрів повітря за перерізами: 0-0; 1-1; 2-2; 3-3; 4-4; 5-5; 6-6; 7-7; 8-8; 9-9

Значення амплітуди коливань вимірювалось стробоскопічним балансувальним індикатором СБ-6, який призначено для балансування та вібродіагностики обладнання. Для вимірювання амплітуди коливань ПСС у повздовжньому напрямку щуп вібродатчика встановлювався до торцевої частини пневмосортувального столу. Коливання, які збуджує вібратор, сприймає датчик стробоскопічним балансувальним індикатором СБ-6. Електричний сигнал, що виникає в процесі вимірювання, потрапляє до прибору, де він обробляється і виводиться на стрілочний індикатор, по відхиленню стрілки якого визначається амплітуда коливань ПСС. Схему і точки вимірювання амплітуди коливань ПСС в повздовжньому напрямку коливань у вертикальних і горизонтальних точках вимірювання наведено на рис. 4.8 і позначено літерою (б), у поперечному напряму коливань – літерою (а).

Дослідження проведено у співдружності з ТОВ «Спецелеватормельмаш» («Фадєєв Агро») (м. Харків).

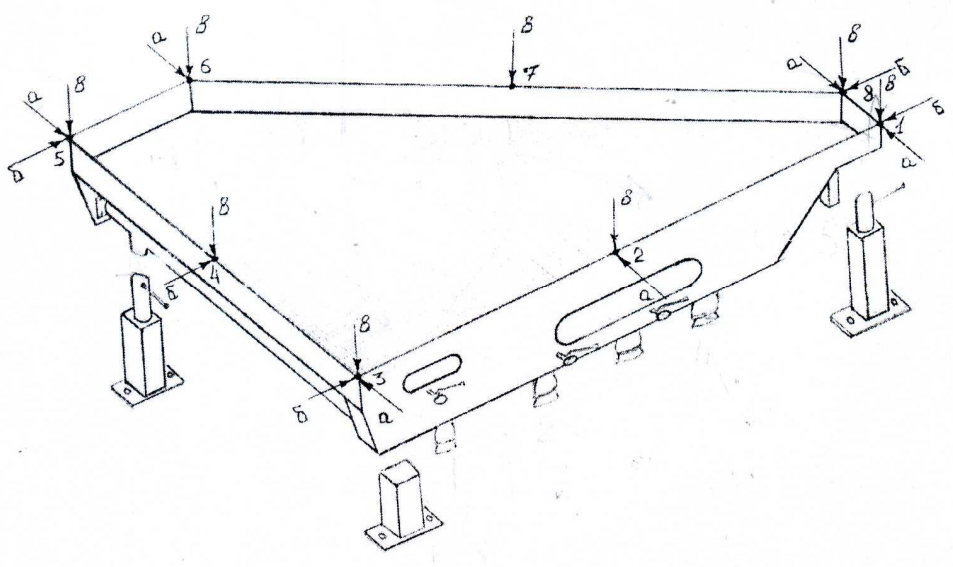
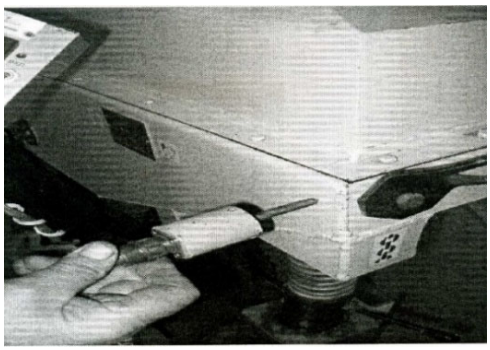
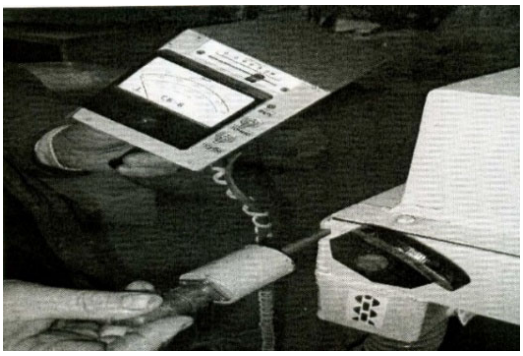


Рис. 4.8. Точки вимірювання амплітуди коливань ПСС

Вимірювання амплітуди коливань ПСС у повздовжньому напрямку представлено на рис. 4.9, а у поперечному напрямку – рис. 4.9, б.



а)



б)

Рис. 4.9. Вимірювання амплітуди коливань у повздовжньому (а) і поперечному (б) напрямкам

Результати вимірювання амплітуди коливань ПСС наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результати вимірювання амплітуди коливань ПСС

Точки вимірювання	Показання приладу СБ-6 у вертикальних точках вимірювання (мікрон)	Показання приладу СБ-6 у горизонтальних точках вимірювання (мікрон)
Механізм повздовжнього кута нахилу знаходиться в положенні 5 в точках (а)		
1	280	5
2	290	25
3	Більше 300	50
5	80	80
6	50	30
7	50	40
8	50	120

Механізм повздовжнього кута нахилу знаходиться у положенні 5 в точках (б)		
Точки вимірювання	Показання приладу СБ-6 у вертикальних точках вимірювання (мікрон)	Показання приладу СБ-6 у горизонтальних точках вимірювання (мікрон)
1	50	280
3	Більше 300	150
4	150	180
5	50	60
8	60	220
Механізм повздовжнього кута нахилу знаходиться у положенні 3 в точках (а)		
Точки вимірювання	Показання приладу СБ-6 у вертикальних точках вимірювання (мікрон)	Показання приладу СБ-6 у горизонтальних точках вимірювання (мікрон)
8	80	Більше 300
3	130	230
5	50	70
Механізм повздовжнього кута нахилу знаходиться у положенні 3 в точках (б)		
Точки вимірювання	Показання приладу СБ-6 у вертикальних точках вимірювання (мікрон)	Показання приладу СБ-6 у горизонтальних точках вимірювання (мікрон)
8	80	160
3	130	160
5	50	120

Дослідження роботи ПСС проводились у відповідності до: ДСТУ 70.10.2 – 83 «Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини і агрегати, зерноочисно-сушильні комплекси. Програма і методика випробувань»; РТМ 8.53.00 – 64 – 84 «Сепаратори зерноочисні. Програма і методика випробувань»; СОУ 74.3 – 37 – 147:2004 «Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини та агрегати. Зерноочисно – сушильні комплекси».

У якості робочої поверхні ПСС використано лист металу з отворами у формі кола для проходу повітряного потоку. Для вибору раціональних кутів нахилу деки ПСС (рис. 4.10.), досліджувались кути природнього укосу матеріалу (рис. 4.11.).

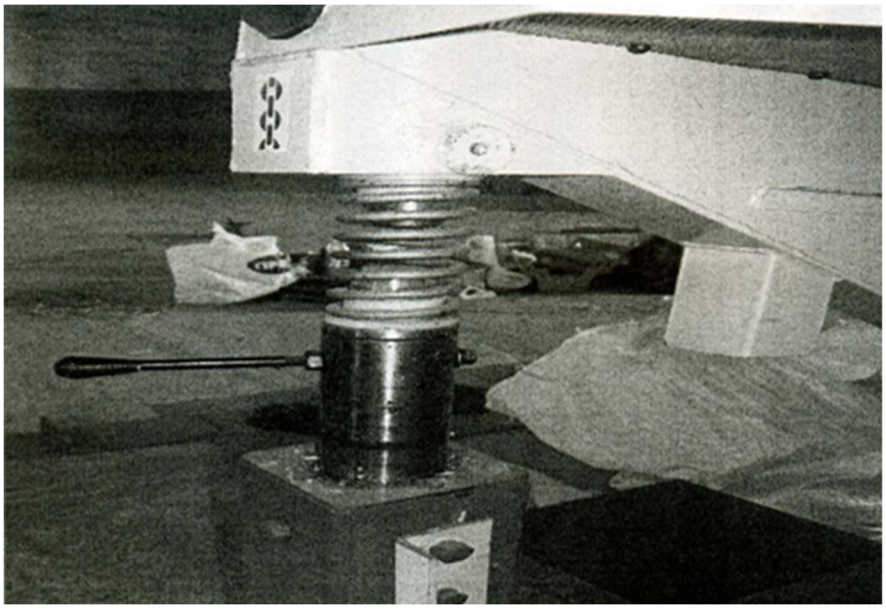


Рис. 4.10. Механізм регулювання кутів нахилу ПСС

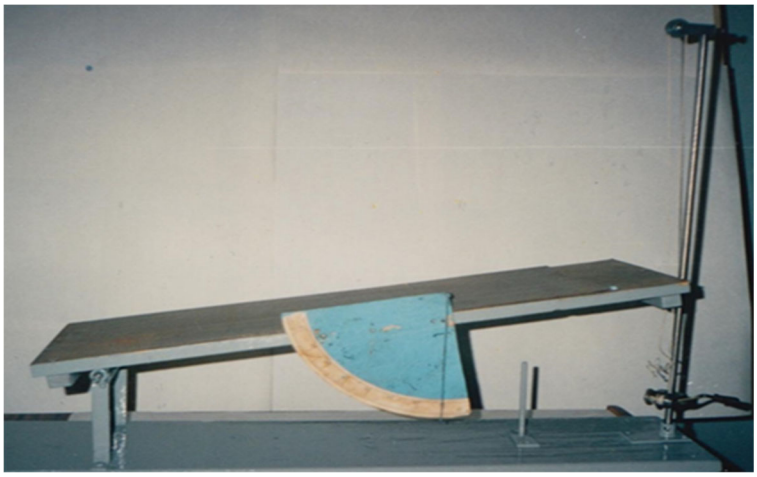


Рис. 4.11. Прилад для визначення кутів природнього укосу матеріалу

Згідно заводському Паспорту існує перелік можливих поламок та шляхів їх вирішення (табл. 4.2).

Таблиця 4.2.

Перелік можливих поламок та шляхи їх вирішення

Несправність	Причина	Метод ремонту
Відсутній лінійний коливальний рух вібростолу	Вали віброзбудника обертаються в інший бік	Необхідно перенаправити обертання валів віброзбудника
Кипіння шару не відбувається	Проблеми з герметичністю, або засмічення патрубків вентилятора	Поновити герметичність
Сторонні звуки при роботі	Ослаблено кріплення віброзбудників або інших деталей, що обертаються	Підтягти деталі, кріплення яких ослабло
Нагрівання руби балки віброзбудника	Ослаблено кріплення віброзбудників	Підтягти деталі, кріплення яких ослабло

Коливання ПСС мають характер кола	Не працює один з віброзбудників	Ремонт віброзбудника або заміна кабелю
Коливання ПСС мають хаотичний характер	Зміщення дебалансів на різі величини	Виправити невідповідність зміщення дебалансів

4.1.2. Вібропневмовідцентровий сепаратор

Процес розділення НМ за густиною насіння циліндричними вібропневмовідцентровими сепараторами має суттєві відмінності від процесу розділення на пневмосортувальному столі.

Дослідження процесу вібропневмовідцентрового розділення НМ проводились на лабораторному циліндричному вібропневмовідцентровому сепараторі (рис. 4.12), який побудовано на елементній базі сепаратору типу БЦС, що серійно випускається.

Лабораторний вібропневмовідцентровий сепаратор складається з корпусу, ротора, на якому розташована повітряпроникна безпровальна робоча поверхня, тарільчастого дискового розкидача, бункеру завантажувального. Внутрішній простір вертикального ротора зв’язано з вентилятором. Вікна на поверхні ротора слугують для всмоктування повітря. Решітний дільник розміщено в нижній частині вібропневмоцентрифуги (рис. 4.13).

Вібропневмовідцентровий сепаратор працює наступним чином: НМ через бункер завантажувальний 5 потрапляє на тарільчастий розкидач 4, який обертаючись рівномірно завантажує зону формування усталеного шару НМ. Частинки НМ, потрапляючи на робочу поверхню під дією відцентрової сили, притискаються до її поверхні та під дією сили тяжіння та коливань робочої поверхні починають рухатись у нижню частину вібропневімовідцентрового сепаратора до зони вивантаження. Під дією коливань робочої поверхні та сили дії повітряного потоку НМ переходить у вібропневморозріджений стан та

розпочинається процес сегрегації, при цьому, частинки НМ з більшою густиною (завдячуючи впливу відцентрової сили) притискаються до робочої поверхні, а частинки з меншою густиною – спливають на поверхню шару.

«Важка» і «легка» фракція під дією відцентрової сили вивантажуються у відповідні лотки.

Робоча поверхня являє собою безпровальний циліндр, що виготовлено зі штампованого листового металу з отворами діаметром 1 мм, які є достатніми для всмоктування повітря ззовні, але недостатніми для проникнення НМ. Діаметр ротора – 0,24 м, площа – 0,377 м^2, висота – 0,5 м.

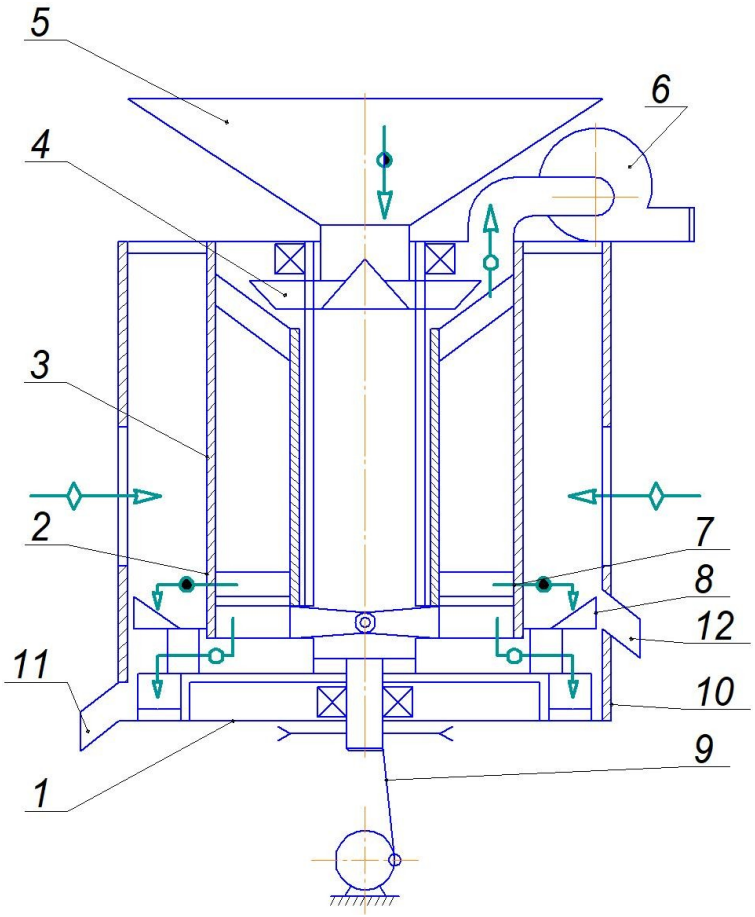


Рис. 4.12. Конструктивна схема лабораторного вібропневмовідцентрового сепаратора:

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – поверхня робоча; 4 – розкидач дисковий; 5 – бункер завантажувальний; 6 – патрубок вентилятора; 7 – дільник решітний; 8, 11, 12, 13 – лопатки; 9 – віброзбудник; 10 – вікна

Амплітуда коливань змінюється в межах 4…10 мм. Частота обертань ротора знаходиться в межах 200…1500 об./хв. Використано привід від електродвигуна потужністю 0,8 кВт, потужність привода вентилятора становить 2,5 кВт. Витрати повітря складають 2800 м^3/год, напір вентилятора – 900 Па.

Рис. 4.13 Загальний вид лабораторного циліндричного вібропневмовідцентрового сепаратора

Кінематичні режими роботи вібропневмовідцентрового сепаратора регулювався частотним перетворювачем ПЧВ203 – 5К5-В (рис. 4. 14) та контролювався тахометром Benetech GM8906 (рис. 4. 15).

Рис. 4. 14 Частотний перетворювач ПЧВ203 - 5К5-В («ОВЕН», м. Харків)

Рис. 4. 15. Тахометр Benetech GM8906

Основні характеристики лабораторного циліндричного вібропневмовідцентровомго сепаратора: продуктивність – від 4000 до 6000 кг/год., частота коливань – 90 $с^{-1}$, амплітуда коливань – 6 мм., необхідна витрата повітря 130 – 140 $м^3$ /хв., встановлена потужність – 7,2 кВт, тиск вентилятора – 500 Па. Висота робочої поверхні – 500 мм.

Під час досліджень, змінюючи величину отвору заслінкою 2 регулятора завантаження, регулювалась подача НМ.

Незалежно друг від друга змінювались наступні параметри:

- швидкість повітряного потоку варіювалась частотним перетворювачем ПЧВ203 – 5К5-В;
- частота коливань варіювалась за допомогою варіатора приводу і частотним перетворювачем ПЧВ102 – 1К5-В;
- амплітуда коливань – зміною місць поєднання шатунів з траверсами;
- питоме навантаження – регулюванням регулятора завантажувального пристрою.

Швидкість повітряного потоку визначалась термоанемометром DT3880 (Рис. 4. 16) (діапазон вимірювання 0,1 – 25 м/с) і анемометром з трубкою Піто DT8920 (діапазон вимірювання 1 – 80 м/с).

При завантажуванні лотків і дозаторів використовувались ваги типу ВЛКТ – 5, похибка яких складає ± 200мг.

Значення амплітуди коливань визначалось вібрографом ВР-1 за допомогою спеціальних штанг. Отримані значення виводились приладом на стрічку.

Рис. 4. 16. Термоанемометром DT3880

При визначенні фізико-механічних властивостей НМ попередньо був очищений аерогравітаційним сепаратором та трієрним блоком «Петкус».

Розмірні характеристики частинок НМ визначались у відповідності до ДСТУ 4138-2002 решітним класифікатором РКФ-1 (Рис. 4.17) [18]. Розміри частинок НМ визначено за допомогою лінійки з клиновою щілиною.

Рис. 4.17 Лабораторний решітний класифікатор

4.2. Програма та методика досліджень

Програму експериментальних досліджень складено відповідно до загальної мети і передбачено розв’язок наступних задач:

1. Дослідження ефективності та обґрунтування параметрів процесу вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння на плоских та циліндричних повітропроникних робочих поверхнях для підтвердження прийнятих припущень при розробці механіко-математичної моделі руху вібропневморозрідженого шару НМ.

2. Визначення фізико-механічних властивостей НМ: фракційний склад, розмірні характеристики, коефіцієнти тертя, вологість, натура.

3. Визначення аеро- та гідродинамічних характеристик вібропневморозрідженого шару НМ при його розділенні за густиною насіння.

4. Визначення впливу оптимальних конструктивних та режимних параметрів робочих органів на показники процесу розділення НМ.

5. Виробничо-дослідна апробація розробленого обладнання для вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння.

Експериментальні дослідження процесу вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння проводились у три етапи [13, 38, 91, 131].

На першому етапі визначалась відповідність характеристик розроблених моделей вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння.

На другому етапі використано методику планування багатофакторного експерименту.

На третьому етапі вивчалась робота ПСС, вібропневмовідцентрового сепаратора у лабораторних та виробничих умовах у відповідності до ДСТУ 70.10.2 – 83. Згідно такої методики, кінцева агротехнічна оцінка сепаратора робиться за його продуктивністю та якісним показникам процесу розділення НМ.

Під час проведення експериментальних досліджень використовувались загальновідомі та рекомендовані ДСТУ методики, а також, приватні, що взяті із літературних джерел, або такі, що розроблено під час досліджень. Методика проведення однотипних дослідів була однакова. Досліди проводились при сталих режимах роботи сепаруючих машин, лабораторних установок, приладів та обладнання. Під час досліджень впливу окремих факторів було створено умови для їх сталої фази.

Довірливу ймовірність (коефіцієнт надійності дослідів) приймали рівною 0,95. Довірливий інтервал (гранична похибка) дорівнював $\pm 3\sigma$ (де σ – середньоквадратичне відхилення). Необхідна кількість повторювання дослідів дорівнювалась трьом.

Дослідження ефективності процесу вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів на фракції за густиною насіння

Для дослідження ефективності процесу вібропневматичного розділення використовувались: пневмосортувальний стіл ПСС-2,5 (рис.4.1) і модернізований циліндричний сепаратор БЦС (рис.4.12).

Якість роботи вібропневматичних сепараторів оцінюється за продуктивністю, вмістом домішок, які враховуються поштучно у очищеному насінні та втратам його у легку фракцію.

У одному кілограмі очищеного насіння еліти кількість насіння інших рослин не повинна перевищувати 10 штук, у тому числі 5 штук насіння культурних рослин та 5 штук бур'янів. Втрати повноцінного насіння не повинні перевищувати 10%.

Для оцінки технологічної ефективності процесу вібропневмовідцентрової сепарації за густиною насіння, за чистотою та кількістю виділення важковідокремлюваних домішок проводиться відбір НМ масою не менше 1 кг до та після вібропневмовідцентрового сепаратора при сталому режимі роботи.

Дослідження впливу факторів на процес вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння проводили наступним чином.

Відбір проб проводився під час сталого режиму роботи. Через десять хвилин після початку роботи сепаратора відповідні рукави дільників було встановлено у ємності для збору фракцій.

Досліди проводились на чотирьох подачах НМ: 800; 1000; 1100 та 1200 кг/год у триразовій повторюваності. Відбір проб на кожній подачі НМ проводився протягом 1 хвилини на сталому режимі роботи.

Вага середнього зразка дорівнювала 1000 г. Під час проведення дослідів, відібране насіння насипали на стіл та ретельно перемішували, після чого лінійкою вирівнювали вибірку у формі квадрату товщиною не більше 15 мм. Надалі квадрат ділили навхрест на чотири частини, після чого з двох протилежних трикутників насіння видаляли, а залишок знову перемішували.

Насіння, що було перемішано знову ділили на чотири квадрати. Таке розділення проводилось до тих пір поки не було отримано два середні зразки масою 50 г. кожен. Після чого насіння з протилежних трикутників висипали в одну ємність. Таким чином було отримано перший та другий середній зразки.

За результатами аналізу проб було розраховано оптимальні показники роботи сепаратора для різних подач НМ.

За результатами проведених дослідів одержано рівняння залежності повноти виділення важковідокремлюваних домішок, при 10% втрат насіння в залежності від подачі НМ:

$$\varepsilon = 2 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 - 0{,}056 \cdot Q + 130{,}7, \qquad (4.1)$$

при R^2=0,9635

де: ε – повнота виділення, при 10 % втрат насіння, %;

Q – подача НМ, кг/год

Інші оціночні показники роботи сепаратора розраховано при 10% втрат насіння, що мають наступні значення:

натурна маса – 798,54…800,24 г/дм^3;

маса 1000 зерен – 49,6…50 г;

засміченість важковідокремлюваними домішками 0…4 од./кг;

кількість насіння інших культур – 5…7 од/кг.

Під час проведення дослідів на усіх подачах насіння відповідає вимогам: ДСТУ 4138-2002 «Насіння сільськогосподарських культур сортові та посівні якості» [62]; ДСТУ 2240 - 93 «Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови» [63]; ДСТУ 3768-2019 «Пшениця технічні умови» [65]; ДСТУ 9082-2021 «Соняшник. Технічні умови» [66]; ДСТУ 4964-2008 «Соя. Технічні умови» [67].

При проведенні експериментальних досліджень використано загальновідомі та розроблені авторами [13] методики досліджень.

Методика визначення густини насіння.

Найбільш ефективним способом визначення густини насіння є занурення у розчини солей.

При проведенні дослідів було використано три ємності об'ємом 300 мл, у першу наповнено водою з густиною 1,0 кг/м^3, а дві інші розчинами солей NaOH з густинами 1,25 кг/м^3 та 1,4 кг/м^3 відповідно. Густину рідин вимірювали ареометром (ТУ У 14088257.001 – 94, діапазон вимірювання 1,18 – 1,4 кг/м^3).

Було використано три коробки з написами: «важке насіння», «середнє насіння» та «легке насіння», що відповідає фракціям насіння різної густини, для відбору насіння на аналізи.

Для визначення густини брали проби кількістю 1000 одиниць.

Пробу насіння почергово занурювали у рідини різної густини. Спочатку занурювали у ємність з водою. Після потрапляння проби у ємність з розчином, вміст ємності перемішувався до видалення кульок повітря. Насіння, що спливало, видалялось у коробку з написом «легке насіння». Насіння, яке занурювалось у воду, виймалось та поміщалось до ємності із рідиною, густина якої становила 1,25 кг/м^3. Насіння, яке спливало, видалялось у коробку із написом «середнє насіння». Насіння, яке потонуло, переміщувалось у третю ємність. Таке насіння висипали до коробки із написом «важке насіння».

Після п'ятиразового проведення дослідів проводили підрахування кількості насіння у коробках і за пропорцією визначали значення густини η_i у відсотках:

$$\eta_i = \frac{K_i}{K} \cdot 100\%, \qquad (4.2)$$

де: K_i – кількість насіння відповідного значення густини, од.;

К – кількість насіння у пробі, од.

Визначення густини проводили до третього знаку.

Методика визначення вологості насіння

Визначення вологості насіння проводилось у відповідності до стандартів: ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]; ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови; ДСТУ 3768:2019. Пшениця технічні умови; ГОСТ 10854-88 Насіння олійне. Методи визначення сміттєвої, олійної та осібно врахованої домішки.

У відповідності до ДСТУ використаний повітряно-тепловий метод згідно якого вологість визначається шляхом визначення втрат вологості при висушуванні.

Насіння із середньої вибірки (без крупнонасіннєвих та мілконасіннєвих зерен) ретельно розмелене лабораторним електричним млинком протягом 40 с. Розмелену масу насіння було завантажено у скляні ємності та розмішували протягом 5 с. Після чого розмелене насіння розміщали у попередньо зважені алюмінієві бюкси. Маса кожної навіски складала 5,00 г.

Ретельно закриті бюкси поміщали до попередньо розігрітої до необхідної температури сушильної шафи. Розміщення бюксів відбувалось у один ряд на кожній поличці.

Під час проведення дослідів режими сушіння для різних культур різнились: для пшениці температура висушування дорівнювала $+150^0$ С, час сушіння – 20 хвилин; для зернових та зернобобових культур температура висушування дорівнювала $+130^0$ С протягом 40 хвилин; для олійних культур температура висушування складала 105^0 С протягом 30 хвилин.

По завершенню встановленого терміну висушування, бюкси з навісками виймали з сушильної шафи тигельгими щипцями та охолоджували протягом

10 хвилин на металевій плиті. Після закінчення терміну охолодження, бюкси з кришками зважувались.

За результатами зважування кожної навіски до та після висушування було визначено втрату вологості насіння у відсотках. Визначення вологості вважалось повністю закінченим після того, як розбіжність між показниками двох навісок була не більшою ніж 0,2%. У разі того, якщо розбіжність становила більші значення, визначення вологості повторювалось.

Вологість насіння при одноступічнастому висушуванні у відсотках розраховувалась за формулою:

$$W = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100\%, \qquad (4.3)$$

де: m_1 – маса навіски до висушування, г;

m_2 – маса навіски після висушування, г.

За результатами визначення вологості проб насіння приймалось середньоарифметичне значення вологості двох навісок.

Методика визначення оптимальних конструктивних параметрів та кінематичних режимів сепаруючої машини для розділення НМ за густиною насіння

Перевірка працездатності сепаруючої машини

Для перевірки працездатності сепаруючої машини було розроблено схему проведення однофакторного експерименту.

Було використано НМ пшениці, кукурудзи, соняшнику та сої. При дослідженнях роботоздатності ПСС змінювались повздовжній та поперечний кути нахилу робочої поверхні та налаштовуваласть подача матеріалу.

Критерієм оцінки було обрано повноту виділення важковідокремлюваної домішки, відсотковий вихід матеріалу важкої фракції та втрати повноцінного насіння до середньої і легкої фракцій.

Зону розвантаження робочої поверхні було поділено на сектори, на яких протягом 1 хвилини відбувався відбір проб. Проби зважувались та лабораторно визначались якісні характеристики матеріалу (вміст важковідокремлюваної домішки й кожній пробі).

Проби в яких виявлена засміченість більша ніж регламентовано ДСТУ, але менша ніж у вхідному матеріалі, були направлені на повторне доочищення.

Проби, у яких засміченість перевищувала початкові значення матеріалу було відправлено до відходу.

Досліди було проведено у триразовій повторності.

Попередні дослідження дозволили встановити фактори, що мають визначальний вплив на процес розділення.

Для ПСС:

- повздовжній кут нахилу робочої поверхні;
- поперечний кут нахилу робочої поверхні;
- амплітуда коливань робочої поверхні;
- частота коливань робочої поверхні;
- швидкість повітряного потоку на вході в шар насіння.

Для вібропневмовідцентрового сепаратора:

- амплітуда коливань робочої поверхні;
- частота коливань робочої поверхні;
- швидкість повітряного потоку на вході в шар НМ.

Дослідним шляхом було визначено фактори, що мають визначальний вплив на процес розділення. Базуючись на цій інформації, було обрано діапазони варіювання значень факторів.

Для встановлення ступеню впливу факторів, було проведено експеримент за планом Бокса-Бенкена. План дослідів та їх результати наведено у Додатку В.

Експеримент відбувався активно-пасивним шляхом, оскільки швидкості повітряного потоку в двох зонах деки не фіксувались на певних рівнях. Варіація відбувалась заслінкою вентилятора та визначалась анемометром.

Поставлено задачу з моделювання відносного руху *i*-го колового шару сировини з визначеною густиною з урахуванням частоти коливань робочої поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора та швидкості потоку повітря, що надає матеріалу властивостей псевдозрідженого середовища. Одним із рішень цієї задачі є значення радіусу *i*-го колового шару матеріалу на виході із сепаратора. Тобто відома координата знаходження частинок із визначеною густиною перед відведенням їх у вивантажувальний лоток.

Граничні значення густини матеріалу, для якої проводили моделювання, визначались відповідно до її виду та сортових особливостей. Під граничними значеннями густини мається на увазі густина «легкої» (хворе та ушкоджене насіння) та «важкої» (біологічно активне насіння) фракцій.

4.3. Дослідження розроблених інтенсифікаторів хвилеподібного та шиповидного типів

Для підвищення ефективності процесу розділення НМ за густиною насіння, шляхом інтенсифікації процесу, було розроблено механічні інтенсифікатори: хвилеподібного (рис. 4.18. – 4.20.) та шиповидного (рис. 4.21.) типів.

Рис. 4.18 Загальний вид інтенсифікатора хвилеподібного типу при розділенні НМ

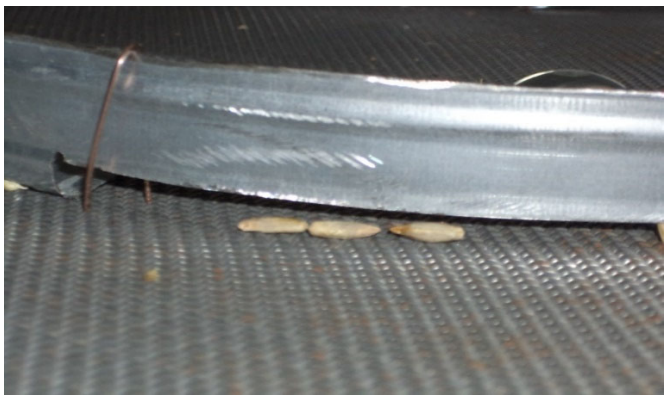


Рис. 4.19 Експериментальні випробування інтенсифікатора хвилеподібного типу

Інтенсифікатори хвилеподібного типу виготовлено у вигляді сінусоіди гармонічних коливань та розташовані на робочій поверхні деки ПСС вздовж напряму руху шарів НМ.

Інтенсифікатори використовуються для підвищення ефективності перерозподілу частинок до фракцій відповідної густини. Інтенсифікатор має хвилеподібну форму, яка сприяє пришвидшенню/уповільненню шарів частинок матеріалу під час руху вздовж робочого боку.

НМ через завантажувальний пристрій потрапляє на робочу поверхню ПСС де під дією коливань робочої поверхні, відповідної частоти та амплітуди

та під дією повітряного потоку набуває стану багатофазного псевдозрідженого середовища. Інтенсифікатори розташовано на робочій поверхні (Рис. 4.20) і додатково позитивно впливають на процес розшарування НМ, оскільки уповільнюють рух шарів на вершинах «хвилі», за рахунок стискання шару, та пришвидшують на ділянках розширення «хвилі». Додатковий імпульс від механічного впливу інтенсифікаторів на шари НМ дозволяє підвищити ефективність перерозподілу частинок у фракції відповідної густини та покращити чистоту основної фракції, що складається з частинок НМ, які мають підвищену густину і, відповідно, енергію проростання.

В нижній частині інтенсифікатора хвилеподібного типу передбачено щілину для вільного проходу частинок нижнього елементарного шару. Щілину розраховано таким чином, що частинки матеріалу, рухаючись через щілину без заклинювання.

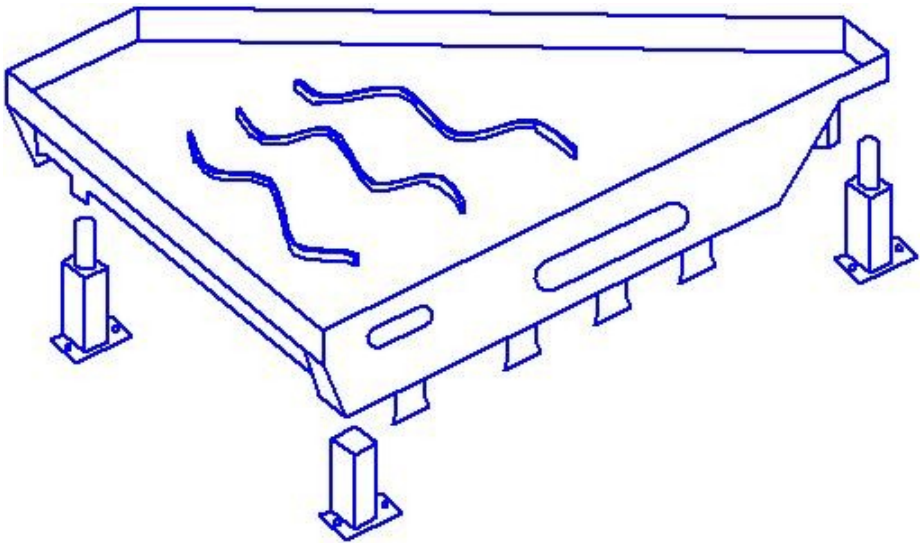


Рис. 4.20. Конструктивна схема ПСС з розташованими на робочій поверхні інтенсифікаторами хвилеподібного типу

Висоту інтенсифікатора хвилеподібного типу розраховано таким чином, що шар НМ не переміщувався через верхню частину інтенсифікатор у суміжні сектори робочої поверхні та вільно рухався вздовж інтенсифікатору.

Висоту щілини, яку розташовано у нижній частині інтенсифікатору розраховано із урахуванням вільно проходження частинки НМ та унеможливлення заклинювання частинки у отворі.

Під час досліджень, в залежності від НМ, що обробляється, варіювались параметри: висота хвилеподібного інтенсифікатору *h,* висота прорізу хвилі h_H. Довжина хвилі *l* хвилі залишалась незмінною, оскільки обиралась, виходячи з параметрів формування шару (виключаючи зону завантаження та вивантаження матеріалу).

Рекомендовано раціональні значення інтенсифікаторів хвилеподібного типу, які встановлено на робочій поверхні: шаг встановлення $H = 350…450$ мм; для пшениці: висота хвилеподібного інтенсифікатору $h = 10…12$ мм, висота прорізу хвилі $h_H = 2…3{,}5$ мм, довжина хвилі $l = 150…250$ мм; для кукурудзи: $h = 15…20$ мм, висота прорізу хвилі $h_H = 3…8{,}5$ мм, довжина хвилі $l = 150…250$ мм; для соняшнику: $h = 10…15$ мм, висота прорізу хвилі $h_H = 3…4{,}5$ мм, довжина хвилі $l = 150…250$ мм; для сої: $h = 15…20$ мм, висота прорізу хвилі $h_H = 5{,}5…7$ мм, довжина хвилі $l = 150…250$ мм. На підставі результатів досліджень удосконалено клас сепаручих машин що випускається серійно: розроблено та впроваджено у виробництво інтенсифікатори хвилеподібного типу (пневмосепарувальні столи і вібропневмовідцентрові сепаратори), розроблено нову сепаруючу машину та удосконалено технологічну лінію підготовки високоякісного НМ, шляхом розділення матеріалу за густиною насіння на робочих поверхнях плоскої та циліндричної форми.

При проведенні експериментальних досліджень було визначено порівняльну ефективність роботи інтенсифікаторів шиповидного типу, які розташовано на робочій поверхні ПСС в зоні розділення НМ (Рис. 4.21).

Принцип роботи інтенсифікатору полягає у передачі додаткового механічного впливу на шари НМ. Інтенсифікатори шиповидного типу розташовано на робочій поверхні у шаховому ладі.

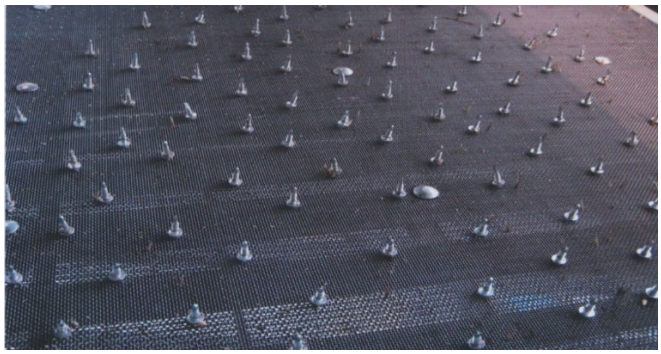


Рис. 4.21. Загальний вид інтенсифікаторів шиповидного типу

Відстань між шипами обиралась, виходячи з умови виключення можливості заклинювання. Вершина шипа має закруглену форму для унеможливлення травмування насіння.

Експериментальними дослідженнями визначено, що вищу ефективність мають інтенсифікатори хвилеподібного типу, оскільки не порушують процес перерозподілу частино до фракцій відповідної густини оскільки не викликають виникнення ефекту перемішування. Впливу піддається об’єм шару НМ, що позитивно впливає на процес розділення НМ.

4.4. Висновки за розділом

1. Для верифікації результатів розв’язку механіко-математичної моделі процесу розділення НМ за густиною насіння досліджено ефективність та обґрунтовано параметри процесу вібропневматичного розділення на плоских та циліндричних робочих поверхнях.

2. Використання методик з проведення експериментальних досліджень, що є загальновідомими так і розроблені та аутентичними. дозволило експериментально дослідити процес розділення НМ за густиною насіння з урахуванням факторів, які не було враховано раніше. Використання розроблених методик дозволило визначити аеро- та гідродинамічні характеристики вібропневморозрідженого шару НМ при його сепаруванні за густиною насіння. Запропоновано схеми: розподілу поверхні деки за зонами різних швидкостей повітряного потоку; схему зміни газодинамічних

параметрів повітря за перерізами ПСС: 0-0; 1-1; 2-2; 3-3; 4-4; 5-5; 6-6; 7-7; 8-8; 9-9.

4. Спираючись на результати факторного експерименту для зернових культур, досліджено вплив на ефективність процесу розділення НМ за густиною насіння інтенсифікаторів хвилеподібного то шиповидного типів, що дозволило визначити геометрію та габаритні розміри інтенсифікаторів. Визначено раціональні значення інтенсифікаторів хвилеподібного типу, які встановлено на робочій поверхні: шаг встановлення H = 350…450 мм; для пшениці: висота хвилеподібного інтенсифікатору h = 10…12 мм, висота прорізу хвилі h_H = 2…3,5 мм, довжина хвилі l = 150…250 мм; для кукурудзи: h = 15…20 мм, висота прорізу хвилі h_H = 3…8,5 мм, довжина хвилі l = 150…250 мм; для соняшнику: h = 10…15 мм, висота прорізу хвилі h_H = 3…4,5 мм, довжина хвилі l = 150…250 мм; для сої: h = 15…20 мм, висота прорізу хвилі h_H = 5,5…7 мм, довжина хвилі l = 150…250 мм. На підставі результатів досліджень удосконалено клас сепаруючих машин що випускається серійно: розроблено та впроваджено у виробництво інтенсифікатори хвилеподібного типу (пневмосепарувальні столи і вібропневмовідцентрові сепаратори), розроблено нову сепаруючу машину та удосконалено технологічну лінію підготовки високоякісного НМ, шляхом розділення матеріалу за густиною насіння на робочих поверхнях плоскої та циліндричної форми.

5. За результатами експериментальних досліджень обрано методи визначення раціональних параметрів процесу розділення НМ за густиною насіння, згідно яких проведено багатофакторний експеримент за планом Бокса-Бенкіна для повітропроникних робочих поверхонь сепаруючих машин, розроблено методику вимірювання амплітуди коливань деки ПСС у повздовжньому і поперечному напрямках та циліндричної робочої поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора. що дозволило визначити вплив раціональних конструктивних параметрів та кінематичних режимів параметрів робочих органів на показники процесу розділення НМ.

РОЗДІЛ 5
ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

Багаторічна експлуатація ПСС та вібропневмовідцентрових сепараторів, що розділяють НМ за густиною насіння, на зернопереробних підприємствах у технологічній лінії зарекомендувала себе, як найбільш ефективна складова для отримання високоякісного НМ. Маючи продуктивність - від 2500 до 10000 кг/год (в залежності від моделі сепаратора і матеріалу, що розділяється), такий тип машин забезпечує найбільш ефективне виділення повноцінного, біологічно активного насіння, яке дасть найкращі сходи.

Для розв’язку поставлених задач, з метою уточнення результатів теоретичних досліджень, перевірки механіко - математичної моделі на адекватність і визначення оптимальних значень необхідно провести перевірку одержаних результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

5.1. Дослідження ефективності процесу вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння

5.1.1. Насіннєві матеріали, що було використано для досліджень

Тисячорічна історія еволюції зернових культур забезпечила зернину надійним захистом від агресивного впливу навколишнього середовища. Зернина захищена декількома оболонками, тому, при природньому способі відділення дозрілого зерна, травмування останнього практично зведено до нуля. Однак, з розвитком машин, обладнання та технологій післязбиральної обробки зерна, машини стають все більш високопродуктивні та, нажаль, більш

агресивні за своїм впливом на навколишнє середовище, в цілому, та на зернину, зокрема.

Технологічний процес післязбиральної обробки зерна обумовлює багаторазовий механічний вплив робочих органів машин технологічної лінії, на частинку матеріалу, що може викликати їх травмування. Відсоток травмування, в залежності від матеріалу та технології, може досягати критичних значень [60].

Разом з тим, збільшення продуктивності процесу виробництва зерна неможливе без інтенсифікації процесу кожної технологічної операції. Для отримання високоякісного НМ необхідно жорстко дотримуватись агро-технологічних вимог на всіх етапах виробництва насіння. До висіву використовується сортове насіння, що не уражене шкідниками, не травмоване та таке, що має підвищений біологічний потенціал. Зерновий матеріал необхідно вчасно очистити від домішок з забезпеченням мінімальної травмованості зернівок та довести до кондиційних вимог що до вологості.

НМ, що потрапляє до обробки зерноочисними машинами, які розділяють матеріал за густиною насіння, проходить певну кількість технологічних операцій з первинної та вторинної обробки (очищення, калібрування, сушіння, транспортування, то що). Під час взаємодії робочого органу машини та частинки, на останню впливають сили, що виникають при ударі, терті, стисненні то що. Така взаємодія травмує частинку, оскільки вона має значно меншу жорсткість та міцність ніж робочі органи машин. Також, недотримання технологічних умов, під час процесу післязбиральної обробки, а саме: довготривала взаємодія з матеріалом, який ушкоджено шкідниками, та/або недотримання температурного режиму, під час сушіння НМ, значно знижує кондиційні якості матеріалу, що неприпустимо до НМ.

Частинки НМ у процесі післязбиральної обробки отримують макротравми, до яких слід віднести: відбивання частини зернини; частково, або повністю знищена оболонка, та мікротравми (внутрішні та зовнішні мікроушкодження) [198, 199].

У масі НМ, при довготривалому зберіганні під дією високої температури навколишнього середовища, може виникнути ефект самонагрівання матеріалу, а висока кількість травмованого насіння надає лавиноподібності протікання процесу і максимальна температура у 80 градусів Цельсію може бути досягнута за декілька годин. Процес самонагрівання – є незворотнім і призводить до значних економічних збитків.

Для отримання елітного насіння доцільно зменшення механічного впливу на частинки НМ та використання ощадливих технологій.

Для виділення насіння з підвищеним біологічним потенціалом використовуються сепаруючі машини, що розділяють матеріал за густиною насіння.

Для розділення НМ на фракції за густиною насіння, використовуються пневмосортувальні столи та вібропневмоцентрифуги, які різняться за принциповою конструктивною схемою, однак, використовують споріднену технологію розділення.

При проведенні експериментальних досліджень було використано найбільш поширені в Україні НМ:

- озима пшениця сорту «Харківська - 99», маса 1000 зерен – 38 г, густина частинки – 780 кг/м3, вологість – 13%;
- гібрид кукурудзи трійний модифікований «Донор МВ», маса 1000 зерен – 30 г, густина частинки – 850 кг/м3, вологість – 14 %;
- соняшник кондитерський СПК, маса 1000 зерен – 43 г, густина – 440 кг/м3, вологість – 7%;
- соя сорту «Фортуна», маса 1000 зерен – 142 г, густина – 800 кг/м3, вологість – 11 %.

Критерієм ефективності процесу розділення прийнято один із визначальних показників якості НМ, що є кінцевою метою процесу – чистота основної фракції. Під чистотою (Purity) основної фракції НМ розуміють вміст основної культури у відсотках до наважки, яку взято для аналізу.

5.1.2. Місце проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження були проведені на виробничих потужностях приватного акціонерного товариства «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків) у період з 4 березня 2020 року по 4 жовтня 2020 року в межах науково-дослідної роботи «Обґрунтування параметрів процесів сепарування сипких матеріалів повітропроникними робочими поверхнями за густиною насіння». В цей період було проведено порівняльне визначення якісних показників параметрів процесу сепарації НМ за густиною насіння циліндричними робочими поверхнями.

Результати дослідження з впровадження інтенсифікаторів хвилеподібного типу апробовано на ПрАТ ХМЗ (Хорольський механічний завод, м. Хорол) для модернізації, удосконалення ПСС-3,5, а також розроблення ПСС-10.

Експериментальні дослідження з перевірки ефективності впроваджених результатів дослідження з інтенсифікації процесу розділення на ПСС проводились в лабораторних умовах току навчально-дослідного поля ХНТУСГ-ДБТУ (м. Харків).

Виробничі випробування результатів дослідження було проведено у період з 1 липня по 31 вересня 2023 року на підприємствах реального сектору економіки: ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ); ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп); ТОВ «Батьківщина» (с. Карабутове, Сумська обл.). Сепаруючі машини підприємств, що використовуються для розділення насіннєвого матеріалу за густиною насіння налаштовувались, використовуючи запропоновані методики, на оптимальні кінематичні режими, що узгоджувались з фізико-механічними властивостями матеріалу, який оброблявся.

Результати дослідження апробовано під час процесу підготовки НМ для закладання в Національне сховище на довготривале зберігання «Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр’єва» Національної академії аграрних наук України.

З проектним підприємством «ФОП Знайдюк Василь Григорович» (м. Чернігів), в межах наукових досліджень, було заключено договір на надання наукових послуг (Додатки Д, Г), згідно якого були проведені роботи що налаштування технологічних ліній згідно результатів досліджень.

Використання рекомендацій дозволило скоротити час на налаштування поточної лінії підготовки НМ; завдячуючи рекомендованим оптимальним параметрам сепаруючих машин, збільшено чистоту основної фракції.

Рис. 5.1. Перевірка стану регулювань сепаруючої машини

Рис. 5.2. Перевірка стану робочої поверхні

Рис. 5.3. Регулювання ременя натяжного на модернізованому вібропневмовідцентровому сепаратору

Рис. 5.4. Узгодження сепаруючих машин технологічної лінії підготовки НМ на ««Харківському комбікормовому заводі» (м. Харків)

Рис. 5. 5. Налаштування завантажувального пристрою

Рис. 5.4. Підключення ПСС для проведення експериментальних випробувань на навчально-дослідних полях ХНТУСГ (ДБТУ)

Результати покращення якісних показників процесу підтверджено ДП «Державний центр сертифікації і експертизи сільськогосподарської продукції» та даними лабораторій відповідних підприємств.

5.2. Перевірка ефективності розроблених механіко-математичних моделей вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння

Для перевірки адекватності та працездатності розроблених механіко-математичних моделей розділення НМ і ефективності щодо їх практичного застосування, проведено дослідження, яке включає два етапи – теоретичний та практичний. На першому теоретичному етапі проведено теоретичне моделювання процесу розділення НМ залежно від основних параметрів процесу. На другому практичному етапі проведено розділення НМ у виробничих умовах залежно від відповідних параметрів. Означені дослідження проводились для ПСС [232] та для вібропневмовідцентрового сепаратора [233].

5.2.1. Аналіз ефективності застосування механіко-математичної моделі розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння плоскими повітропроникними вібраційними поверхнями

Перед початком проведення експериментальних досліджень, згідно рекомендацій [189], було обрано інтервали варіювання показників, що мають визначальний вплив на процес розділення НМ за густиною насіння та проведено їх кодування (Додаток В).

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \qquad (5.1.)$$

де: x_i – кодоване значення фактору, що позначено: верхній рівень (+1), нижній рівень (– 1);

X_i – натуральне значення фактору;

X_{0i} – натуральне значення фактору на нульовому рівні;

ε_i - натуральне значення інтервалу варіювання фактору.

Для пошуку та визначення оптимального співвідношення факторів, що мають визначальний вплив на процес розділення, було проведено експериментальні дослідження, що становили шістнадцять дослідів.

Для отримання математичних залежностей впливу факторів, що обрано, було проведено факторний експеримент за планом Бокса-Бенкіна.

Коефіцієнт надійності дослідів приймали таким, що дорівнює 0,95. Максимальна похибка дорівнювала ± 3σ, де σ – середньоквадратичне відхилення. Необхідна кількість повторення дослідів дорівнювалась трьом.

Обробка результатів експериментальних досліджень проводилась за допомогою методів теорії ймовірності та математичної статистики з використанням загальноприйнятих критеріїв Фішера-Стьюдента. Також визначались загальновідомі величини: $\overline{X}$ —- середньоарифметичне; σ^2 — дисперсія; υ – коефіцієнт варіації. По завершенні серії дослідів визначався показник точності, який дорівнював відношенню середньої похибки до середньоарифметичного.

Під час перевірки адекватності механіко-математичної моделі використано метод дисперсного аналізу на рівні довірливої ймовірності 0,95.

Використано підготовлені матеріали, які було попередньо очищено та вирівняно за розмірними характеристиками.

Параметрами ПСС, що мають визначальний вплив на ефективність процесу розділення НМ прийняті: частота та амплітуда коливань деки, поздовжній та поперечний кут нахилу деки та швидкість повітряного потоку на вході в шар НМ. При цьому дослідження проводились для сировини, яка найбільше поширена у виробництві господарств України, а саме: пшениці, кукурудзи, соняшнику, сої.

На підставі аналізу літературних джерел та за результатами власних теоретичних і експериментальних досліджень було обрано фактори, що мають визначальний вплив на процес розділення (наведено у розділі 4).

З урахуванням дослідження процесу розділення НМ, критерієм оптимізації та визначення ефективності процесу з використанням

пневмосортувального столу прийнято один із важливих показників якості НМ – чистота його основної фракції (на відміну від процесу первинного очищення зернового матеріалу, де критерієм оптимізації – є питома продуктивність, або повнота виділення).

Під чистотою (*Purity*) основної фракції НМ розуміють вміст в ньому основної культури, виражений у відсотках до наважки, взятої для аналізу:

$$Purity=(m_{b.c.}/m_{ad.})\cdot 100\%, \quad (5.2)$$

де: $m_{b.c.}$ – маса основної культури; $m_{ad.}$ – маса домішок.

Під час розділення НМ у виробничих умовах наважку кінцевої продукції (насіння на виході з ПСС) розбирали вручну, виділяючи дві групи: насіння основної культури і відхід, що складається з різних домішок. Далі розраховували вміст основної фракції НМ у відсотках за формулою (5.2).

Форма та середній розмір основної фракції вихідної сировини, а також середня густина вихідної сировини при теоретичному моделюванні процесу її розділення та при розділенні даної сировини у виробничих умовах наведено у табл. 5.1.

При проведенні експериментальних досліджень, встановлювались діапазони кінематичних режимів для моделювання процесу розділення НМ на повітропроникних робочих поверхнях ПСС.

Таблиця 5.1

Форма і розмір основної фракції вихідної сировини та середня густина вихідної сировини

Сировина	Форма зернівки	Середні характерні розміри $a\times b\times c$, мм	Середня густина, кг/м^3
Пшениця	еліптична	3×3×8	780
Кукурудза	трикутна	10×10×7	760
Соняшник	трикутна	11×5×3	440
Соя	кругла	6	800

Обрані діапазони наведено в табл. 5.2.

Оскільки виділених чинників, які впливають на ефективність розділення НМ на ПСС, – п’ять, то для проведення аналізу зроблено наступні припущення. Вважалось, що раціональні частота та амплітуда коливань деки пневмосортувального столу визначаються у більшому ступені густиною вихідної сировини.

Таблиця 5.2

Діапазони кінематичних режимів для експериментального моделювання процесу розділення НМ на ПСС

Параметр	Діапазон
Частота коливань деки, (кол./хв)/($с^{-1}$)	800…1000/13.3…16.7
Амплітуда коливань деки, мм	4…6
Поздовжній кут нахилу деки, град.	0…8
Поперечний кут нахилу деки, град.	0…8
Швидкість повітряного потоку, м/с	1…3

Раціональні поздовжній та поперечний кути нахилу деки визначаються у більшому ступені ефективною силою тертя між шаром НМ (матеріалом) та поверхнею стола, а оптимальна швидкість повітряного потоку – аеродинамічними характеристиками частинок вихідної сировини та, відповідно, і їх середніми характерними розмірами. Виходячи з цього, дослідження розділено на частини. Тобто значення раціональної частоти та амплітуди коливань деки ПСС, а також величини раціональних поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки очевидно слід шукати як результат багатофакторного експерименту. Раціональну величину швидкості повітряного потоку знайдемо за екстремумами або асимптотами залежності від даної величини чистоти основної фракції, як параметра, за яким проводиться оптимізація.

Знаходження раціональних параметрів проводилось поетапно. На першому етапі визначали діапазони раціональні частоти та амплітуди коливань деки ПСС за постійних значень поздовжнього та поперечного кутів її нахилу, а також постійної швидкості повітряного потоку. На другому етапі визначали раціональні поздовжній та поперечний кути нахилу деки за умови оптимальних частоти та амплітуди її коливань і постійної швидкості повітряного потоку. На заключному етапі визначали раціональну швидкість повітряного потоку за умови вибору раціональних значень всіх інших параметрів.

Визначення раціональних параметрів процесу розділення НМ на ПСС у виробничих умовах проводилось за тією ж методикою. Однак визначення раціональних параметрів процесу розділення у виробничих умовах обмежено пошуком лише у трьох точках діапазону амплітуд та у п’яти точках діапазону частот коливань.

На рис.5.5 – 5.8 наведено порівняльні криві теоретичних значень одержаних розв’язкам розробленої механіко-математичної моделі, що наведена розділі 2 та даних одержаних експериментальним шляхом для різної сировини, при цьому вони являють собою залежності чистоти основної фракції від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС, у порівнянні з результатами експериментальних досліджень у виробничих умовах. Точками на цих графіках позначені величини чистоти основної фракції в залежності від частоти та амплітуди коливань ПСС, що отримані у виробничих умовах. Для наочності по точках, отриманих у виробничих умовах, проведені пунктирні лінії відповідного кольору.

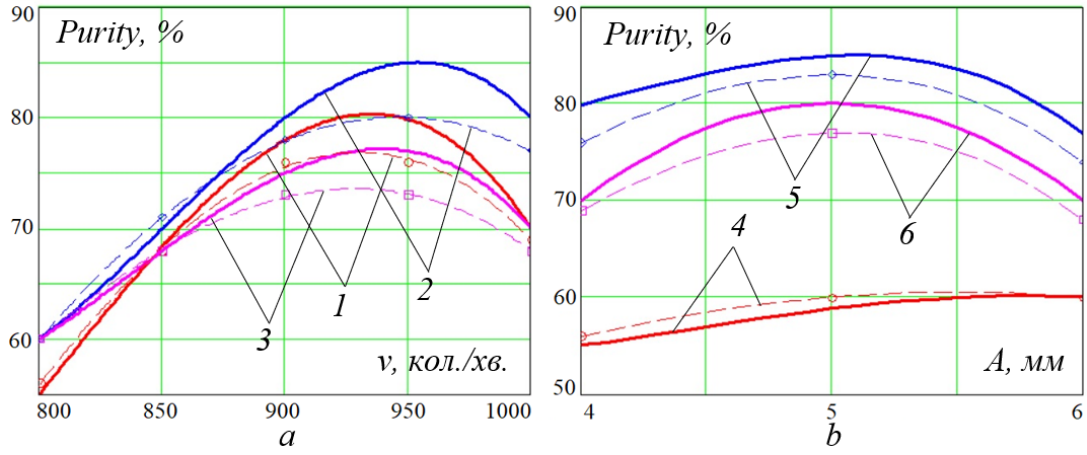


Рис.5.5. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС, відповідно, за різної частоти (1 – 800 кол./хв; 2 – 900 кол./хв; 3 – 1000 кол./хв.) та амплітуди коливань (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

Наведені на рис. 5.5 – 5.8 криві, що отримані теоретичним шляхом, відрізняються від даних отриманих у виробничих умовах. Однак відмінності у значення лежать у межах похибки. Так для розділення НМ із пшениці (рис.5.5) найбільше відхилення спостерігається за частоти коливань 950 кол./хв та амплітуди 5 мм і складає 6%.

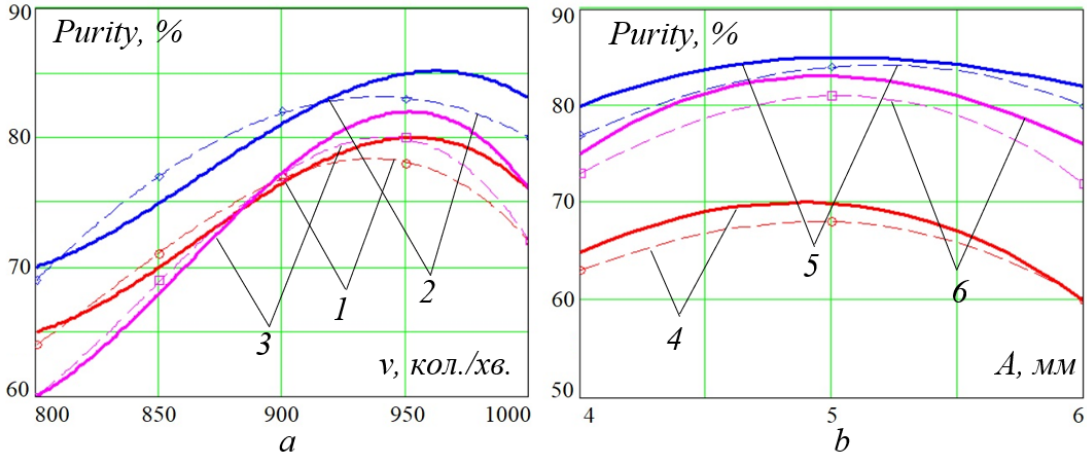


Рис.5.6. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ кукурудзи, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС, відповідно, за різної частоти (1 – 800 кол./хв; 2 – 900 кол./хв; 3 – 1000 кол./хв) та амплітуди коливань (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

Для розділення НМ кукурудзи (рис.5.3) найбільше відхилення також спостерігається за частоти коливань 950 кол./хв та амплітуди 5 мм і складає 2%.

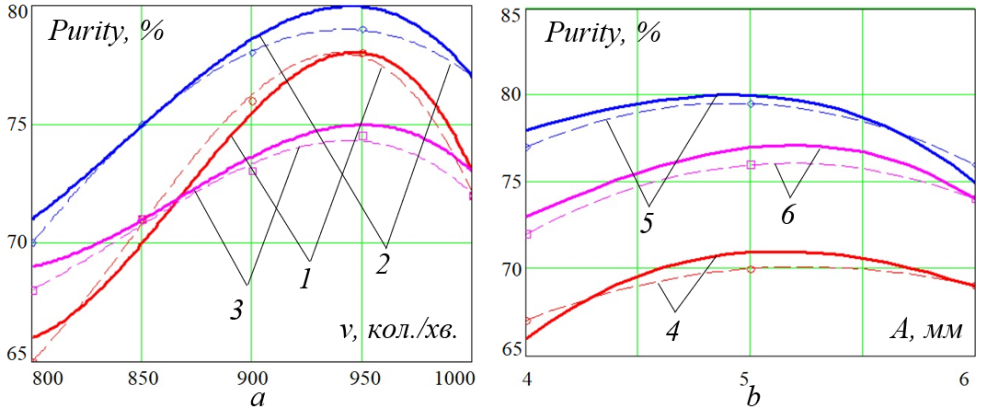


Рис.5.7. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС, відповідно, за різної частоти (1 – 800 кол./хв.; 2 – 900 кол./хв.; 3 – 1000 кол./хв.) та амплітуди коливань (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

Щодо розділення НМ соняшнику (рис.5.6) спостерігається аналогічний результат, відмінності полягають у значенні максимального відхилення. Для цього результату відхилення теоретично отриманого результату від результату, отриманого у виробничих умовах, складає 3%.

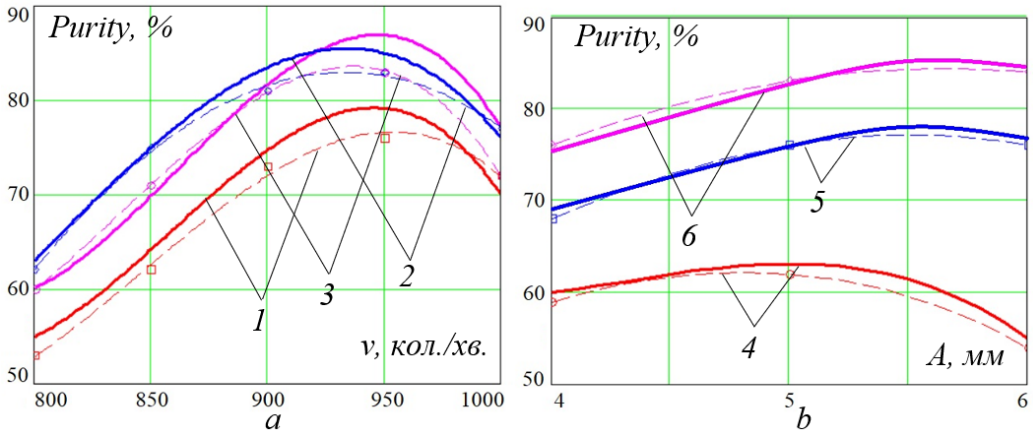


Рис.5.8. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС, відповідно, за різної частоти (1 – 800 кол./хв; 2 – 900 кол./хв; 3 – 1000 кол./хв) та амплітуди коливань (4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм)

Для розділення НМ сої (рис.5.8) найбільше відхилення спостерігається за частоти коливань 950 кол./хв та амплітуди 6 мм і складає 5%. Виходячи із таких значень відхилень теоретично отриманих результатів від результатів, отриманих у виробничих умовах (відхилення лежать у межах похибки, тобто не перевищують 10%), слід вважати, що розроблена механіко-математична модель задовільно описує залежність чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ, від амплітуди та частоти коливань ПСС.

За наведеними на рис. 5.5 – 5.8 залежностями існує можливість визначити діапазони раціональних значень амплітуди та частоти коливань ПСС для розділення НМ. Очевидно, раціональні діапазонами слід вважати діапазони означених параметрів, за яких чистота основної фракції буде відрізнятись не більше ніж на 10%. Такі діапазони параметрів для досліджуваного матеріалу, визначені за наведеними залежностями, представлено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Діапазони раціональних значень амплітуди та частоти коливань ПСС

Сировина	Амплітуда коливань, мм	Частота коливань, кол./хв
Пшениця	4,5…5,5	930…960
Кукурудза	4,5…5,5	940…960
Соняшник	4,5…5,5	940…960
Соя	5,5…6	930…950

Результати експериментального моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні ПСС у розрізі зміни чистоти основної фракції НМ в залежності від величини поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки для різної сировини (рис. 5.5 – 5.10), узгоджувались з рис. 2.7 – 2.10 на яких представлено результати теоретичного моделювання процесу.

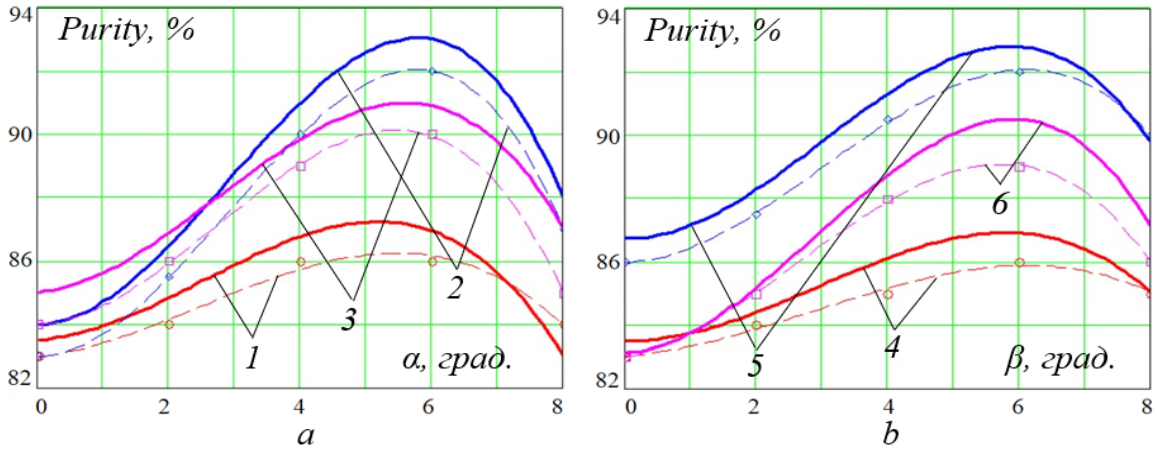


Рис.5.9. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці, в залежності від поздовжнього (*a*) та поперечного (*b*) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

Крім залежностей, які являють собою апроксимаційні функції теоретично отриманих даних, на рис. 5.9 – 5.12 наведені дані отримані за різних поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки пневмосортувального столу, отримані у виробничих умовах при використанні різної сировини. Дані, отримані у виробничих умовах, визначались для п’яти значень поздовжнього (0; 2; 4; 6; 8 град) та п’яти значень поперечного (0; 2; 4; 6; 8 град) кутів. Ці значення наведені у вигляді точок відповідного кольору поєднаних для наочності апроксимаційною функцією.

З наведених графічних залежностей (Рис.5.9 – 5.12) видно, що дані отримані теоретично, відрізняються від даних, отриманих у виробничих умовах, в межах, які не перевищують 4 %.

Так теоретичні дані, отримані для випадку НМ пшениці, відрізняються від експериментальних результатів не більше ніж на 3,5%. Щодо результатів моделювання розділення НМ кукурудзи, соняшника та сої, то тут відмінності теоретичних результатів від результатів, отриманих у виробничих умовах, не перевищують 2 %.

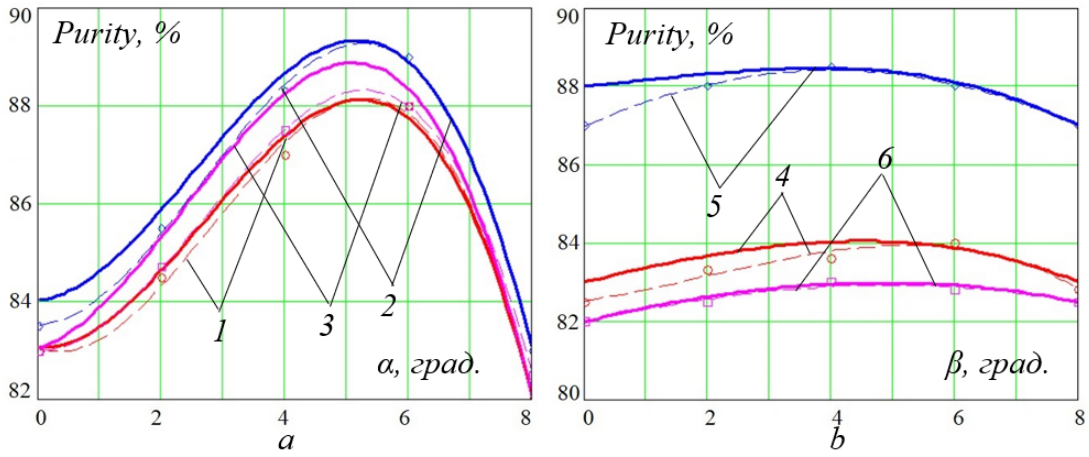


Рис.5.10. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ кукурудзи, в залежності від поздовжнього (*a*) та поперечного (*b*) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

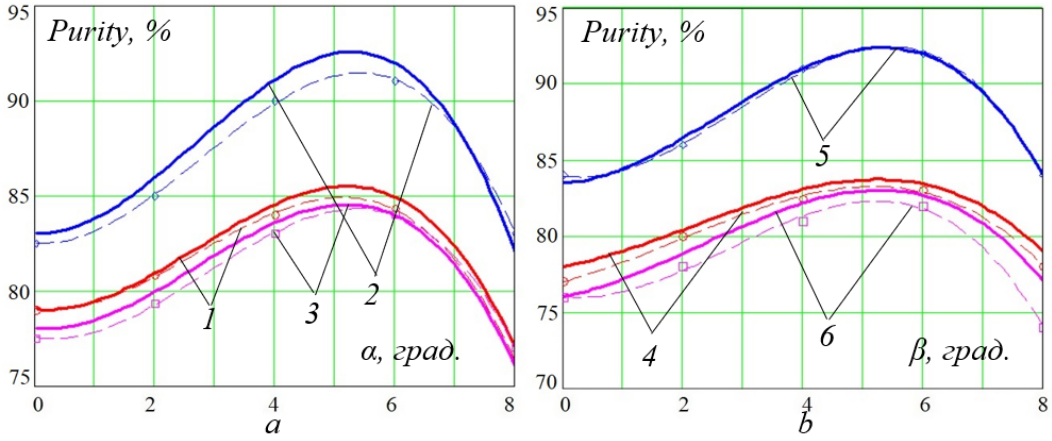


Рис.5.11. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику, в залежності від поздовжнього (*a*) та поперечного (*b*) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

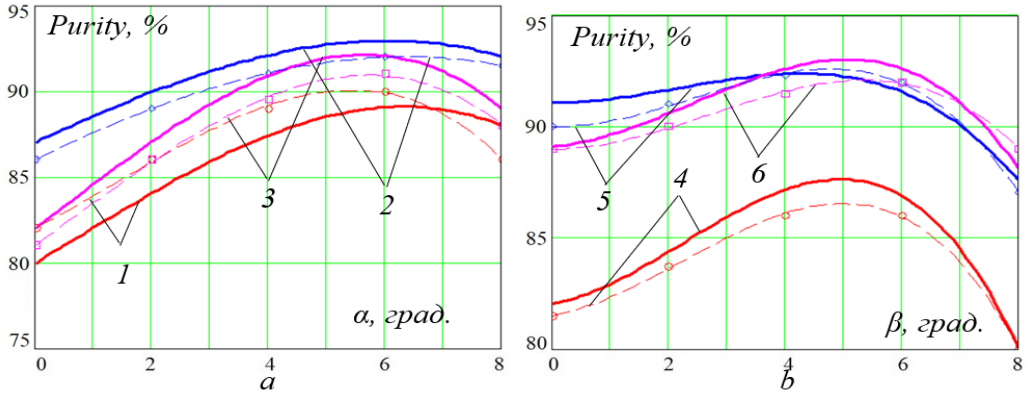


Рис.5.12. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої, в залежності від поздовжнього (*a*) та поперечного (*b*) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів

Встановлений результат доводить можливість використання розробленої механіко-математичної моделі для знаходження залежності чистоти основної фракції, отриманої розділенням вихідної сировини, від поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки ПСС.

Крім того, існує можливість за отриманими даними визначити діапазони оптимальних значень поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки ПСС. Під раціональних значеннями кутів нахилу мається на увазі такі їх величини, за яких досягається максимальне значення чистоти основної фракції зернової маси, що складається із різних видів матеріалу. Такі діапазони раціональних значень кутів нахилу деки наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4.

Діапазони раціональних значень поздовжнього (α) та поперечного (β) кутів нахилу деки ПСС

Сировина	α, град.	β, град.
Пшениця	5…7	5…7
Кукурудза	4…6	3…6
Соняшник	4…6	5…6
Соя	5…7	4…6

Останнім етапом дослідження даного підрозділу є встановлення адекватності механіко-математичної моделі розділення НМ на ПСС в залежності від швидкості повітряного потоку, а також визначення діапазонів раціональних значень цього параметру процесу за умови використання різної вихідної сировини.

Зміна швидкості повітряного потоку, як одного із основних параметрів процесу розділення з використанням ПСС, проводилась в діапазоні від 1 до 3 м/с. За значень із цього діапазону проводилось моделювання процесу, як теоретично, так і у виробничих умовах для різних НМ: пшениця, кукурудза, соняшник, соя. Моделювання проводилось із дискретністю 0,1 м/с. Результати теоретичного моделювання та дані отримані у виробничих умовах наведено на рис.5.13. Отримані теоретично дані апроксимовано поліноміальною функцією. Експериментальні дані, отримані у виробничих умовах, наведені на рис.5.13 у вигляді точок відповідного кольору. Для наочності по цим точкам пунктирними лініями проведені апроксимаційні функції.

З рис.5.9 видно, що дані, отримані теоретично, відрізняються від експериментально отриманих результатів не більше ніж на 3 %. Такий результат доводить адекватність розробленої механіко-математичної моделі щодо моделювання з її використанням процесу розділення НМ на ПСС в залежності від швидкості повітряного потоку.

Наведені апроксимаційні функції мають екстремуми, що свідчить про наявність оптимального значення швидкості повітряного потоку, за якого досягається максимальна чистота основної фракції НМ під час її розділення.

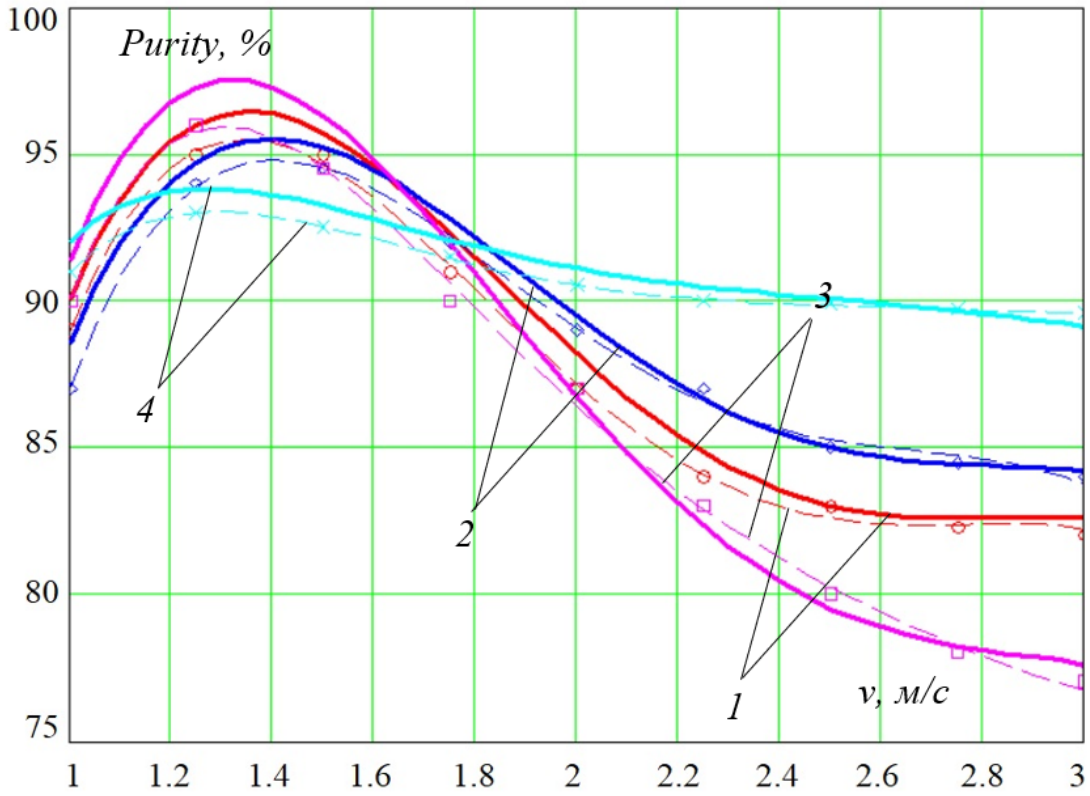


Рис.5.13. Чистота основної фракції, отриманої розділенням НМ на ПСС, в залежності від швидкості повітряного потоку для НМ: 1 – пшениці; 2 – кукурудзи; 3 – соняшнику; 4 – сої

Слід відмітити відмінності у характері залежностей: різне убування функцій за збільшення швидкості повітряного потоку. Очевидно обумовлений такий характер різними густиною та аеродинамічними властивостями вихідної сировини. Тобто найменший вплив зміна швидкості повітряного потоку чинить на НМ сої, оскільки соя має найбільшу густину і форму наближену до кулі із відповідною аеродинамікою. В той же час найбільшому впливу піддається насіння соняшника, яке має найменшу густину із застосовуваних видів сировини та трикутну форму.

Таким чином, доведено адекватність механіко-математичної моделі для описання процесу розділення НМ на ПСС. При цьому встановлені діапазони раціональних значень основних параметрів реалізації цього процесу з використанням пневмосортувального столу: частота та амплітуда коливань

деки; поздовжній та поперечний кут нахилу деки; швидкість повітряного потоку.

5.2.2. Аналіз ефективності застосування механіко-математичної моделі процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння

Параметрами вібропневмовідцентрового сепаратора, які чинять основний вплив на ефективність процесу розділення НМ, прийнято частоту коливань робочої поверхні (ротора) та швидкість потоку повітря. Виходячи з цього проведено двофакторне моделювання процесу сепарації НМ з використанням відповідної механіко-математичної моделі [233].

Критерієм ефективності процесу розділення НМ за густиною визначено чистоту основної фракції. Доведення адекватності розробленої механіко-математичної моделі для процесу розділення НМ вібропневмовідцентровим сепаратором проводилось шляхом порівняння результатів теоретичного моделювання процесу із результатами, отриманими експериментальним шляхом та у виробничих умовах за тих же діапазонів частоти коливань ротора та швидкості потоку повітря.

Швидкість потоку повітря змінювалась в діапазоні від 1 до 2 м/с. Для теоретичного моделювання дискретність зміни швидкості повітряного потоку обиралась кратною 0,1 м/с, а для випробувань у виробничих умовах – кратною 0,25 м/с. Частота коливань ротора змінювалась в діапазоні від 400 до 600 кол./хв. Дискретність зміни цієї частоти для теоретичного моделювання складала 250 кол/хв, а для експериментального дослідження – 500 кол/хв

Розділення у виробничих умовах проводили наступним чином. НМ, який отримували після вторинної обробки матеріалу відповідної культури, піддавався розділенню у вібропневмовідцентровому сепараторі. При цьому матеріал після обробки було розділено по двох бункерах: бункер із насінням та бункер із домішкою. Далі наважку із бункера з насінням розбирали вручну та

визначали кількість частинок «легкої» (N_1) фракції (домішки) та кількість частинок «важкої» (N_2) фракції у загальній кількості частинок ($N=N_1+N_2$). Чистоту «важкої» фракції при цьому розраховували за (10):

$$Purity\,\frac{N_2}{N_1+N_2}_{exp.} \tag{5.3}$$

Швидкість потоку повітря при цьому змінювалась в діапазоні від 1 до 2 м/с з дискретністю зміни кратною 0.25 м/с. Частота коливань ротора змінювалась у діапазоні від 4000 до 6000 кол/хв з дискретністю зміни 500 кол/хв.

Отримані таким чином експериментальні точки для наочності апроксимувались поліноміальними функціями виду (3.204).

НМ, який використовували в дослідженні, були НМ пшениці, соняшнику, сої.

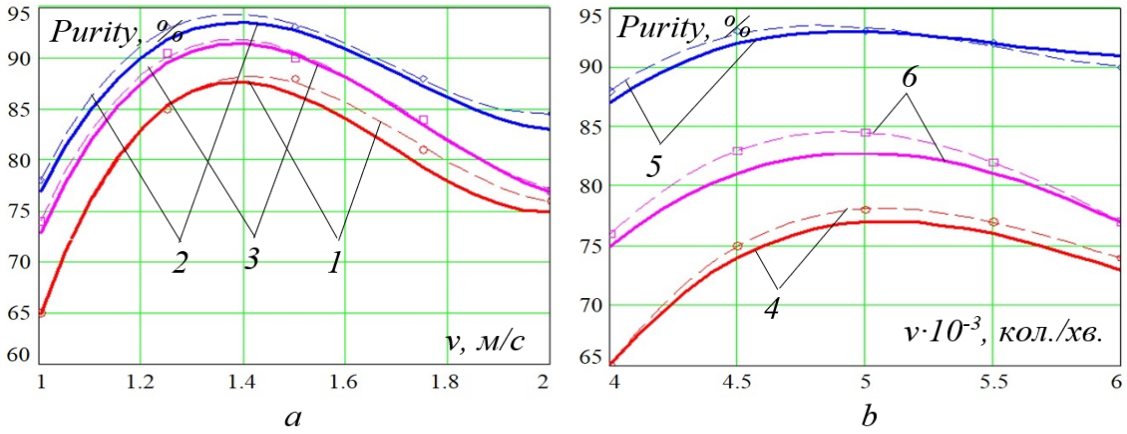


Рис. 5.14. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці у вібропневмовідцентровому сепараторі, в залежності від швидкості повітряного потоку (*a*) та частоти коливань ротора (*b*), відповідно, за різних швидкості повітряного потоку (1 – 1 м/с; 2 – 1,5 м/с; 3 – 2 м/с) та частоти коливань ротора (4 – 4000 кол./хв; 5 – 5000 кол./хв; 6 – 6000 кол./хв)

Для доведення адекватності розробленої механіко-математичної моделі розділення НМ вібропневмовідцентровим сепаратором та для встановлення діапазонів значень швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора під час сепарування НМ, за яких досягається максимальна чистота основної фракції цих сумішей та які, очевидно, слід вважати раціональними.

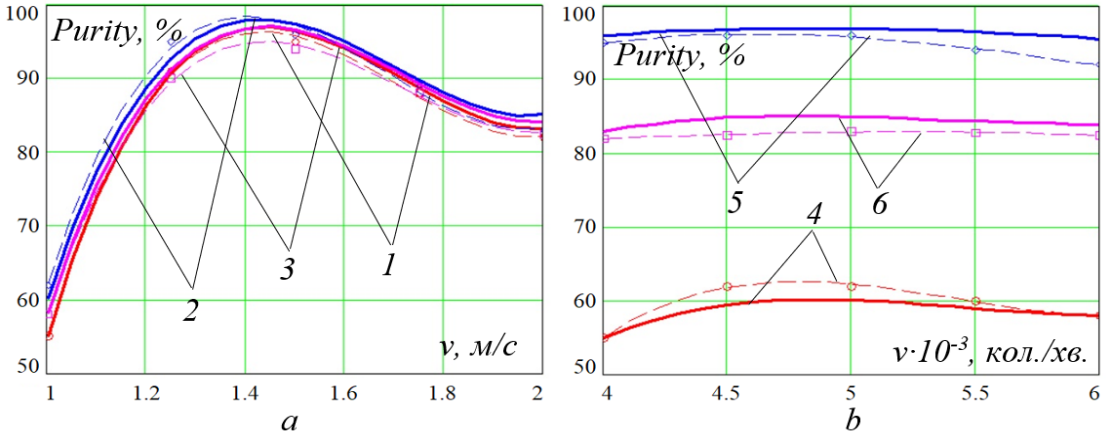


Рис. 5.15. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику вібропневмовідцентровим сепаратором, в залежності від швидкості повітряного потоку (*a*) та частоти коливань ротора (*b*), відповідно, за різних швидкості повітряного потоку (1 – 1 м/с; 2 – 1,5 м/с; 3 – 2 м/с) та частоти коливань ротора (4 – 4000 кол./хв; 5 – 5000 кол./хв; 6 – 6000 кол./хв)

Графічні залежності, що наведено на рис. 5.14 – 5.16 являють собою апроксимаційні функції даних отриманих теоретичним моделюванням. Вони представлені на графіках суцільними лініями. Точками позначені експериментальні дані, отримано експериментальним шляхом та у виробничих умовах. Точки поєднанні пунктирними лініями, які є апроксимаційними функціями цих експериментальних точок та які наведені для наочності аналізу.

З наведених на рис. 5.14 – 5.16 результатів, слідує, що результати, отримані теоретично, відрізняються від експериментальних результатів не більше ніж на 4 %.

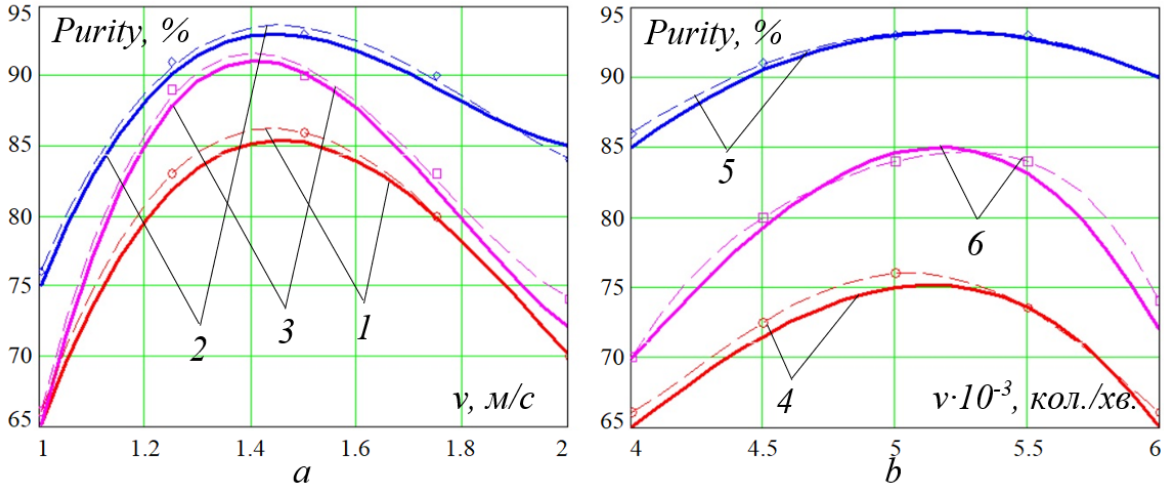


Рис. 5.16. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої вібропневмовідцентровим сепаратором, в залежності від швидкості повітряного потоку (*a*) та частоти коливань ротора (*b*), відповідно, за різних швидкостей повітряного потоку (1 – 1 м/с; 2 – 1,5 м/с; 3 – 2 м/с) та частот коливань ротора (4 – 4000 кол./хв; 5 – 5000 кол./хв; 6 – 6000 кол./хв)

Так для досліджень, де вихідною сировиною є пшениця, це відхилення не перевищує 3,5…4 %, а для насіння соняшника та сої – не перевищує 2…3 %. Для проведених досліджень таке відхилення можна вважати несуттєвим, оскільки воно знаходиться в межах похибки. Такий результат дозволяє стверджувати, що розроблена механіко-математична модель розділення НМ вібропневмовідцентровим сепаратором може бути використана для описання результатів даного процесу за умови варіювання такими його параметрами, як швидкість повітряного потоку та частота коливань ротора.

За наведеними результатами визначено діапазони значень швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора вібропневмовідцентрового сепаратора, за яких під час розділення НМ досягається максимальна чистота основної фракції сировини, що підлягає обробці. Ці діапазони, які вважаються раціональними наведено в табл.5.5.

Таблиця 5.5

Діапазони раціональних значень швидкості повітряного потоку (υ) та частоти коливань ротора (ν) вібропневмовідцентрового сепаратора

Сировина	υ, м/с	ν, кол./хв
Пшениця	1,2…1,5	4500…5100
Соняшник	1,3…1,5	4500…5000
Соя	1,3…1,6	5000…5500

Таким чином, доведено можливість використання розробленої механіко-математичної моделі розділення НМ вібропневмовідцентровим сепаратором для визначення кінцевого результату даного процесу за умови варіювання такими його параметрами, як швидкість повітряного потоку та частота коливань ротора. Визначено діапазони раціональних значень швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора вібропневмовідцентрового сепараторі, за яких досягається максимальна чистота основної фракції сировини, що підлягає обробці.

5.3. Висновки за розділом

1. Виробничими випробуваннями доведено високу експлуатаційну ефективність використання результатів досліджень з розділення НМ за густиною насіння. Використання математичного апарату механіко-математичної моделі дозволяє ефективно оптимізувати визначальні конструктивні параметри та кінематичні режими процесу в залежності від фізико-механічних властивостей сировини.

2. Експериментальними дослідженнями підтверджено адекватність розробленої механіко-математичної моделі розділення НМ за густиною насіння на ПСС. Похибка між теоретичними та експериментальними для НМ пшениці відхилення складає 6% при частоті коливань 950 кол/хв та амплітуді 5 мм. При розділенні НМ кукурудзи відхилення складає 2% з кінематичними режимами: частоти коливань – 950 кол/хв та амплітуді коливань 5 мм. При розділенні НМ соняшнику, розбіжність становить 3% при частоті коливань

950 кол/хв та амплітуді 5 мм. Для НМ, при відповідних кінематичних режимів, відхилення становить 5%. Відповідно, усереднене значення відхилення не перевищує 10%, що знаходиться в межах похибки.

3. Встановлено раціональні значення частоти та амплітуди коливань деки ПСС, в залежності від культури та фізико-механічних властивостей сировини: пшениця – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; кукурудза – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; соняшник – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; соя – частота 940 кол./хв, амплітуда 6 мм.

4. Максимальна чистота основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці на ПСС, досягається за швидкості повітряного потоку із діапазону 1,3…1,5 м/с. Для кукурудзи раціональна швидкість повітряного потоку лежить діапазоні 1,3…1,6 м/с, для соняшнику – 1,2…1,4 м/с, для сої – 1,2…1,4 м/с. Ці значення справедливі за умови використання під час розділення НМ відповідних раціональних значень частоти й амплітуди коливань деки ПСС та поздовжнього й поперечного кутів її нахилу.

5. Експериментальними дослідженнями підтверджено адекватність розробленої механіко – математичної моделі розділення НМ за густиною насіння на циліндричній робочій поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора. Результати експериментальних досліджень відрізняються від теоретичного моделювання, не більше ніж на 4 %. Так для досліджень, де вихідною сировиною є пшениця, це відхилення не перевищує 3,5…4 %, а для насіння соняшника та сої – не перевищує 2…3 %, що знаходиться в межах похибки.

6. Визначено діапазони значень швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора вібропневмовідцентрового сепаратора, за яких під час розділення НМ досягається максимальна чистота основної фракції сировини, що підлягає розділенню. Так, для НМ пшениці – υ = 1,2…1,5 м/с, ν = 4500…5100 кол./хв; для соняшнику – υ = 1,3 …1,5 м/с, ν = 4500…5000 кол./хв; для сої – υ = 1,3…1,6 м/с, ν =5000…5500 кол./хв.

РОЗДІЛ 6
ІДЕНТИФІКАЦІЯ РІВНЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УДОСКОНАЛЕННЯ СЕПАРУЮЧИХ МАШИН ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

Реалізація наукових і технічних досягнень, новітніх технологій в дуже обмежених розмірах може проходити на основі простого відтворення і впливати на продуктивність праці та ефективність виробництва. В своїй основі технічний і технологічний прогрес здійснюється в процесі нагромадження, є його неодмінною умовою: збільшення засобів виробництва, підвищення їх технічної досконалості і поліпшення технології використання забезпечують докорінні зміни умов виробництва, розвиток якісно нових продуктивних сил. Відповідно, темпи технічного і технологічного забезпечення визначаються розмірами нагромадження.

В свою чергу, додаткові вкладення праці й капіталу передбачають зміну технологічних способів виробництва, нову техніку і технологію. Щоб збільшити в значних розмірах капітал, необхідно винайти та запровадити нові технології та технічні засоби, тобто головним для визначення економічної природи підвищення результативності впровадження тих чи інших технологічних та технічних прийомів є не кількісна їх сторона, а якісна, тобто не тільки те, які розміри засобів виробництва і праці авансовані, а за яких умов ці вкладення здійснюються та яких технічних, технологічних та організаційних цілей дозволяють досягати.

6.1. Методологічні засади визначення економічної ефективності технічних та технологічних інноваційних рішень

Підвищення технічної забезпеченості агропромислового виробництва є основою підвищення його ефективності. Якість виконання операцій та технологічних процесів значною мірою визначається досконалістю техніки. В свою чергу, підвищення вимог до якості та обсягів продукції вимагають більш досконалих та ефективних машин, які слід використовувати в процесі виробництва. Ця відповідність забезпечує максимальний ефект прогресивної технології виробництва, що є основою швидких і сталих темпів відтворення.

Фундаментальні положення сучасних концепцій ідентифікації та управління ефективністю систем, незалежно, від їх природи, збігаються у виділенні технічної, алокативної та економічної ефективності, як складних категорій та систем показників й індикаторів, що відображають сутнісні характеристики результативності тієї чи іншої системи.

При цьому в основі зазначених концепцій економічної думки лежить мінімізація затрат виробничих ресурсів, при якій досягається максимальний обсяг продукції. Ефективність означає відсутність втрат, тобто економічні ресурси використовуються настільки ефективно, наскільки це можливо, щоб задовольнити потреби і бажання людей. Економічна ефективність це отримання даного обсягу продукції при найменших затратах рідкісних ресурсів, причому як продукція, так і ресурси вимірюються у вартісному виразі. Технічна ефективність є максимальний вихід товарів з ресурсів, що використані у виробництві [289]. Разом з тим, технічна ефективність стосується використання існуючих ресурсів, не приймаючи до уваги їх вартість. З іншого боку, економічна ефективність враховує ці значення [251].

На початку 80-х років П. Дасгупта та Дж. Стигліц запропонували теоретичну модель, згідно з якою інтенсивність науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, структура ринку та розмір підприємства є незалежними ендогенними змінними, що разом обумовлюються

основоположними параметрами смаків і технологій [254]. Цю гіпотезу підтримують також Д. Гей та Д. Морріс. Аргументи критиків шумпетеріанської концепції зводяться головним чином до вказівок на недостатню строгість свідчень на її користь та можливість пояснень фактів, які вона описує, в інший спосіб; прямі й беззаперечні спростування "теорії перевернутого U" відсутні. Врешті-решт, ті ж Д. Гей і Д. Морріс визнають, що: «Концентрація є детермінантою витрат на НДДКР, але найпевніше унаслідок суперництва на олігополістичних ринках, ніж через прагнення гарантувати ринок збуту в «монополізованих» секторах» [242].

З точки зору теорії конкуренції, заснованої на перевагах ресурсів, розробленої в працях С. Ганта, конкуренція є еволюційним процесом, що в принципі уводить від рівноваги. Ключову роль С. Гант відводить накопиченню інформації («винайдення нового знання»), що супроводжується суперництвом. При цьому суттєву роль відіграє так званий «ефект минулого», який полягає в тому, що минулий досвід створює зовнішні ефекти, що можуть призводити до «технологічних та інституційних пасток» (неефективних методів господарювання) і перешкоджати досягненню суспільного добробуту навіть за наявності реальної конкуренції [254].

З наведеного вище огляду сучасних поглядів на взаємозв’язок конкуренції та економічної ефективності випливає, що конкуренція забезпечує ефективність: створення нових ресурсів (адаптивна ефективність); розподілу ресурсів – алокативна (оптимальна) ефективність та використання ресурсів (Х-ефективність).

Усі три зазначені типи ефективності є необхідними умовами дієвого функціонування системи в цілому. З огляду на це як інтегральний результат слід було б розглядати системну (комплексну) ефективність як оптимум створення, розподілу та використання ресурсів.

Однак оптимуми різних типів ефективності забезпечуються різними типами конкуренції, які можна водночас розглядати як різні типи конкурентного середовища. Оптимум адаптивної ефективності забезпечується

на ринках недосконалої конкуренції у формі розпливчастої олігополії. Оптимум алокативної ефективності виникає за умов досконалої конкуренції, точніше, недосконалої конкуренції, максимально наближених до умов досконалої (умовно-досконалої конкуренції). Оптимум Х-ефективності забезпечується за умов слабкорозпливчастої олігополії, хоча і більш близьких до умов досконалої конкуренції, ніж оптимум адаптивної ефективності.

Відповідно, адаптивна, алокативна та Х-ефективність є однаково визначальними для ефективності системи в цілому в будь-який момент часу. Подібне припущення було б коректним, лише якщо вважати, що розвитку ринкової економіки притаманні виключно кількісні зміни. Однак це вочевидь суперечить наявним фактичним даним про процеси економічного розвитку на рівні окремих країн та світової економіки в цілому.

Ці процеси, на наш погляд, найбільш адекватно описуються в межах концепції технологічної парадигми (технологічного устрою), розробленої К. Фріменом та Л. Суте [253].

Зазначена концепція передбачає, що певна історична економічна система має технологічний базис – технологічну парадигму, яка разом із відповідними їй інституційними та соціальними механізмами утворює техніко-економічну парадигму. Техніко-економічна парадигма утворюється дією так званих ключових факторів і обумовлюється характером розвитку галузей виробництва протягом життєвого циклу цієї парадигми. Як ключовий фактор парадигми розглядаються нові технології й засоби виробництва, які впливають на зміну структури витрат, зменшують відносну вартість одиниці корисного ефекту, створюють нові продукти, поліпшують якість традиційних продуктів. Зміна ключових факторів техніко-економічної парадигми відбувається як технологічна революція, впровадження сукупності економічно та технологічно пов’язаних інновацій.

Період існування та необхідність заміни технологічної парадигми обумовлюється економічними чинниками, вичерпанням старою парадигмою можливостей забезпечити суттєве економічне зростання та підвищення добробуту. Технологічні зміни відбуваються відносно швидко і випереджають

зміни в інституційній структурі суспільства, яка є інертнішою. Період, коли відбуваються кардинальні зміни в соціально-економічній структурі, є періодом становлення техніко-економічної парадигми. Це становлення має, за підрахунками фахівців, лаг 48–68 років, що відповідає довгостроковому коливанню «довгої хвилі Кондратьєва».

Необхідно зазначити, що ключовий фактор парадигми є нічим іншим як ресурсом, ефективність створення, розподілу та використання якого регулюється конкурентними механізмами. Очевидно, що на різних етапах життєвого циклу техніко-економічної парадигми визначальні умови функціонування ключового фактору є різними.

На етапі технологічної революції визначальною умовою є можливість створення ключового фактору як сукупності відповідних технологічних та технічних інновацій (адже, до того він не існував). Відповідно пріоритетною за таких умов виявляється адаптивна (динамічна) ефективність як ефективність створення нового ресурсу.

Конкурентні механізми, які забезпечують оптимум адаптивної ефективності, не є оптимальними щодо забезпечення розподілу ресурсів. Тому на етапі дифузії (поширення) ключового фактору, що настає після технологічної революції, пріоритетним є забезпечення алокативної ефективності. Стан конкуренції, що забезпечує оптимум алокативної ефективності, складається насамперед за рахунок вступу на ринки ключового фактору та технологічно пов’язані з ним ринки нових суб’єктів господарювання.

Алокативна ефективність сама по собі не забезпечує максимальної індивідуальної ефективності використання ресурсів. Тому на наступному етапі, коли певна техніко-економічна парадигма стає панівною, поряд із алокативною ефективністю пріоритетним стає забезпечення Х-ефективності. Це супроводжується певним посиленням рівня концентрації за рахунок «вимивання» з ринку тієї частини підприємств, розміри яких в силу дії ефекту масштабу виробництва, виявляються недостатніми для

забезпечення належного рівня ефективності використання ресурсів.

Однак Х-ефективність є обмеженою за незмінної технологічної парадигми. Отже, подальше зростання суспільного багатства потребує змін технологічної парадигми. Цикл розпочинається наново.

Таким чином, конкуренція спроможна забезпечити системну економічну ефективність, але не одномоментно, а лише в діахронії, модифікуючись у часовому розгортанні економічного процесу протягом «довгої хвилі» життєвого циклу техніко-економічної парадигми. Сприяння функціонуванню саме тієї моделі конкуренції на ринку, що на відповідному етапі життєвого циклу техніко-економічної парадигми забезпечує оптимум ефективності, є одним з пріоритетних завдань державної конкурентної політики як системи заходів впливу держави на ринки та процеси руху товарів на них.

Стабілізація розвитку аграрного сектору вітчизняної економіки неможлива без досягнення та підтримання достатнього для нормалізації протікання відтворювальних процесів рівня ефективності діяльності товаровиробників, передусім, сільськогосподарських підприємств. Проте, протягом останнього десятиріччя та на сьогоднішній день основна діяльність майже третини підприємств-виробників сільськогосподарської продукції приносила збитки. Причини цього лежать як в площині об’єктивних умов функціонування вітчизняного аграрного ринку, так і визначається суб’єктивними, в першу чергу, поведінковими факторами, пов’язаними з недосконалістю та неадекватністю об’єктивним умовам політики окремих товаровиробників. Слід зазначити, що рослинницька продукція є, здебільшого, сировиною для подальшої переробки, а отже ринку сільськогосподарської продукції притаманні властивості сировинного ринку, чим зумовлюються і особливості ціноутворення, що, врешті-решт, формує ефективність їх виробничо-комерційної діяльності. Втім, певна частина продукції є ресурсом для відновлення виробничо-комерційного циклу, а саме насіннєвим матеріалом. Ця частина продукції є ресурсом

сільськогосподарського виробництва, а її виробництво суттєво більш ефективним, ніж виробництво товарної продукції.

Зважаючи на сировинний характер сільськогосподарської продукції слід підкреслити її високий рівень уніфікованості, що переносить конкурентні взаємовідносини товаровиробників здебільшого в площину цінової конкуренції та ускладнює використання доступних на ринках предметів споживання концепцій унікальних торгових пропозицій, підкріплення товару тощо. В таких умовах саме конкурентні відносини, передусім, відносини цінової конкуренції, між сільськогосподарськими товаровиробниками наразі виявляються визначальними для досягнення ними належного рівня ефективності своєї діяльності.

Узагальнюючи наведені вище концептуальні положення доцільно звернути увагу не те, що оцінка економічної ефективності технологічних та технічних нововведень має ґрунтуватися на порівнянні результатів здійснення виробничих процесів до та після запровадження вказаних рішень. Мова при цьому має йти про оперування показниками технічної ефективності. При цьому з урахуванням галузевих та макроекономічних характеристик за допомогою системи показників ідентифікації алокативної ефективності можливим стає визначення ефекту від нововведень в масштабах національної економіки. Останнє передбачає врахування прогнозних оцінок поширення інноваційних рішень з огляду на кількість товаровиробників, які мають потенціал до впровадження того чи іншого рішення, ступінь сприйняття ними інновацій, а також фінансові можливості щодо їх реалізації в межах своїх фінансових та господарських можливостей.

6.2. Визначення організаційно-технічних та організаційно-економічних умов застосування удосконалених сепаруючих машин і технологій

Запропоновані у дослідженні нововведення орієнтовані на збільшення виходу насіннєвого матеріалу при післязбиральній обробці, зберіганні та передпродажній підготовці насіння основних сільськогосподарських культур. Обґрунтована в дослідженні технологія сортування насіння з використанням ПСС 2,5 дозволяє збільшити вихід високоякісного насіння, збільшити ступінь виділення домішок та знизити ступінь потрапляння основного зерна (насіння) у відходах. Відповідно, джерелами формування економічного ефекту від застосування обґрунтованих в роботі інноваційних рішень стануть:

– збільшення виходу насіннєвої продукції та, відповідно, обсягів її реалізації або внутрішнього споживання товаровиробниками;

– підвищення якості насіннєвої продукції та, відповідно, продажів її за більш високими цінами;

– зменшення втрат насіннєвої продукції в процесі сортування виробленого зерна та, відповідно, збільшення обсягів її виробництва.

При цьому розрахунки рівня економічної ефективності застосування інноваційних рішень для сільськогосподарських товаровиробників та суб'єктів сфери зберігання зерна, які спеціалізуються на постачанні насіннєвих матеріалів, характеризуються лише відмінностями у обсягах продукції та періодах операційного використання обладнання. Як було зазначено вище, в основу комплексної оцінки ефективності інноваційних рішень мають бути покладені результати визначення рівня технічної ефективності, а алокативна ефективність визначається на основі прогнозування поширення вказаних рішень.

Вихідні дані для розрахунків технічної ефективності застосування обґрунтованих рішень наведено у табл. 6.1 – 6.4

Таблиця 6.1

Технічні та експлуатаційні характеристики обладнання для розділення НМ на ПСС 2,5

Параметр	Значення	Оптимальне значення
Продуктивність: Пшениця Кукурудза соя	 3500 3000 2500	 3000 2500 2500
Частота коливань ($с^{-1}$) Кол/хв	15,6 940	15,6 940
Амплітуда коливань	5-6	В залежності від культури 5-6
Кут нахилу деки Повздовжній поперечний	 0-8 0-8	Залежить від культури 6 5
Ступінь виділення домішок у основній фракції (чистота основної фракції)	75…90%	Залежить від матеріалу та обраних параметрів. Чим ближче до 90% тим краще
Відсоток основного зерна у відході	5…15%	Залежить від матеріалу та обраних параметрів. Чим нижче – тим краще.
Потужність двигуна (квт)	0, 74	0,74
1	2	3
Потужність вентилятору ($м^3$/хв)	140	140
Швидкість повітряного потоку		1,3…1, 5 м/с
Габарити Довжина Ширина висота	 2020 1850 2010	
Маса (кг)	540	

Таблиця 6.2

Технічні та експлуатаційні характеристики обладнання для розділення НМ у вібропневмовідцентровому сепараторі

Показник	Значення
Питоме навантаження, кг/м^2	2,5..3,0
Частота коливань ротора (робочої поверхні), с$^{-1}$	80..90
Швидкість повітряного потоко, м/с	1,2..1,4
Потужність двигуна, кВт	0,8
Потужність вентилятора, м^3/хв	280

Таблиця 6.3

Середня густина насіння в залежності від фази дозрілості

Культура	Фаза дозрілості		
	Молочна г/см^3	Воскова г/см^3	Повна г/см^3
Пшениця	1,150	1,240	1,330
Соняшник	0,6	0,8	0,9
Соя	1	1,05	1,25

Таблиця 6.4

Середньо ринкові ціни насіння та сортового зерна окремих сільськогосподарських культур у 2023 р.

Сільськогосподарська культура (НМ)	Середньорічна ціна сортового зерна, грн/т	Середньорічна ціна насіння, грн/т
Озима пшениця	7800	15000
Соняшник	13500	90000
Кукурудза	7450	70000
Соняшник	9500	30000

Виходячи з наведених у табл. 6.1 – 6.4 даних слід розмежувати методичні підходи до розрахунку показників ефективності для сільськогосподарських товаровиробників та підприємств зі зберігання сільськогосподарської продукції. Крім того, слід розрізняти виробництво аграрними підприємствами насіння для власних потреб та для продажу. Таким чином, доцільно виконувати розрахунки у спосіб, наведений в табл. Х.5, із застосуванням відповідних проміжних та результуючих показників. Крім того, слід застосовувати систему питомих показників для подальшого визначення інтегральних показників технічної та алокативної ефективності.

Таблиця 6.5

Методика та результати розрахунку питомих показників технічної ефективності застосування інноваційних рішень

Показник	Сільськогосподарські товаровиробники		Підприємства сфери зберігання продукції
	виробництво насіння для власних потреб	виробництво насіння для продажу	
Вихід насіння з сортованого зерна, %	87	92,5	90
Джерело ефекту	Економія на придбанні насіння	Продаж продукції за більш високою ціною	Продаж продукції за більш високою ціною
Питомі витрати на переробку 1 т зерна*, грн/т - пшениця - кукурудза - соняшник - соя	36,00 43,20 46,95 43,20		
Питома величина ефекту (в економії або доході) у розрахунку на 1 т перероблено зерна**, грн/т - пшениця - кукурудза - соняшник - соя	13050,00 78300,00 60900,00 26100,00	6660,00 70762,50 57858,75 18962,50	6480,00 56295,00 56295,00 18450,00

* розрахунок виконано за прямими витратами (витратами на оплату праці, електроенергію та амортизацію із застосуванням укрупненого визначення інших витрат, пов'язаних з переробкою 1 т продукції) – табл. 6.6

** розрахунок виконано шляхом порівняння цін реалізації товарного зерна та насіннєвого матеріалу з урахуванням показників виходу готової продукції за розглянутими сільськогосподарськими культурами – табл. 6.7

Таблиця 6.6

Розрахунок питомих витрат на переробку однієї тони продукції

Культура	Продуктивність, т/год	Час переробки 1 т, год	Електроенергія, грн/т	Заробітна плата, грн/т	Амортизація, грн/т	Інші витрати, грн/т	Разом, грн/т
пшениця	3	0,33	1,66	26,97	4,09	3,27	36,00
кукурудза	2,5	0,40	2,00	32,37	4,91	3,93	43,20
соняшник	2,3	0,43	2,17	35,18	5,33	4,27	46,95
соя	2,5	0,40	2,00	32,37	4,91	3,93	43,20

Таблиця 6.7

Розрахунок питомих значень ефекту від впровадження інноваційних рішень

Культура	Вартість насіннєвого матеріалу, грн/т	Вартість товарної продукції, грн/т	Вихід продукції, %		
			87	92,5	90
			Питомий ефект, грн/т		
пшениця	15000	7800	13050,00	6660,00	6480,00
кукурудза	90000	13500	78300,00	70762,50	56295,00
соняшник	70000	7450	60900,00	57858,75	56295,00
соя	30000	9500	26100,00	18962,50	18450,00

Запропонований методичний підхід дозволив визначити питомі показники ефективності, на основі яких можливо визначити індикатори технічної ефективності застосування запропонованих інноваційних рішень на рівні сільськогосподарського товаровиробника, зважаючи на обсяги виробництва розглянутих видів продукції, а також алокативної ефективності в межах національної економіки, на основі статистичних оцінок кількості, розмірів та масштабів виробництва сільськогосподарських підприємств, які спеціалізуються на виробництві насіннєвих матеріалів.

6.3. Оцінка очікуваних розмірів економічних ефектів впровадження удосконалених технічних засобів та технологій

Станом на 01.01.2022 р. за даними Мінагрополітики в Україні функціонувало 1654 сільськогосподарських підприємств, які мали статус насіннєвих. Середня площа землекористування вказаних товаровиробників складала 2,2 тис. га. Зважаючи на необхідність дотримання сівозмін у подібних господарствах, можливо визначити середні обсяги виробництва продукції та усереднені показники технічної ефективності для типового підприємства галузі рослинництва насінницького напряму спеціалізації (табл. 6.8).

Таблиця 6.8

Визначення ефективності застосування інноваційних рішень в масштабах типового підприємства насінницького напряму спеціалізації

Показник	Значення показників по підприємству/сільськогосподарським культурам			
	Сільськогосподарські культури			
	Озима пшениця	Кукурудза	Соняшник	Соя
Площа ріллі, га	2200			
Площа посівів культур, га	1050	640	220	290
Урожайність, ц/га	55	75	21	32
Валовий збір, т	5775	4800	462	928
Собівартість, грн/т	2018,18	2466,67	8571,43	3468,75
Витрати на обробку, грн/т	36	43,2	46,95	43,2
Обсяг насіннєвої продукції при використанні для власних потреб, т	5024	4176	402	807
Обсяг насіннєвої продукції при реалізації, т	5342	4440	427	858
Ефект з одиниці продукції при використанні для власних потреб, грн/т	13050	78300	60900	26100
Ефект з одиниці продукції при реалізації, грн/т	6660	70762,5	57858,75	18962,5

1	2	3	4	5
Сума економічного ефекту при використанні для власних потреб, тис. грн	5873,83	336508,19	22342,55	19389,58
Сума економічного ефекту при реалізації, тис. грн	24556,25	300176,56	18346,47	12480,66
Разом економічний ефект при використанні для власних потреб, тис. грн	384114,15			
Разом економічний ефект при реалізації, тис. грн	355559,94			

Виходячи з даних, представлених в табл. 6.8 розмір алокативного ефекту можна було б прогнозувати виходячи з кількості підприємств вказаного напряму спеціалізації в інтервалі від 588 млрд. грн до 635 млрд. грн за інших рівних умов. Однак, воєнно-політична та соціально-економічна ситуація в державі створила низку нестандартних викликів, з якими ключові галузі національної економіки, в цілому, та сільськогосподарське виробництво, зокрема, не стикалися протягом всього періоду існування незалежної України. Ускладнення експорту, зрушення в структурі витрат та цін на продукцію, пов’язані з надзвичайним подорожчанням логістичних процедур, загострення виробничих, фінансових та інвестиційних ризиків, обумовлених воєнними діями, прискорили скорочення вітчизняного виробництва та потенціалу його суб'єктів.

Наразі доцільно, принаймні вдвічі понизити вказаний прогноз, а також зважити на те, що не більше третини насіннєвих підприємств застосовуватимуть запропоновані інноваційні рішення, а отже прогноз рівня алокативної ефективності знизиться до 40...60 млрд грн в річному обчисленні. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів

дисертаційних досліджень у підприємствах переробної галузі України становить з розрахунку на 1т НМ 98 грн/т.

Економічна ефективність від впровадження результатів дослідження: на ПАТ «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків) становить 15 тисяч 085 грн. за сезон на одну сепаруючу машину;

ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ) становить 23 тисячі 155 грн. за сезон на одну сепаруючу машину; ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп) становить 22 тисячі 243 грн. за сезон на одну сепаруючу машину; ТОВ «Батьківщина» (с. Карабутове, Сумська обл.) становить 24 тисячі 985 грн. за сезон на одну сепаруючу машину; ФОП Знайдюк Василь Григорович (м. Чернігів) становить 1 млн. 500 тис. грн. за сезон роботи поточної лінії, що налаштована за допомогою результатів дисертаційних досліджень.

При цьому враховувати ефекти для підприємств сфери зберігання продукції в сучасних умовах недоцільно, адже майже всіх потужності задіяні в обслуговуванні експорту зерна.

Висновки за розділом

1. Базуючись на результатах дисертаційних досліджень, запропоновано способи інтенсифікації процесу вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння та запропоновано інженерно-технічні рішення для підвищення економічної та експлуатаційної ефективності і якості роботи сепаруючих машин, що реалізують процес.

2. Виробничі випробування підтвердили високу ефективність запропонованих рішень, які впроваджено у виробничий процес на:

ПАТ «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків) становить 15 тис. 085 грн. за сезон на одну сепаруючу машину;

ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ) становить 23 тис. 155 грн. за сезон на одну сепаруючу машину;

ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп) становить 22 тис. 243 грн. за сезон на одну сепаруючу машину;

ТОВ «Батьківщина» (с. Карабутове, Сумська обл.) становить 24 тис. 985 грн. за сезон на одну сепаруючу машину;

ФОП Знайдюк Василь Григорович (м. Чернігів) становить 1 млн. 500 тис. грн. за сезон роботи поточної лінії.

3. Питомий прогнозований економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень у підприємства переробної галузі України становить 40…60 млрд грн. в річному обчисленні.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень у підприємствах переробної галузі України становить з розрахунку на 1т НМ 98 грн/т.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової проблеми підвищення ефективності процесу вібропневматичного та вібропневмовідцентрового розділення НМ за густиною насіння, що дозволило зробити такі висновки та пропозиції:

1. Встановлено, що техніко-технологічне забезпечення виробництва зернових, в тому числі й технологічних процесів розділення НМ, не дають можливості повною мірою здійснювати управління і унеможливлюють підвищення економічних показників систем виробництва; стратегічним завданням є глибока модернізація галузі як складової частини агропромислового комплексу на базі високорентабельних сучасних технологій і техніки нового покоління, системного обґрунтування параметрів множини робочих органів машин для вібропневматичного та вібропневмовідцентрового розділення НМ, якими враховано відміни механізованих процесів, зумовлених зміною фізико-механічних властивостей матеріалу.

2. Розроблено дво- та тривимірні механіко-математичні моделі гідродинаміки багатофазних систем, які описують процес розділення псевдорозрідженого шару НМ на фракції на робочих поверхнях вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах, обґрунтовано принципи інтенсифікації процесу розділення НМ за густиною насіння.

3. На основі розробленої механіко-математичні моделі отримано аналітичні залежності, які моделюють процес розділення НМ на робочих поверхнях вібропневматичних сепаруючих машинах та узагальнюють взаємозв’язок кінематичних режимів та конструкційних параметрів з фізико-механічними властивостями матеріалу. Визначено, що відносна швидкість шарів частинок дискретної фази змінюється гармонічно за часом з частотою коливань робочої поверхні, а її амплітуда (A) залежить від фізико-механічних параметрів НМ ($\bar{\rho}_n$), швидкості повітряного потоку на вільній поверхні

псевдорозрідженого шару (v) і ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості (μ_n).

4. Чисельним розв'язком механіко-математичних моделей встановлено траєкторії та визначено швидкості руху шарів насіннєвого матеріалу, які утворено частинками різної густини. Відзначено, що компонента швидкості V_{13} частинок дискретної фази менше середнього значення швидкості повітряного потоку, залежить від об'ємної концентрації частинок дискретної фази, швидкості повітряного потоку (υ), кінематичного режиму вібраційних коливань робочої поверхні, що обумовлюється ефективним коефіцієнтом кінематичної в'язкості неперервної фази. За коефіцієнтом тертя f, що обумовлено робочою поверхнею, який наближається до нуля, домінуючим доданком у залежності з визначення швидкості V_{13} буде доданок з квадратичною залежністю від координати x_3 .

5. Імітаційним моделюванням обґрунтовано та експериментально підтверджено комплексний вплив на показник чистоти (*Purity*) основної фракції швидкості повітряного потоку (υ), частоти (v) і амплітуди (A) коливань деки пневмосортувального столу, повздовжнього (α) й поперечного (β) кутів її нахилу, що дозволило встановити діапазони раціональних значень відмічених параметрів:

пшениця: υ = 1,3 – 1,5 м/с, v = 940 кол/хв, A = 5 мм, α = 5 – 7 град, β = 5 – 7 град.;

кукурудза: υ = 1,3 – 1,6 м/с, v = 940 кол/хв, A = 5 мм, α = 4 – 6 град, β = 3 – 6 град;

соняшник: υ = 1,2 – 1,4 м/с., v = 940 кол/хв, A = 5 мм, α = 4 – 6 град, β = 5 – 6 град;

соя: υ = 1,2 – 1,4 м/с, v = 940 кол/хв, A = 6 мм, α = 5 – 7 град, β = 4 – 6 град.

6. Чисельним моделюванням процесу розділення НМ на робочій поверхні вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах визначено поля швидкостей руху компонентів та встановлено, що найбільший вплив на

параметри процесу розділення НМ має частота коливань робочої поверхні (ν) та швидкість повітряного потоку (υ). Збільшення частоти коливань робочої поверхні призводить до відповідного зростання абсолютної швидкості руху шарів НМ вздовж робочої поверхні в напрямку вивантаження, що уможливлює майже втричі скоротити час протікання процесу. Встановлено, що за умов наближення значення швидкості повітря на вході в шар НМ до позначки υ = 1,6 м/с чистота основної фракції зменшується, оскільки збільшується швидкість переміщення шарів НМ в напрямку вивантаження.

7. Імітаційним моделюванням обґрунтовано та експериментально підтверджено залежність чистоти (*Purity*) основної фракції НМ від параметрів процесу, що дозволило визначити раціональні значення швидкості повітряного потоку (υ) та частоти коливань робочої поверхні (ν) вібропневмовідцентрових сепаруючих машин:

пшениці: υ = 1,2 – 1,5 м/с, ν = 4500 – 5100 кол./хв;

соняшнику: υ = 1,3 – 1,5 м/с, ν = 4500 – 5000 кол./хв;

сої: υ = 1,3 – 1,6 м/с, ν = 5000 – 5500 кол./хв.

8. Розкрито механіко-технологічні підстави збільшення інтенсивності технологічних процесів розділення НМ за густиною насіння вібропневматичними та вібропневмовідцентровими сепаруючими машинами і на цій основі розроблено нову сепаруючу машину та удосконалено технологічну лінію підготовки високоякісного НМ. Обґрунтовано раціональні значення інтенсифікаторів хвилеподібного типу, що встановлюють на робочі поверхні:

крок встановлення H = 350 – 450 мм;

для пшениці: висота хвилеподібного інтенсифікатору h = 10 – 12 мм, висота прорізу хвилі h_H = 2 – 3,5 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм;

для кукурудзи: h = 15 – 20 мм, висота прорізу хвилі h_H = 3 – 8,5 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм;

для соняшнику: h = 10 – 15 мм, висота прорізу хвилі h_H = 3 – 4,5 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм;

для сої: h = 15 – 20 мм, висота прорізу хвилі h_H = 5,5 – 7 мм, довжина хвилі l = 150 – 250 мм,

що уможливило підвищити на 25 % продуктивність машин та довести чистоту основної фракції до 96 %.

9. Результати дослідження з виробництва інтенсифікаторів хвилеподібного типу впроваджено на ПрАТ ХМЗ (Хорольський механічний завод, м. Хорол) для модернізації, удосконалення ПСС-3,5, а також розроблення ПСС-10.

Річний економічний ефект від впровадження рекомендацій щодо раціональних режимів експлуатації сепаруючих машин становить 1,585 млн. грн.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень у підприємствах переробної галузі України становить з розрахунку на 1т НМ 98 грн/т.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдуєва Ф.М. Обґрунтування параметрів процесу і розробка решіт для вібровідцентрового сепарування насіння кукурудзи: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.20.01. Харків: ХНТУСГ, 2010. 20 с.
2. Аверченко В.І., Самойленко Н.М. Ґрунтознавство: навчальний посібник. Харків: Мачулін, 2018. 118 с.
3. Адамчук В.В. Теория центробежных рабочих органов для внесения минеральных удобрений: монография. Київ: Аграр. Наука, 2010. 178 с.
4. Адаптивний віброрешітний сепаратор. Патент України на винахід 120235, МПК (2006) B07B 1/00, B07B 1/40 (2006.01), B077B 1/42 (2006.01), G05B 13/00 G05B 15/00 Алієв Е.Б. Замовник: Інститут олійних культур. Національної академії наук України, № a201811084, заявл. 25.10.2019. опубл. 25.10.2019, бюл. № 20.
5. Алієв Елічин Бахтияр огли, Шевченко І.А. Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*. №3 (769). С. 63 – 65.
6. Алієв Елічин Бахтияр огли. Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету.* Житомир, 2017. №1 (58). Т.1. С. 173 – 180.
7. Алієв Елічин Бахтияр огли. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: *монографія.* Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
8. Алієв Ельчин Бахтияр огли. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: автореф. дис. …докт.техн.наук: 05.05.11. Харків, 2020. 40 с.
9. Альтман Е.І., Бошкова І.Л. Гідрогазодинаміка. Одеса: нац. акад. харчових технологій, 2019. 188 с.

10. Бабуха Г.Л. Рабинович М.И. Механика и теплообмен потоков полидисперсной газовзвеси. Київ. Наукова думка. 1969. 216 с.
11. Бакум М.В. Обоснование рациональных параметров технологического процесса сепарации мелкосеменных смесей на виброрешетной семеочистительной машине: автореф. дис. … канд. техн. Наук: 05.20.01. Харьков, 1984. 24 с.
12. Берник П.С., Ярошенко Л.В. Вибрационные технологические машины с пространственными колебаниями рабочих органов. Винница: ВГСХИ, 1988. 116 с.
13. Бейлин М.И., Либина Б.И. Теория движения материала в барабане непрерывно действующей центрифуги. Химическое машиностроение. 1940. №7. С. 3 – 9.
14. Богатирьов Д. В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини сепарації насіння за густиною: автореф. дис. …канд. техн. Наук: 05.05.11. Кіровоград, 2005. 24 с.
15. Богатирьов Д.В. Теоретичне визначення якісних показників роботи пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною. *Збірник наукових праць КНТУ (техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація).* Випуск 16. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – С.35-41.
16. Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г., Ломейко О.П. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник. Мелітополь: видавночо – поліграфічний центр «Lux», 2020. 330 с.
17. Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г., Верхоланцева В.О., Паляничка Н.О., Михайлов Є.В., Червоткіна О.О. Процеси і апарати харчових виробництв. Механічні та гідромеханічні процеси: підручник, Мелітополь, 2021. 476 с.
18. Бредихін В.В. Теоретичні основи вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння: *монографія.* Харків, 2017. 81 с.

19. Бредихін В.В., Богомолов О.В., Кісь-Коркіщенко Л.В., Сліпченко М.В., Іващенко С.Г., Ірклієнко В.І., Черняєв О.О., Тікунов С.Р. Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом: *монографія.* Харків, 2023. 401 с.
20. Бредихін В.В., Тіщенко Л.М., Півень М.В. До питання математичного моделювання процесу вібропневматичного розділення зернових сумішей. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2013. № 140. С. 45 – 59.
21. Бредихин В.В., Тищенко Л.Н., Пивень М.В. Определение эффективного коэффициента динамической вязкости зерновой смеси на рабочей поверхности пневмосортировального стола. *MOTROL.* 2013. С. 180 – 191.
22. Бредихин В.В. Исследование влияния распределения и силы воздушного потока на параметры процесса пневматического разделения зерновых смесей. *Матеріали IX-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Кіровоград: КНТУ*. 2013. Вип. 1. С. 103 – 115.
23. Бредихин В.В. К уравнению движения зерновой смеси. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2014. № 148. С. 254 – 257.
24. Бредихин В.В., Пивень М.В. К уравнению послоевого движения псевдоожиженной зерновой смеси. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2015. № 156. С. 204 – 208.
25. Бредихин В.В. К уравнению движения частиц при моделировании процесса сепарации зерновых смесей. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2016. С. 45 – 47.

26. Бредихин В.В. К уравнению движения частиц при моделировании процесса сепарации зерновых смесей. *Науковий журнал. Інженерія переробних і харчових виробництв.* Харків: ХНТУСГ. 2016. №1 (2). С. 43 – 48.
27. Бредихин В.В., Харченко С.А. К уравнению движения частиц при моделировании процесса сепарации зерновых смесей вибропневматическими сепараторами. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* 2017. Вип. 47/2. С. 21 – 25.
28. Бредихін В.В., Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р. Перфоровані поверхні з отворами у формі овалу Кассіні. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв:* матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 13 листопада 2020 р.). Харків: ХНТУСГ. 2020. С. 52-53.
29. Бредихін В.В. Шляхи підвищення економічної ефективності процесу підготовки насіннєвого матеріалу. *Український журнал прикладної економіки та техніки.* Західноукраїнський національний університет. 2023. № 3. С. 109 – 144. DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-2-15
30. Булгаков В.М., Бурлака В.В., Лукач В.С., Дроннік Ю.М., Кучеренко С.І., Мазоренко Д.І., Тіщенко Л.М. Теоретична механіка: посібник для практичних занять / за ред. С.І. Кучеренка. Ніжин: Видавництво «Міланік» ПП Лисенко М.М., 2009. 639 с.
31. Бурков А.И. Повышение эффективности функционирования пневмосистем зерно- и семяочистительных машин совершенствованием их технологического процесса и основных рабочих органов: дис. …докт. техн. наук. Киев, 1993. 500 с.

32. Бурлака В.В., Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Малець О.М. Про нелінійну модель потоку зерносуміші на плоскому решеті. *Інженерія природокористування.* 2015. №2 (4). С. 73 – 77.
33. Вамболь С.О., Міщенко І.В., Кондратенко О.М. Технічна механіка рідини і газу: підручник. Харків, 2016. 300 с.
34. Василенко П.М., Васильев С.А. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УАСХН, 1960. 284 с.
35. Василенко П.М. Погорелый П.В. Основы научных исследований. Механизация сельского хозяйства. – К.: Вища школа, 1985. 266 с.
36. Васильковський М.І., Лузан П.Г., Васильковський О.М. Аналіз процесу відцентрової сепарації зерна на решетах: розробка і технологія виробництва сільськогосподарських машин. Кіровоград, 1994. С. 18 –20.
37. Васильковський О.М., Васильковський М.І., Осипов І.М. Обґрунтування конструктивних параметрів інерційного прямоточного сепаратора зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. –Вип. 29, 1999. С. 234 – 238.
38. Васильків І.М. Основи теорії ймовірностей і математичної статистики: навчальний посібник. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2020. 58 с.
39. Вассерман О.А., Слинько О.Г. Технічна термодинаміка і теплообмін: підручник. Одеса: Фенікс, 2019. 496 с.
40. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень: навчальний посібник. Суми: СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2016. 260 с.
41. Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини та агрегати. Зерноочисно-сушильні комплекси. Методи випробувань: СОУ 74.3-37-147:2004. Київ: Мінагрополітики України [чинний від 2006-08-01], 2006. 26 с.

42. Вища математика: підручник / За ред. Шинкарика М.І. Тернопіль, 2003. 484 с.
43. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини. Київ: «Каравелла», 2008. 407 с.
44. Гевко Б.М., Рогатынский Р.М. Винтовые и подающие механизмы сельскохозяйственных машин. – Львов: Вища школа, 1989. 176 с.
45. Герасименко С.С., Головач А.В., Козирев О.В. Статистика / за ред. О.П. Бондаренко. Київ, 2000. 476 с.
46. Герич М.С., Синявська О.О. Математична статистика: навчальний посібник. Ужгород, 2021. 146 с.
47. Гончаров Е.С. Вероятностно-математическая модель процесса сепарирования зерновых материалов виброцентробежными решетами. Механизация и электрификация сельского хозяйства. Киев: Урожай, 1975. С. 19 – 25.
48. Гончаров Е.С. Исследование процесса сепарации зерновых материалов центробежно-вибрационными решетами: автореф. дис. …кан. тех. наук: 05.05.11. Киев: УСАХ, 1963. 23 с.
49. Горячкин В.П. Собрание сочинений в трех томах. Киев: Колос, 1968. Т.1. 720 с.
50. Гой Т.П., Махней О.В. Диференціальні рівняння: навчальний посібник. Івано – Франківськ, 2012. 351 с.
51. Грабар І.Г., Дерев'янко Д.А., Герук С.М. Вплив вологості зерна при збиранні та післязбиральній обробці зернового вороху озимого жита на його травмування і насіннєві якості: *збірник праць Вінницького національного аграрного університету.* Вінниця: ВНАУ, 2010. Вип.5. С. 60 – 62.
52. Гимадиев А.М. Травмирование семян. Агро-Информ, 2016. №3. С. 18.
53. ГОСТ 10854-88 Насіння олійне. Методи визначення сміттєвої, олійної та осібно врахованої домішки.

54. Гринченко А.С. Совместное оценивание параметров подобных величин по результатам испытаний. *Надежность и контроль качества* 1991, № 7. С. 38 – 43.
55. Державна служба Україна з питань безпеки харчових продуктів та захисту споживачів. https://dpss.gov.ua/ (дата звернення 06.05.2023).
56. Дерев'янко Д.А. Шляхи покращення якісних показників зерна. *Збірник наукових статей.* Луцький національний технічний університет. Вип. 21, 2011. С. 117 – 120.
57. Дерев'янко Д.А. Травмування зерна внаслідок дії внутрішніх і зовнішніх чинників на якість насіння і зернофуражу. *Збірник наукових праць КНТУ.* Вип. 24, 2011. С. 184 – 187.
58. Дерев'янко Д.А. Поліпшення ефективності післязбиральної обробки зерна і насіння. *Науково – виробничий журнал. Техніка і технології АПК.* №3, 2011. С. 28 – 30.
59. Дерев'янко Д.А. Післязбиральне оброблення зерна і насіння на зерноочисному заводі «Petkus». *Науково – виробничий журнал. Техніка і технології АПК.* №5, 2011. С. 14 – 17.
60. Дерев'янко Д.А., Тарасенко О.П., Оробинський В.І. Вплив травмування на якість насіння зернових культур: монографія. Житомир, 2012. 438 с.
61. Дерев'янко Д.А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування і якість насіння: монографія. Житомир: «Полісся», 2015. 774 с.
62. Дроннік Ю.М., Кучеренко С.І., Тіщенко Л.М. Довідник з теоретичної механіки / за ред. С.І. Кучеренко. Харків: Око, 2003. 289 с.
63. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. Київ: Держстандарт України, 2003. 174 с.
64. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. Київ.: Держстандарт України, 2005. 23 с.

65. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Національний стандарт України. Київ.: Київспоживстандарт України, 2005. 23 с.
66. ДСТУ 3768:2019. Пшениця технічні умови. Київ.: Держстандарт України, 2019. 21 с.
67. ДСТУ 9082:2021. Соняшник. Метод визначення масової частки олеїнової кислоти за показником заломлення олії. Київ.: Держстандарт України, 2021. 25 с.
68. ДСТУ 4964:2008. Соя. Технічні умови (62513). Київ.: Держстандарт України, 2008. 19 с.
69. Дубровська В.В., Шклаяр В.І. Термодинаміка та теплообмін: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 152 с.
70. Думенко К.М., Павлюченко І.С. Фізико-механічні властивості сільськогосподарських матеріалів: курс лекцій. Миколаїв, 2014. 39 с.
71. Диференційні рівняння: навчальний посібник для інженерних спеціальностей. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 126 с.
72. Економіка підприємств: підручник / під заг. ред. д.е.н., проф. Ковальської Л.Л. та проф. Кривов'язюка І.В. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2020. 700 с.
73. Єрмак В.П. Обґрунтування способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11. – Луганськ, 2003. 17 с.
74. Жолобчасте сито з отворами у вигляді овалу Кассіні: Пат. UA 145733 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 31.08.2020; опубл. 29.12.2020, Бюл. № 24. 4с.
75. Завгородний А.И. Научные основы процессов очистки отверстий решет зерноочистительных машин: дис. … канд. тенх. наук: 05.05.11. Харьков, 2011. 327 с.
76. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. Киев: УСХА, 1998. 625 с.

77. Заика П.М. Вибрационные зерноочистительные машины. Теория и расчет. Киев: Машиностроение, 1967. 144 с.
78. Заика П.М. Динамика вибрационных зерноочистительных. Киев: Машиностроение, 1997. 278 с.
79. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування зерна. Харків: Око, 2006. 408 с.
80. Звіт Міністерства аграрної політики та продовольства України. Київ, 2022. https://minagro.gov.ua/pro-nas/plani-ta-zviti/zviti-pro-robotu-minagropolitiki (дата звернення 06.05.2023).
81. Звіт Міндовкілля. Київ, 2022. https://mepr.gov.ua/vprovadzhennya-yevrointegratsijnyh-reform-u-pryrodoohoronnij-sferi-mindovkillya-pidgotuvalo-zvit-pro-otsinku-potochnogo-stanu-progresu/ (дата звернення 03.02.2023).
82. Звіт Міністерства економіки України. Київ. https://www.me.gov.ua/?lang=uk-UA/ (дата звернення 15.04.2023).
83. Зінченко О.І. Рослинництво. Київ: Вища освіта, 2004. 418 с.
84. Іванченко Ф.М., Слінченко В.М. Технологія зберігання та переробки сільськогосподарської продукції: навчально – методичний посібник. Київ: КНЕУ, 2005. 223 с.
85. Ижик Н.К. Полевая всхожесть семян. Киев: Урожай, 1976. 200 с.
86. Інтегральне числення функцій однієї змінної: навчальний посібник / За ред. Курченко О.О. Київ, 2016. 140 с.
87. Калошина З.М. О повреждении покровов семян пшеницы и ржи и влияние их на всхожесть. Биология и технология семян. Харьков, 1974. С. 165 – 168.
88. Кириченко В.В., Петренкова В.П. Основи фітосанітарної безпеки в агроценозах польових культур. Дніпро, 2020. 321 с.
89. Коваль В.Я., Ермак В.П. Теоретический аналіз процесса сепарирования семян подсолнечника в вертикально-горизонтальном воздушном

потоке. *Збірник наукових праць ЛДАУ Серія: Технічні науки*. Вип. 10 (22). – Луганск: ЛДАУ, 2001. С.78 – 81.

90. Коваль В.Я., Єрмак В.П. Новий спосіб сепарування насінин у повітряних потоках. *Збірник наукових праць КДТУ* (*техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація*). Випуск 10. – Кіровоград: КДТУ, 2005. С.74 – 77.
91. Ковбаса В.П., Швайко В.М., Гуцол О.П. Механіка сільськогосподарських матеріалів та середовищ: навчальний посібник / за ред. проф. Ковбаси В.П. Ніжин: ПП Лисенко М.М., 2015. 536 с.
92. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента. – Киев -Донецк: Вища школа. Головное издательство, 1982. 120 с.
93. Козлов Л.Ф., Бабенко В.В. Экспериментальные исследования пограничного слоя. – К.: Наукова думка, 1978. 183 с.
94. Комаристов В.Ю., Петренко М.М. Довідник з механізації післязбиральної обробки зерна. – К.: Урожай, 1990. 194 с.
95. Кондратюк П.І. Зерноочисні і сортувальні машини. – К.: Держтехвидав., 1953. С.12 – 69.
96. Константинов Ю.М., Гіжа О.О. Технічна механіка рідини і газу. Київ: «Вища школа», 2002. 280 с.
97. Котов Б.І., Волошин М.І. Основні напрями розвитку техніки та технології післязбиральної обробки зерна. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції.* Глеваха, 1997. С. 39 – 40.
98. Котов Б.І. Технічні засоби для зберігання зерна у господарствах України. *Пропозиція.* 1999. №10. С. 48 – 50.
99. Котов Б.І., Волошин М.І. Перспективи розвитку конструкцій зернонасіннєочисної техніки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* Кіровоград.: КДТУ, 2001. Вип. 31. С. 110 – 112.

100. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерноматеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* Кіровоград.: КДТУ, 2003. Вип. 33. С. 53 – 59.

101. Котов Б.І., Степаненко С.П., Швидя О.В. Аналітичні дослідження раціональної подачі зернової суміші в аспіраційний канал пневмовідцентрових сепараторів: *Вісник Харківського національного технічного університета сільського господарства ім. П. Василенка. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва та переробки сільськогосподарської продукції.* Харків, 2010. Вип. 103. С. 55 – 61.

102. Котов Б.І., Степаненко С.П. Закономірності руху частинок в пневмогравітаційному сепараторі при змінній швидкості горизонтального повітряного потоку. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей.* Луцький нац. техн. ун-т. Луцьк, 2016. Вип. 35. С. 40 – 45.

103. Котов Б.І., Степанеко С.П. Дослідження впливу пульсуючого повітряного потоку на переміщення зерна у вібророзрідженому шарі зерносоломистого вороху. *Механізація та електрифікація сільськогосподарського виробництва: міжвідомчий тематичний науковий збірник.* Глеваха, 2016. Вип. 4 (103). С. 38 – 46.

104. Котов Б.І., Спірін А.В., Твердохліб І.В., Степаненко С.П., Швидя В.О. До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів. *Процеси та обладнання переробних і харчових виробництв*. Глеваха, 2017. Вип. 4 (99). С. 51 – 55.

105. Красиловець Ю.Г. Особливості захисту зернових колосових культур від шкідників і хвороб в органічному землеробстві: посібник українського хлібороба. 2012. Т.1. С. 151 – 154.

106. Кулінченко В.Р. Гідродинаміка: навчальний посібник. Київ: НМК ВО, 1992. 272 с.

107. Кунденко М.П., Єгорова Ю.О., Бредихін В.В., Єгоров О.Ю. Метрологічне забезпечення електронних систем вимірювання електрофізичних параметрів: монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2021. 198 с.

108. Кучеренко С.І., Бурлака В.В., Тіщенко Л.М., Мазоренко Д.І., Булгаков В.М., Калетнік Г.М., Кравченко І.Є., Березовой М.Г. Теоретична механіка: навчальний посібник / за ред. Кучеренка С.І. Харків, 2012. 568 с.

109. Кушлик – Дивульська О.І., Поліщук Н.В., Орел Б.П., Штабалюк П.І. Теорія ймовірності та математична статистика: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 213 с.

110. Кириленко В.В. Економіка: навчальний посібник для студентів ВНЗ. Тернопіль: Економічна думка, 2002. 193 с.

111. Кириченко В.В., Рябуха С.С., Кобизєва Л.Н., Посилаєва О.О., Чернишенко П.В. Соя: монографія / за ред В.В. Кириченка. Харків, 2017. 404 с.

112. Лихочвор В.В., Петриченко В.Ф., Іващук П.В. Зерновиробництво. Львів: НВФ «Українські технології», 2008. 624 с.

113. Лойцянський Л.Г. Механика жидкости и газа. Киев. 1973. 847 с.

114. Мазоренко Д.И. Теоретическое и экспериментальное исследование вибрационно-центробежного сепаратора с пространственным движением оси вращения ротора для очистки семян риса от трудноотделимых сорняков: дис. …канд. техн. наук: 05.20.01. Харьков, 1971. 183 с.

115. Малюта С.И. Обоснование технологического процесса и параметров семеноочистительной пневмоцентрифуги: автореф. дис. …канд. техн. наук: 05.20.01, Глеваха, 1989. 21 с.

116. Манчинський Ю.О. Обґрунтування параметрів робочого органу вібраційної машини для розділення насіннєвих сумішей. – Харків: Око, 1997. 123 с.

117. Мачихина Л.И. Очистка риса – зерна. Киев.: Колос, 1983. 136 с.

118. Машина для сортування насіння. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П.: пат. КМ 102768 України. № u201502227; заявл. 13.03.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. №22. 4 с.

119. Мезенцев В.А., Бредихин В.В., Черняев А.А., Ильина Н.А., Кобызева Л.Н., Безуглая О.Н. Влияние размерных характеристик частиц на толщину семенной оболочки у семян нута. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: вісник ХНТУСГ.* Харків, 2018. С. 90 – 100.

120. Миняйло А.В. Исследование процесса сепарирования семян на плоских горизонтальных виброрешетах: дис. …кан. техн. наук: 05.20.01. Харьков: ХИМЭСХ, 1973. 163 с.

121. Молоцький М.Я., Васильківський С.П., Князюк В.І., Власенко В.А. Селекція і насінництво сільськогосподарських рослин: підручник. Київ: «Вища школа», 2006. 465 с.

122. Мороз І.О. Основи термодинаміки: навчальний посібник для ВНЗ України. Суми, 209. 180 с.

123. Насіннєзнавство та методи визначення якості насіння сільськогосподарських культур: навчальний посібник / за ред. С.М. Каленської. Вінниця, 2011. 323 с.

124. Насіннєочисна машина. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П.: пат. КМ 98264 України № u 201411391; заявл. 12.09.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. №3. 4 с.

125. Наукові основи агропомислового виробництва в зоні Степу України / М.В. Зубець та ін. Київ: Аграрна наука, 2004. 844 с.

126. Нестеренко О.В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу: автореф. дис. …канд. техн.наук:05.05.11. Кропивницький, 2017. 24 с.

127. Николаева Г.Т. Механическое повреждение семян при различных этапах заводской обработки. Биология и технология семян. Харьков, 1974. С. 158 – 161.

128. Ольшанський В.П., Бредихін В.В., Лук'яненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2017. 802 с.

129. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Ольшанський О.В, Бредихін В.В. Динаміка імпульсно навантажених нелінійних осциляторів : монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2021. 262 с.

130. Ольшанський В.П., Ольшанський О.В. Математичні моделі зернопотоків по віброрешетах. Харків, 2016. 137 с.

131. Опря А.Т. Статистика: навчальний посібник. Київ: Центр учбової літератури, 2012. 448 с.

132. Оптимізація інтегрованого захисту польових культур: довідник / За заг. Ред. В.В. Кіриченка, Ю.Г. Красиловця. Харків: Магда LTD, 2006. 252 с.

133. Параска Г.Б., Прибега Д.В., Майдан П.С. Методи та засоби експериментальних досліджень: навчальний посібник. Київ: Кондор – Видавництво, 2017. 138 с.

134. Першина Ю.І., Пріщенко О.П., Черемська Н.В., Черногор Т.Т. Невизначений та визначений інтеграли: навчально – методичний посібник з курсу вищої математики. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. 188 с.

135. Петренко М.М., Богатирьов Д.В. Експериментальні дослідження пневмоімпульсної сепарації за густиною // Вісник ТДТУ. Випуск 1. – Тернопіль: ТДТУ, 2005. – С. 23-34.

136. Петренко М.М., Богатирьов Д.В. Пневмоімпульсна сепарація насіння за густиною як випадковий марківський процес. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.*

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 33. – Кіровоград: КДТУ, 2003. С. 286 – 291.

137. Петренко М.М., Богатирьов Д.В. Теоретичні дослідження пневмоімпульсної сепарації за густиною. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 32. – Кіровоград: КДТУ, 2002. С. 140 – 146.

138. Петренко Н.Н. Исследование вращающегося воздушного канала для очистки зернового вороха: дис… канд. тех. наук: 05.05.11. – Кировоград, 1974. 120 с.

139. Петров А.М., Алфьоров О.І., Науменко А.О., Марченко М.В. Опір матеріалів: навчальний посібник. Харків: «Диса плюс», 2021. 253 с.

140. Пневматичний сортувальний стіл ПСС-2,5. Технічний паспорт. Рекомендації з експлуатації.

141. Пневмоімпульсна машина для сепарації насіння за густиною: Деклараційний патент 54270 А Україна, МПК 7 А01С1 / М.М. Петренко, Д.В. Богатирьов; Кіровоградський національний технічний університет. - №2002075688; Заяв. 10.07.2002; Опубл. 17.02.2003. 4 с.

142. Повітряно-гравітаційний сепаратор. Патент України КМ 50652 / Степаненко С.П., Швидя В.О., Котов Б.І., Коваль Ю.Г. № u200909501; заявл. 16.09.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл.№12. 4 с.

143. Полуэктов Н.И. Исследование центрифугирования семенных смесей: автореф. дис. …канд. техн. наук. С., 1961. 17 с.

144. Попова Е.П. Микроструктура зерна и семян. М.: Колос, 1979. 224 с.

145. Прилад для розділення насіннєвих матеріалів за густиною. Бредихін В.В., Мезенцев В.О., Черняєв О.О. пат. 127393 Україна: МПК (2018.01) B03B 4/00 B*07*B *4/08* (2006.01) B*07*B *9/02* (2006.01); заявл. 16.03.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 4 с.

146. Прилуцкий А.Н. Исследование процесса разделения семян пневмоцентрифугой и обоснование ее параметров: автореф. дис. …кан. техн. наук. Киев, 1975. 20 с.

147. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П., Коваль Г.Ю. До обґрунтування шляхів підвищення інтенсифікації процесу пневмосепарації і конструкційної схеми пневмосепаруючої частини вібровідцентрового сепаратора. Механізація та електрифікація сільського господарства: *міжвідомчий тематичний науковий збірник.* Глеваха, 2010. Вип. 94. С. 216 – 220.

148. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача: навчальний посібник. Ріне, 2008. 252 с.

149. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединённых Наций (FAO). https://www.fao.org/home/ru (дата звернення 28.12.2022).

150. Решето для очищення зернового вороху з отворами у вигляді овалу Кассіні: Пат. UA 133625 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 10.12.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. №7. 4с.

151. Рогач С.М., Суліма Н.М., Гуцул Т.А., Ільків Л.А., Ярема Л.В. Економіка сільського господарства: навчальний посібник. Київ, 2018. 517 с.

152. Руденко В.М. Математична статистика: навчальний посібник. Київ: Центр учбової літератури, 2012. 304 с.

153. Сепаратор пневматичний. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П., Швидя В.О.: пат. КМ 118804 України. №u201702526; заявл. 20.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. 16. 4 с.

154. Сепаратор зерна пневмовідцентровий. Падюк І.С., Степаненко С.П., Швидя В.О., Прилуцький А.Н.: пат. КМ 119186 України. №u201704129; заявл. 25.04.2017; опубл. 11.09.2017, Бюл. №17. 4 с.

155. Сепаратор пневматичний. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П., Швидя В.О.: пат. №118889 України. №u201702294; заявл. 13.03. 2017; опубл. 25.03.2019, Бюл. №6. 4 с.

156. Слипченко М.В. Обоснование параметров процесса и разработка пневмосепарирующего устройства виброцентробежных зерновых сепараторов: дис. … канд. тех. наук: 05.05.11. Харьков, 2013. 225 с.

157. Смирний М.Ф. Основи наукових досліджень: конспект лекцій. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 112 с.

158. Сортувальний пневмостіл марки KD виробництва Petkus Wutha. Технічний паспорт. Рекомендації з експлуатації.

159. Спосіб автоматичного фенутипування насіння і пристрій для його здійснення. Патент України на винахід 120231, МПК (2006) A 01C 1/00, G01B 11/00, G01B 11/02 (2006.01), G01N 21/25 (2006.01), G06T 7/00. Алієв. Е. Б. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії наук України, № a201808709. Заявл. 25.01.2019. Опубл. 25.10. 2019. Бюл. №20. 4 с.

160. Степаненко С.П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва.* Харків, 2008. Вип. 75. Т.1. С. 59 – 65.

161. Степаненко С.П. Техніко-технологічні основи вдосконалення сепарації зерна і насіння. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* Мелітополь, 2009. Вип. 9. Т. 1. С. 66 – 74.

162. Степаненко С.П., Прилуцький А.Н. Інтенсифікація процесів післязбиральної обробки зерна – основа ефективності його виробництва. *Вісник аграрної науки,* 2010. Вип. 10. С. 65 – 59.

163. Степаненко С.П., Котов Б.І., Калініченко Р.А, Швидя В.О, Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна: монографія. Ніжин, 2017. 552 с.

164. Степаненко С.П., Котов Б.І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний міжвідомчий збірник.* Глеваха, 2018. Вип. №8. (107). С. 80 – 88.

165. Степаненко С.П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. …докт. техн. наук: 05.05.11, Глеваха, 2020. 48 с.

166. Сито для калібрування сипких матеріалів: Пат. UA 150092 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 16.08.2021; опубл. 30.12.2021, Бюл. № 52. 4 с.

167. Ситникова Ю.В. Вища математика. Інтегральне числення: конспект лекцій. Харків: ХНМУГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 114 с.

168. Стратегія і тактика захисту рослин / за ред. В.П. Федоренко. Київ: Альфа – стевія, 2012. Т.1. Стратегія. 500 с.

169. Теленгатор М.А., Уколов В.С., Цециновский В.М. Обработка семян зерновых культур. Киев: Колос, 1972. 271 с.

170. Тікунов С.Р., Сметаніна Н.В., Бредихін В.В., Мезенцев В.О. Раціональне проектування решіт сепараторів із замкненим перерізом отвору. *Dynamics, strength and modelling in mechanical engineering:* тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 05-08 жовтня 2020 р.). Харків, 2020. С. 283 – 284.

171. Тікунов С.Р., Бредихін В.В., Сметанкіна Н.В. Дослідження пропускної спроможності сепаруючих робочих поверхонь. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 25-26 листопада 2021 р.). Харків: ДБТУ, 2021. С. 76 – 77.

172. Тікунов С.Р., Бредихін В.В., Сметанкіна Н.В. Класифікація робочих поверхонь з отворами у формі овалу Кассіні: *digital transformations of*

modernity: multidisciplinary international scientific-practical conference. (Coimbra, Portugal, 24 january 2022.). Portugal, 2022. P. 110 – 111.

173. Тищенко Л.Н., Мандрыка А.В. К вопросу динамики взаимодействия системы «сепаратор-зерновой поток*»: сб.н.тр. ХГПУ. Харьков: ХГПУ*, 1998. Вып.6, Ч.2. С. 149 – 151.
174. Тіщенко Л.Н., Мандрика А.В. Методика моделювання процесу сепарування системи «решето-зерновий потік»: *науковий вісник НАУ.* Київ: НАУ, 1998. Вип.9. С.145 – 157.
175. Тищенко Л.Н. К определению гидродинамических характеристик псевдоожиженных сыпучих сред при работе виброцентробежных сепараторов. Экология и с.х. техника: *сб. тр. СЗНИИМЭСХ. СПб. Павловск:* СЗНИИМЭСХ, 2000. Т.1. С. 70 – 73.
176. Тищенко Л.Н. Гидродинамические характеристики псевдоожиженных сыпучих сред при виброцентробежном сепарировании на зерноперерабатывающих предприятиях. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв* Вісник ХДТУСГ. Харків: ХДТУСГ, 2001. Вип. 5. С. 13 – 33.
177. Тищенко Л.Н., Бредихин В.В. Тенденции совершенствования вибропневматических центрифуг для разделения зерновых смесей: *Конструювання, виробництво та експлуатація с.г. машин*: Зб.н.тр. КДТУ. Кіровоград: КДТУ, 2001. Вип. 31. С. 92 – 96.
178. Тищенко Л.Н., Телига А.Г. К исследованию параметров виброожиженных зерновых смесей при виброцентробежном сепарировании: *вісник аграрної науки Причорномор'я*. Миколаїв: МАДУ, 2002. Вип. 4 (18), Т.2. С. 144 – 154.
179. Тищенко Л.Н., Телига А.Г. Экспериментальное исследование ленточнообразных интенсификаторов цилиндрических решет виброцентробежных сепараторов: *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв:* Вісник ХДТУСГ. Харків: ХДТУСГ, 2002. Віп. 9. С. 20 – 27.

180. Тищенко Л.Н. О применении фрактального анализа для развития математических моделей сегрегации зерновых смесей: *механізація с.г. виробництва:* Вісник ХДТУСГ. Харків: ХДТУСГ, 2002. Вип. 11. С. 106 – 112.

181. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна: монография. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2004. 222 с.

182. Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Пивень М.В. Исследование закономерностей пористости зерновых смесей при сепарировании плоскими вибрационными решетами. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв:* Вісник ХНТУСГ. Харків: ХНТУСГ, 2007. Вып. 58. С. 22 – 29.

183. Тищенко Л.Н., Бредихин В.В., Харченко С.А. Вибропневмоцентробежное разделение семенной смеси с учетом влияния рифлей. Вісник ХНТУСГ. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв.* 2008. С. 12 – 18.

184. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., Харченко С.А. Бредихин В.В. Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решетами. Вісник ХНТУСГ*: Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв.* 2009. С. 34 – 44.

185. Тищенко Л.Н., Мазоренко Д.И., Пивень М.В., Харченко С.А., Бредихин В.В., Мандрыка А.В. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография. Харьков: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2010. 359 с.

186. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Гидродинамика сепарирования зерна: монографія. Харків. ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2010. 173 с.

187. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., Бредихин В.В. Обоснование процесса сегрегации зерновых смесей при просеивании виброцентробежными решетами. MOTROL–*Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa.* 2013. 87 – 98.

188. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., Бредихин В.В. Исследование внутрислоевого движения частиц зерновых смесей. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2014. №. 152. С. 5 – 11.

189. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В., Харченко Ф.М., Слипченко М.В. Динамика виброцентробежной зерноочистки: монографія. Харків. 2013. 438 с.

190. Тищенко Л.Н., Харченко С.А. К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах: *MOTROL*/ Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin-Rzescow, 2013. Vol. 15. P. 94 – 99.

191. Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Абдуев М.М. К построению модели динамики пузырьковой псевдоожиженной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету: *механізація сільськогосподарського виробництва*: Вісник ХНТУСГ, 2015. Вип. 156. С. 168 – 174.

192. Тищенко Л.Н., Харченко С.А. Инновационные решения повышения ефективности виброрешетной сепарации просеиваемости зерновых смесей. *Вібрації в техніці та технологіях.* Вінниця: ВНАУ, 2016. №2 (82). С. 116 – 124.

193. Турик В.М. Основи газодинаміки: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 139 с.

194. Ульрих Н.Н. Механизация подготовки и хранения семян. М: Изд. Сельскохозяйственной литературы и плакатов, 1968. С. 255 – 468.

195. Ульянов А.Ф. Центрифугирование сыпучих тел. Сельхозмашина. 1951. №3. С. 24 – 28.

196. Ульянов А.Ф., Бочкарев И.А. Кулаков Г.Ф. Вибрационное центрифугирование зерна: *труды ВНИИЗ. м,* 1963. Вып. 42. С. 153 – 166.

197. Ульянов А.Ф., Бочкарев И.А., Печерский Е.М. О положении и форме ротора сепарационной центрифуги: *совместные труды УкрНИИСХОМ и ВНИИСХОМ.* М, 1968. Вып. 5. С. 120 – 126.

198. Ульянов А.Ф., Бочкарев А.И., Печерский Е.М. Даление и направление воздушного потока в виброцентробежном сепараторе: *механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства*. М, 1968. № 8. С. 34 – 38.

199. Фадеев Л.В. Зерно. Очистка. Производство семян. Щадящие технологии Фадеева. СПЕЦЭММ. Харьков, 2014. 96 с.

200. Фадеев Л.В. Подсолнечник Украины – сегодня и завтра. СПЕЦЭММ. Харьков, 2015. 128 с.

201. Фадеев Л.В. Зерно нельзя бить – оно основа жизни человека. Щадящая пофракционная технология Фадеева. СПЕЦЭММ. Харьков, 2018. 96 с.

202. Харченко С., Тищенко Л., Харченко Ф. Решение уравнений динамики псевдоожиженных зерновых смесей на структурных виброрешетах. *MOTROL.* Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin-Rzeszow, 2014. V. 16, №7. P. 111 – 117.

203. Харченко С. Теория осисеметричных движений кольцевого зернового слоя внутри цилиндрического решета. *MOTROL* Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin-Rzeszow, 2015. V. 17, №7. P. 73 – 81.

204. Харченко С. К разработке гидродинамической модели движения зерновой смеси по цилиндрическому решету виброцентробежніх сепараторов: *ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*: Вісник ХНТУСГ, 2015. Вип. 158. С. 198 – 203.

205. Харченко С.А. Обоснование параметров процесса очистки воздушного потока пылеосадочной камерой виброцентробежных зерновых сепараторов: автореф. дис. …кан. тех. наук: 05.05.11. Харьков: ХНТУСХ им. П. Василенка, 2007. 230 с.

206. Харченко С. А, Тищенко Л.Н. Уточнение уравнений динамики пузырьковой псевдоожиженной зерновой смеси по структурному виброрешету: *Вібрації в техніці і технологіях*. Вінниця: ВНАУ, 2014. №1 (73). С. 50 – 53.

207. Харченко С.А. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей: автореф. дис. …докт. техн. наук: 05.05.11. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2017. 332 с.

208. Чихладзе Е.Д. Опір матеріалів: підручник. Харків, 2022. 360 с.

209. Чорновол М.І., Черкун В.Ю., Аулін В.В. та ін. Надійність сільськогосподарської техніки; за заг. ред. М.І. Черновола. Кіровоград: КОД, 2010. 320 с.

210. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. М: Машиностроение, 1972. 149 с.

211. Царенко О.М., Войтюк Д.Г., Швайка В.М., Довжик М.Я., Яцун С.С. Механіко – технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / за ред. С.С. Яцуна. Київ: Мета, 2 – 3. 449 с.

212. Цециновский В.М. Теоретические основы разделения сыпучих смесей: *труды ВНИИЗ*. м, 1951. Вып. 23. С. 25 – 49.

213. Цуркан О. В. Вібромеханічна інтенсифікація сушіння насіння баштанних культур у процесі післязбиральної обробки: дис. …д-ра. техн. наук: 05.05.11. Вінниця – Глеваха, 2020. 449 с.

214. Шаповаленко О.І., Євтушенко О.О., Янюк Т.І., Рибчинський Р.С. Сушіння та зберігання зерна. Київ: «Олді+», 2019. 396 с.

215. Швачич Г.Г., Коноваленков В.С., Заборова Т.М. Означений інтеграл та його застосування. Невластиві інтеграли: навчальний посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. 43 с.

216. Шейченко В.О., Нєдовєсов В.І., Грицака О.М. Дослідження обмолоту зерна трибарабанною молотаркою: *сільськогосподарські машини,* 2015. Вип. 33. С. 149 – 155.

217. Шмат К.И., Карманов В.В. Моделирование технологического процесса тепловой обработки зернового сырья установкой с регулируемым шнековым рабочим органом. *Труды ОСХИ.* Одесса: ОСХИ. – 1999. С. 35-38.

218. Шмат К.І., Диневич Г.Ю., Карманов В.В. Технологія і обладнання для зберігання і переробки сільськогосподарської продукції. Навчальний посібник. – Херсон, ХНТУ, 2004. 400 с.

219. Шмат К.І., Диневич Г.Ю., Карманов В.В., Глущенко В.С. Проектування і розрахунок робочих органів грунтообробних машин. Навчальний посібник. – Херсон, ХДТУ, 2000. 78 с.

220. Шпаар Д. Зерновые культуры: выращивание, уборка, хранение и использование. Киев: Издательский дом «Зерно», 2014. 704 с.

221. Abderrahim F., Huanatico E., Segura R., Arribas S., Gonzalez M.C., Condezo-Hoyos L. Physical features, phenolic compounds, betalains and total antioxidant capacity of coloured quinoa seeds. *Chenopodium quinoa Willd. from Peruvian Altiplano [J],* Food Chem. 183 (2015) P. 83 – 90, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.029.

222. Adolf V.I., Shabala S., Andersen M.N., Razzaghi F., Jacobsen S.E. Varietal differences of quinoa's tolerance to saline conditions [J], *Plant Soil* 357 (2012) 117–129, https://doi.org/10.1007/s11104-012-1133-7.

223. Aiwize E.A., Achebo J.I., 2012. Liquid soap production with blends of rubber seed oil (RSO) and palm kernel oil (PKO) with locally sourced caustic potash (KOH). Niger. *J.Technol.* 31, 63–67.

224. Aigbodion A.I., Pillai C.K.S., 2000. Preparation, analysis and applications of rubber seed oil and its derivatives in surface coatings. *Prog. Org. Coat.* 38, 187–192. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(00)00086-2.

225. Aigbodion A.I., Okieimen F.E., Obazee E.O., Bakare I.O., 2003. Utilisation of maleinized rubber seed oil and its alkyd resin as binders in waterborne coatings. *Prog. Org. Coat.* 46, 28–31. https://doi.org/10.1016/S0300-9440(02)00181-9.

226. Akinori Awazu. Segregation and plase inversion in a simple granural system.//arXiv:cond-mat/0301087. – V.1, 8. – Jan., 2002.

227. Appelhagen I., Thiedig K., Nordholt N., Schmidt N., Huep G., Sagasser M., Weisshaar B. Update on transparent testa mutants from Arabidopsis thaliana:characterisation of new alleles from an isogenic collection[J], *Planta.* 240 (5). (2014) 955–970, https://doi.org/10.1007/s00425-014-2088-0 .

228. Asioli D., Aschemann-Witze, J., Caputo, V., Vecchio R., Annunziata A., Næs T., &Varela P. (2017). Making sense of the "clean label" trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food Research International,* 99, 58–71.

229. Aydın C. Physical properties of hazel nuts. *Biosystems Engineering,* 82(3), 2002. 297–303.

230. Awulu J.O., Ogbeh G.O., Asawa N.D., 2015. Comparative analysis of biodiesels from calabash and rubber seeds oils. Int. J. *Renew. Energy Dev.* 4, 131–136. https://doi.org/10.14710/ijred.4.2.131-136.

231. Babatunde G.M., Pond W.G., 1988. Nutritive value of Nigerian rubber seed (Hevea brasiliensis) meal and oil. III. Performance characteristics, relative organ weights, hematocrit and plasma metabolites of growing female rats fed corn diets containing rubber seed meal, soya bean meal or casein. *Anim. Feed Sci. Technol.* 20, 125–133. https://doi.org/10.1016/0377-8401(88)90036-3.

232. Babatunde G.M., Pond W.G., Peo E.R., 1990. Nutritive value of rubber seed (Hevea brasiliensis) meal: utilization by growing pigs of semipurified diets in which rubber seed meal partially replaced soybean meal. J. *Anim. Sci* 68, 392–397. https://doi.org/10.2527/1990.682392x .

233. Balkose D., Egbuchunam T., Okieimen F., 2010. Thermal behaviour of metal soaps from biodegradable rubber seed oil. J. Therm. *Anal. Calorim.* 101, 795–799. https://doi.org/10.1007/s10973-010-0940-4.

234. Baryeh E. A. Physical properties of bambara groundnuts. *Journal of Food Engineering,* 47, 2001. 321–326.

235. Bolger Z., Brunton N. P., & Monahan, F. J. (2018). Impact of inclusion of flaxseed oil (pre-emulsified or encapsulated) on the physical characteristics of chicken sausages. *Journal of Food Engineering*, 230, 39–48.

236. Bredikhin V., Shevchenko V. K matematicheskojj modeli razdelenija zernovykh smesejj po plotnosti cilindricheskimi rabochimi poverkhnostjami. *MOTROL* Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. 2015. T. 17. № 7. P. 39 – 44.

237. Bredykhin Vadym, Gurskyi Petro, Alfyorov Oleksiy, Bredykhina Khrystyna, Pak Andrey. Improving the mechanical-mathematical model of grain mass separation in a fluidized bed. *European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. T. 3 № 1. P. 79 – 86. ***(Scopus)*** *(the author's contribution consists in modeling the process of SM segregation by seed density).*

238. Bredykhin Vadim, Pak Andrey, Gurskyi Petro, Denisenko Sergey, Bredykhina Khrystyna. Improving the mechanical mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. Improving the Mechanical Mathematical Model of Pneumatic Vibration Centrifugal Fractionation of Grain Materials Based on Their Density. *European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. T. 4/1. № 112. P. 54 – 61. ***(Scopus)*** *(the author's contribution consists in modeling the process of SM segregation by seed density).*

239. Vadym Bredykhin, Stanislav Tikunov, Maksim Slipchenko, Oleksiy Aifyorov, Alexey Bogomolov, Taras Shchur, Slawomir Kocira, Piotr Kiczorowski, Rostyslav Paslavskyy (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering.

2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018

240. Bhargava A., Shukla S., Ohri D., Chenopodium quinoa—an Indian perspective[J], *Ind. Crop. Prod.* 23 (1) (2006) P. 73–87, https://doi.org/10.1016/j. indcrop.2005.04.002.

241. V. Bulgakov, S. Nicolaenko, I. Holovach, V. Adamchuk, S. Kiurchev, S. Ivanovs and J. Olt., Theory of grain mixture particle motion during aspiration separation. Agronomy Research 18(1), (2020) P. 18–37, https://doi.org/10.15159/AR.20.057

242. Cao Y., Zou L., Li W., Song Y., Zhao G., Hu Y., Dietary quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) polysaccharides ameliorate high-fat diet-induced hyperlipidemia and modulate gut microbiota [J], *Int. J. Biol. Macromol.*163(2020) 55 – 65.

243. Chakraborty P., Singh S.D., Gorai I., Singh D., Rahman W.-U., Halder G., 2020. Explication of physically and chemically treated date stone biochar for sorptive remotion of ibuprofen from aqueous solution. J. *Water Process. Eng*. 33, 101022. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101022.

244. Cheng N., Wang B., Wu P., Lee X., Xing Y., Chen M., Gao B., 2021. Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: a review. *Environ. Pollut.* 273, 116448. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116448.

245. Clark B. Cleaning seeds by fluidized bed medium. *Transac-tions of the ASAE.* 1983. Vol. 26. N 4. P. 987 – 990.

246. Clark B. Cleaning seeds by fluidized. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 1985. Vol. 31. N 3. P. 231 – 242.

247. Day P.R., Black C.A., 1965. Particle fraction and particle-size analysis. *Methods of soil analysis. Part I. Agronomy* (ASA, Madison, WI) 9, 545–567.

248. Dasgupta P., Stiglitz J. Industrial Structure and the Nature of Innovative Activity // Economic Journal. 1980. № 90.

249. Donald A. Hay, Derek J. Morris, Industrial Economics and Organization: Theory and Evidence 2nd Edition. Oxford University Press. 1991. p. 704.

250. Dursun I. G. Determination of projected area of some grain products by using image processing. *Journal of Agriculture Science,* 7(3), 2001. 102–107.

251. Dutta S. K., Nema V. K., & Bhardwaj R. J. Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research,* 39, 1988. 259–268.

252. Dziki, D., Laskowski, J., 2010. Study to analyze the influence of sprouting of thewheat grain on the grinding process. *Journal of Food Engineering* 96 (4), 562–567.

253. https://ukragroimport.com.ua/ua/nasinnyevi-kulturi (date of application 26.03. 2023).

254. https://consumerhm.gov.ua/2295-nasinnevi-posivi-kultur-z-perekhresnim-tipom-zapilennya (date of application 26.03.2023).

255. https://agrotimes.ua/article/nasinnevi-posivi/ (date of application 01.04.2023).

256. https://myronivka-mrada.gov.ua/news/1644407620/ (date of application 07.04.2023).

257. https://www.rivneprod.gov.ua/2019/06/13/doglyad-za-nasinnytskymy-posivamy-zernovyh-kultur-v-litnij-period/ (date of application 07.04.2023).

258. Elizabeth Clayton Ukrainian Agriculture / The Ukrainian Economy Achievements, Problems, Challenges. – Cambridge, Massachusetts. – 1992. P. 235 – 250.

259. Emami S., Tabil, L.G., Tyler R.T., Crerar W.J., 2007. Starch–protein separation from chickpea flour using a hydrocyclone. *Journal of Food Engineering* 82 (4), 460 – 465.

260. Freeman C., Louçã F. As time goes by: from the industrial revolutions to the information revolution. – Oxford University Press, 2001.

261. Hunt S.D. A General Theory of Competition. London, 2000. P. 640.

262. Irawan C., Yuniar S., Khotimah H., Nata I.F., Putra M.D., 2020. High adsorption capacity of activated carbon from rubber seed shells on tofu (Soybean Whey) Wastewater. IOP Conf. Ser. *Earth Environ. Sci.* 499, 012009 https://doi.org/10.1088/1755-1315/499/1/012009 .

263. Issa J.P.M., Defino H.L.A., Netto J.C., Volpon J.B., Regalo S.C.H., Iyomasa M.M., Si´essere, S., Tiossi, R., 2010. Evaluation of rhbmp-2 and natural latex as potential osteogenic proteins in critical-size defects by histomorphometric methods. *Anat. Rec.* 293, 794–801. https://doi.org/10.1002/ar.21097 .

264. Jacob C.K., Srinivas P., Prem E.E., Manju M.J., Mushrif S.K., Idicula S.P., 2007.Rubber seed oil for partial substitution of mineral oil used as carrier for copper fungicide in the management of abnormal leaf fall disease of rubber. *J. Rubber Res*. 10, 54–61.

265. Jiang J.-S., Wang R.-S., 2003. Hydrological eco-service of rubber plantations in Hainan Island and its effect on local economic development. *J. Environ. Sci. China* 15 (5), 701–709.

266. Johnston P.R., Swanson A. Correlation between the results of different instruments used to determine the particle size distribution in AC fine test dust. *Powder Technology* 32 (1), 1982. 119–124.

267. Joseph R., Madhusoodhanan K.N., Alex R., Varghese S., George K.E., Kuriakose B., 2004. Studies on epoxidised rubber seed oil as secondary plasticiser/stabiliser for polyvinyl chloride. *Plast. Rubber Compos.* 33, 217–222.

268. Kadan, R.S., Freeman, D.W., Ziegler, G.M., Spadero, J.J. Protein displacement during classification of glanded cottonseed. *Journal of Food Science* 45, 1980. 1566–1569.

269. Komariyah S., Suprayudi M.A., Jusadi D., 2014. Preliminary study of rubber seed Hevea brasiliensis oil utilization for tilapia diet. *J. Akuakultur. Indones.* 13 (1), 61–67. https://doi.org/10.19027/jai.13.61-67 .

270. Law-Ogbomo K.E., Enobakhare D.A., 2006. Efficacy of rubber seed oil, palm oil and palm kernel oil as grain protectants against Sitophilus zeamais (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae) in three maize varieties. *J. Entomol.* 3 (1), 40–47. https://doi.org/10.3923/je.2006.40.47.

271. Lee S.W., Wendy W., 2017. Malaysian rubber (Hevea brasiliensis) seed as alternative protein source for red hybrid tilapia, Oreochromis sp., farming. Aquac. *Aquar. Conserv. Legis.* 10 (1), 32–37.

272. Lourith N., Kanlayavattanakul M., Sucontphunt A., Ondee T., 2014. Para rubber seed oil: new promising unconventional oil for cosmetics. *J. Oleo Sci.* 63 (7), 709–716.https://doi.org/10.5650/jos.ess14015.

273. Lu Q., Chen, P., Chai Y., Li Q., Mao H., Effects of dietary rubber seed oil on production performance, egg quality and yolk fatty acid composition of Hy-Line Brown layers. *Anim. Biosci.* 34 (1), 2021. 119. https://doi.org/10.5713/ajas.19.0832 .

274. Mahdi Z., Yu Q.J., El Hanandeh A. Investigation of the kinetics and mechanisms of nickel and copper ions adsorption from aqueous solutions by date seed derived biochar. *J. Environ. Chem. Eng*. 6 (1), 2018. 1171–1181.

275. Mendonça R.J., Maurício V.B., de Bortolli Teixeira L., Lachat J.J., Coutinho-Netto, J. Increased vascular permeability, angiogenesis and wound healing induced by the serum of natural latex of the rubber tree Hevea brasiliensis. Phytother. Res. Int. J.Devoted Pharmacol. Toxicol. Eval. *Nat. Prod. Deriv.* 24 (5), 2010. 764–768. https://doi.org/10.1002/ptr.3043 .

276. Mishra R.K., Mohanty K. Characterization of non-edible lignocellulosic biomass in terms of their candidacy towards alternative renewable fuels. *Biomass Convers. Bior.* 8 (4), 2018. 799–812.

277. Mishra R.K., Mohanty K., 2019. Thermal and catalytic pyrolysis of pine sawdust (Pinus ponderosa) and Gulmohar seed (Delonix regia) towards production of fuel and chemicals. *Mater. Sci. Energy Technol.* 2 (2), P. 139–149.

278. Mohd Azani N.F.S., Hui Chuin, C.T., Abdullah N.S., Sharifuddin S.S., Hussin, M.H., 2019. Characterisation and kinetic studies on activated carbon derived from rubber seed shell for the removal of methylene blue in aqueous solutions. *J. Phys. Sci.* 30, 1–20. https://doi.org/10.21315/jps2019.30.2.1.

279. Mohanty P., Nanda S., Pant K.K., Naik S., Kozinski J.A., Dalai A.K., 2013. Evaluation of the physiochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood: effects of heating rate. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 104, P. 485 – 493.

280. Mridul Das, Liurembam Monica Devi, Lexmikant S. Badwaik. Ultrasound-assisted extraction of pumpkin seeds protein and its physicochemical and functional characterization. *Department of Food Engineering Technology, Tezpur University, Napaam, Assam*. India. 2022. P. 27 – 34.

281. Munawaroh E., Purwanto Y., 2009. Studi hasil hutan non kayu di kabupaten malinau, kalimantan timur. *In: Proceedings of the 6th Basic Science National Seminar, Universitas Brawijaya,* Indonesia. P. 433–438.

282. Nadarajah R.Y., Mohammad R., Mohamad M., Moubarak A., El-Saady G., Ibrahim E.-N.A., Hussein Z.M., Khalil W.I., Ahmed H.K., Sibak H.A., 2006. Rubber seed shells (Hevea brasiliensis): an adsorbent used for the removal of Rhodamine B dye. *J. Zool.* 44, P/ 469 – 480.

283. Ogunjimi L. A. O., Aviara N. A., & Aregbesola O. A. Some engineering properties of locust bean seed. Journal of Food Engineering, 55, 2002. P. 95–99.

284. Olajide J. O., & Omowaje B. I. O. Some physical properties of locust bean seed. *Journal of Agricultural Engineering Research,* 74, 1999. P. 213–215.

285. Olajide J. O., & Igbeka J. C. Some physical properties of groundnut kernels. *Journal of Food Engineering,* 58, 2003. P. 201–204.

286. Peretsevoy F., Gurskyi P., ladyka V., Ianchyk M., Krapivnytska I., Omelchenko S., Bredykhin V., Kis V., Marenkova T., Garncarec Z. Food technology using structurants: The monograph. Sumy-Kharkiv-Kyiv-Wroclaw, 2021. 250 p.

287. Pinton M. B., dos Santos B. A., Lorenzo J. M., Cichoski A. J., Boeira C. P., & Campagnol P. C. B. (2021). Green technologies as a strategy to reduce NaCl and phosphate in meat products: An overview. *Current Opinion in Food Science,* 40, P. 1 – 5.

288. Pinton M. B., Correa L. P., Facchi M.X., Heck R. T., Le˜aes, Y. S. V., Cichoski A. J., Campagnol P. C. B. (2019). Ultrasound: A new approach to reduce phosphate content of meat emulsions. *Meat Science,* 152, P. 88–95.

289. Rahabi-Layachi H., Six I., & Kamel S. (2015). How can phosphate excess turn out to be as dangerous as cholesterol excess on cardiovasular system. *Revue Francophone des Laboratoires,* 476, P. 27 – 34.

290. Resconi V. C., Keenan D. F., García E., Allen P., Kerry J. P., & Hamill R. M. (2016). The effects of potato and rice starch as substitutes for phosphate in and degree of comminution on the technological, instrumental and sensory characteristics of restructured ham. *Meat Science,* 121, P. 127–134.

291. Russo R., & Reggiani R. (2015). Evaluation of protein concentration, amino acid profile and antinutritional compounds in hempseed meal from dioecious and monoecious varieties. *American Journal of Plant Sciences,* 6, P. 14–22.

292. Roz M., Rinaudo C., Rossanigo P., Polati S., Gennaro M.C. Gravitational grain size separation of contaminated ground: potential and limits. *Applied Clay Science* 31, 2006. P. 85–89.

293. Sanjeewaa T. W. G., Wanasundarab J. P. D., Pietrasika Z., & Shand P. J. (2010). Characterization of chickpea (Cicer arietinum L.) flours and application in low-fat pork bologna as a model system. *Food Research International,* 43, P. 617 – 626.

294. Salemi E., Tessari U., Mastrocicco N.C.M. Improved gravitational grain size separation method. *Applied Clay Science* 48 (4), 2010. P. 612 – 614.

295. Schiller Bradley R. Essentials of economics.– McGRAW-HILL, INC. 1993. 126 p.

296. Slipchenko Maksym, Bredykhin Vadym, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Alfyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425 (***Scopus***) (*the author's contribution consists in the study of non-stationary oscillations of oscillators under the action of long and short-term pulses*).

297. Slipchenko M., Bredykhin V., Pak A., Gurskyi P., Alfyorov O., Pak A. (2023). Constructing f physical-mathematical model of grain mass self-heating by a rod site of rectangular cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/8 №125, P. 24 – 30. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287391 (***Scopus***) (*the author's contribution consists in the development of a mathematical model for the separation of seed materials*).

298. Tishchenko L.N., Piven M.V., Bredykhin V.V. The study of the inner-layer motion of the grain mixtures. *Journal of Kharkov National Technical University named after P. Vasylenko.* 2014. T. 152. P. 5 – 11.

299. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2016. T. 2. № 2. P. 63 – 69. ***(Scopus)*** *(the author's contribution consists in substantiating the optimal parameters of the separation process with cylindrical working surfaces).*

300. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. https://www.usda.gov/ (date of application 01.05. 2023).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Додаток А1

ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИЙ СТІЛ ПСС (згідно Паспорту Хорольського механічного заводу)

Пневмосепарувальний стіл марки ПСС (далі - пневмостіл) призначений для поділу сипучих матеріалів, що мають однакові розміри частинок, але різну питому вагу.

Пневмосепарувальний стіл марки ПСС виготовляється за 3-ю категорією ГОСТ 15150 в кліматичному виконанні «У» для внутрішнього ринку та експорту в країни з помірним кліматом. При цьому стіл повинен працювати в робочих режимах при температурі від мінус 10 до плюс 40 °С, відносній вологості 80% при середньорічній температурі плюс 15°С, атмосферному тиску від 650 до 800 мм. рт. ст.(86,6÷106,7 кПа).

Технічні характеристики.

Найменування показника	Значення
Продуктивність (номінальна), кг/годину	
пшениця	3500
кукурудза	3000
гречка	2500
Частота коливань столу, $с^{-1}$ (кол/хв)	15,6 (940)
Амплітуда коливань столу, мм	5-6
Кут нахилу деки (столу), градус	
повздовжній	0-8
поперечний	0-8
Ступінь відділення домішок, %	75…90
Необхідна витрата повітря, $м^3$ /хв ($м^3$ /год), не більше	140 (8400)
Встановлена потужність, кВт	0,74
Габаритні розміри, мм:	
довжина	2020
ширина	1850
висота	2010
Маса, кг, не більше	540

Будова і робота

Пневмостіл складається з таких основних вузлів: станини, кузова, аспіраційної камери, каменевідбірника, деки з металевою сіткою, живильника, регулювальних клапанів. До живильника кріпиться завантажувальний патрубок. До станини прикріплений повітряний клапан з механізмом регулювання витрат повітря, вивантажувальні патрубки, ємність для збору каменів. Стіл і станина пов'язані через механізми регулювання поздовжнього і поперечного нахилу, дозволяють змінювати кут нахилу столу, і деки відповідно, в межах від 0 до 8 градусів в двох площинах. Машина працює за наступною технологічною схемою:

Продукт, що надходить у машину через завантажувальний патрубок, розподіляється по похилій площині деки 6 спеціальним клапаном, який виключає пропускання повітря в машину через завантажувальну трубу. Дека, здійснює поздовжній коливальний рух разом зі столом, обшита металевою сіткою, яка охолоджується повітряним потоком вгору. Рівномірність повітряного потоку забезпечує передбачений для цієї мети розподільчий пристрій. Сортування продукту є результатом вібрації робочої площини, відсмоктування повітря через патрубок з дросельним клапаном і подвійного (поздовжнього і поперечного) нахилу.

Оброблюване в машині насіння розшаровується наступним чином: важкий продукт залишається на сітці деки і, під дією поздовжніх коливань проходить до виходу через патрубок. Легкі частинки спливають під дією повітря і рухаються до бічних сторонах деки, завдяки її поперечному нахилу і розвантажуються через бічні патрубки. Каміння рухається в протилежному напрямку деки, у бік горизонтального клапана з регульованим отвором. Горизонтальний клапан дозволяє створювати протитічну циркуляцію повітря регульованої швидкості. Завдяки цій циркуляції відбувається повне відділення зернового продукту від каменів, які розвантажуються в розташовану нижче

ємність. Повітря, що використовується в процесі розшаровування, містить пил і легкі фракції продукту піддається очищенню в циклоні або фільтрі.

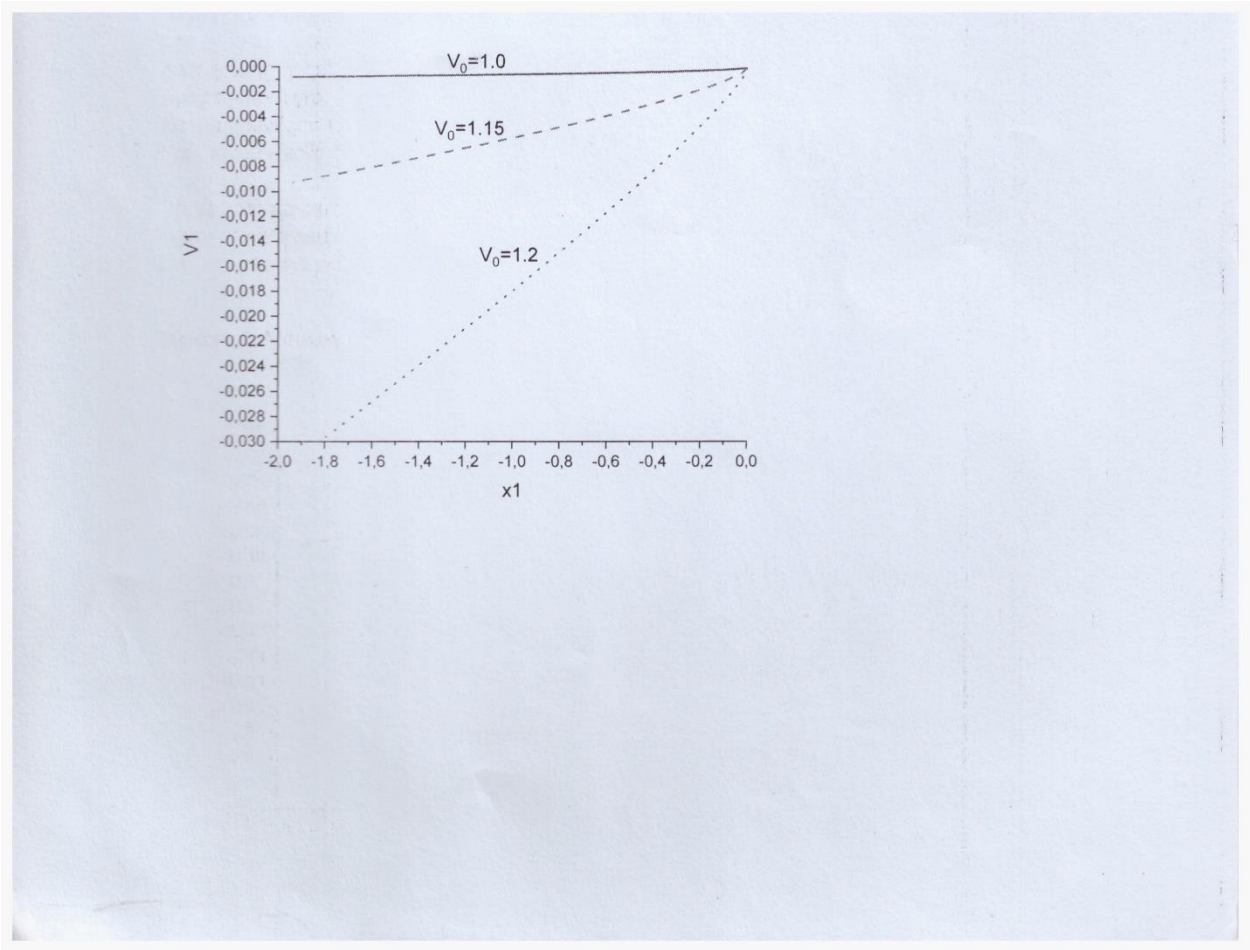
Рис. 1. Загальний вид ПСС (https://mehzavod.com.ua/ua/catalog/mashiny-sortirovochnye/pss/)

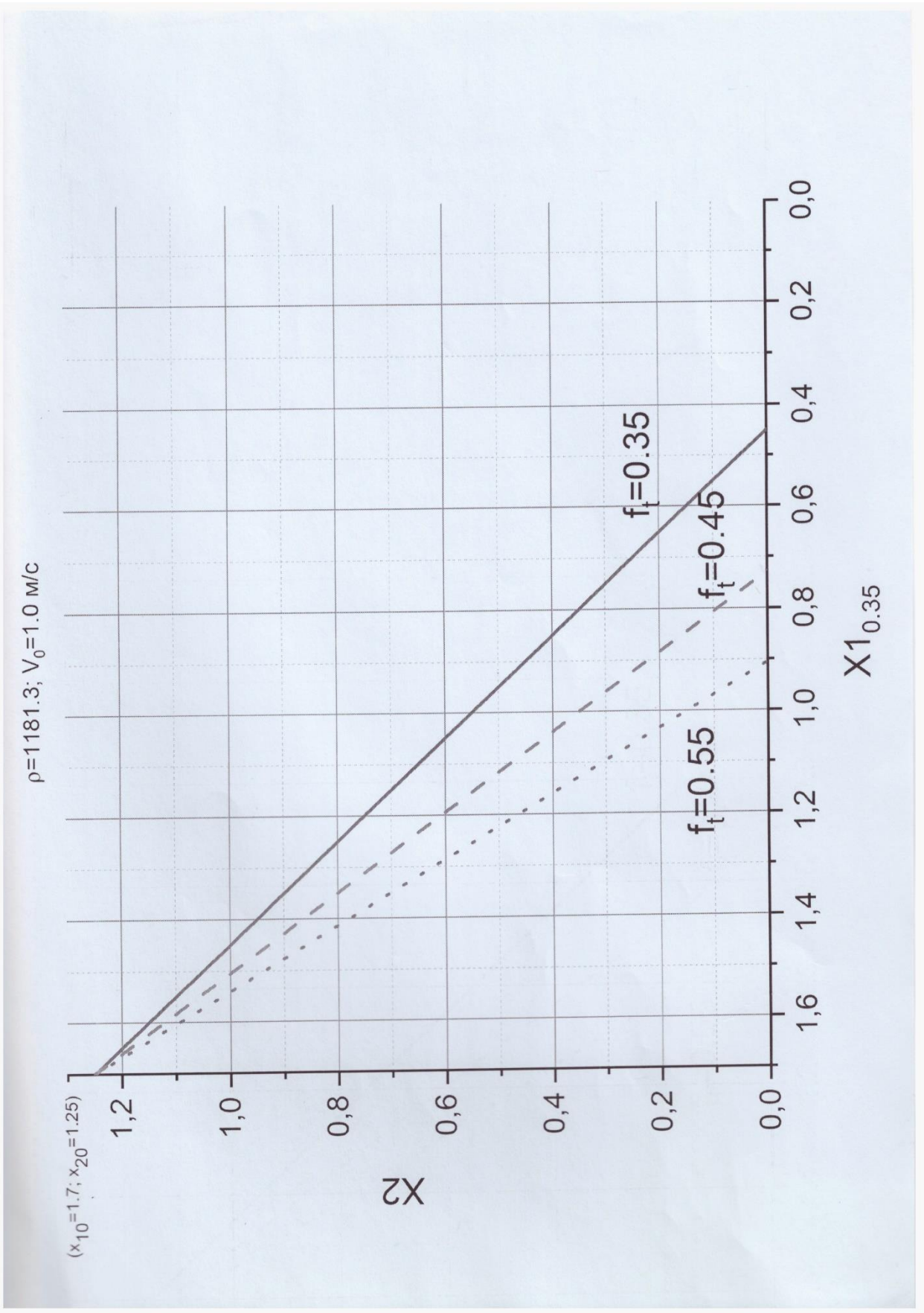
Виробництва ТОВ «Хорольський

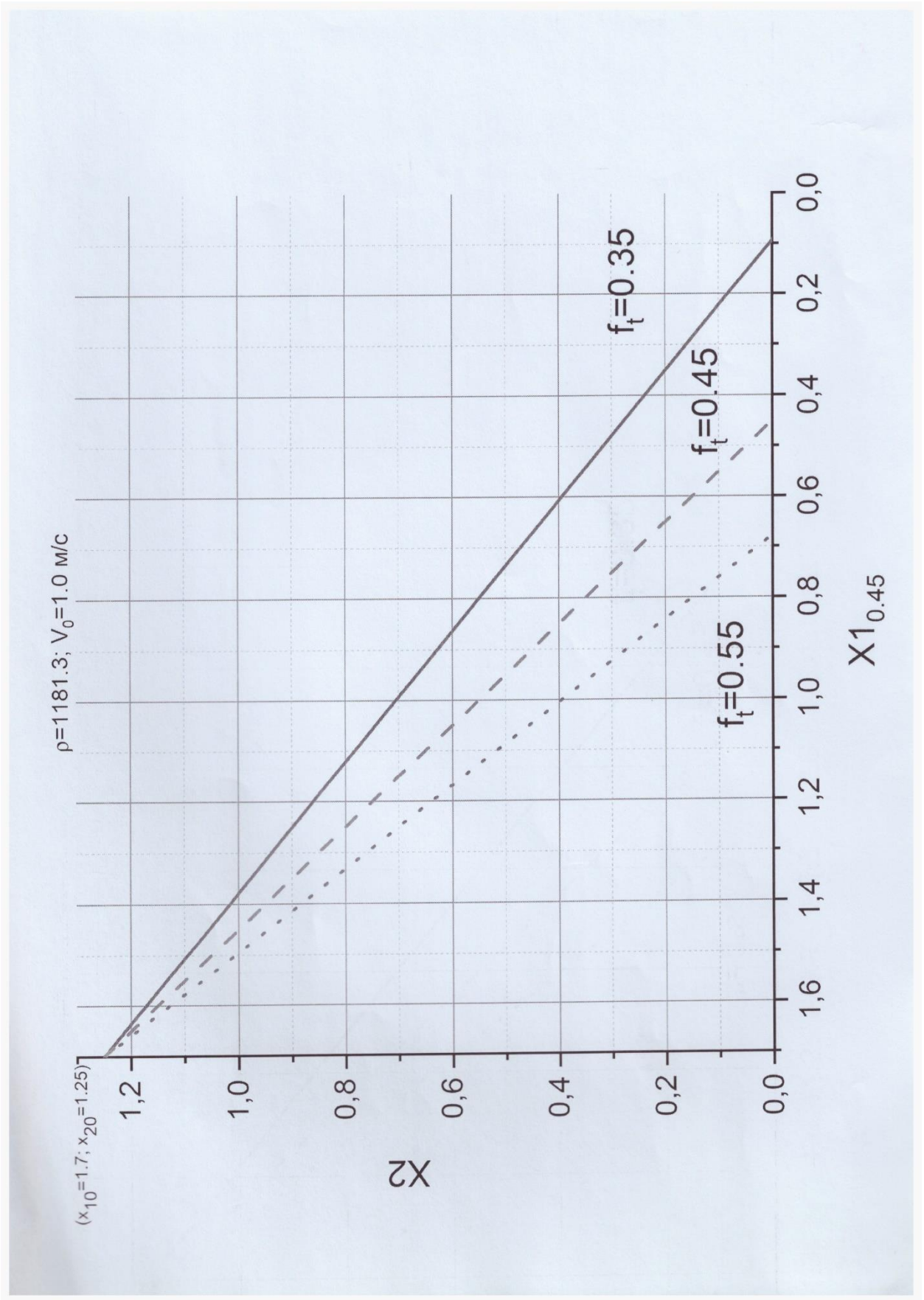
ДОДАТОК Б
ДО РОЗРАХУНКУ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ

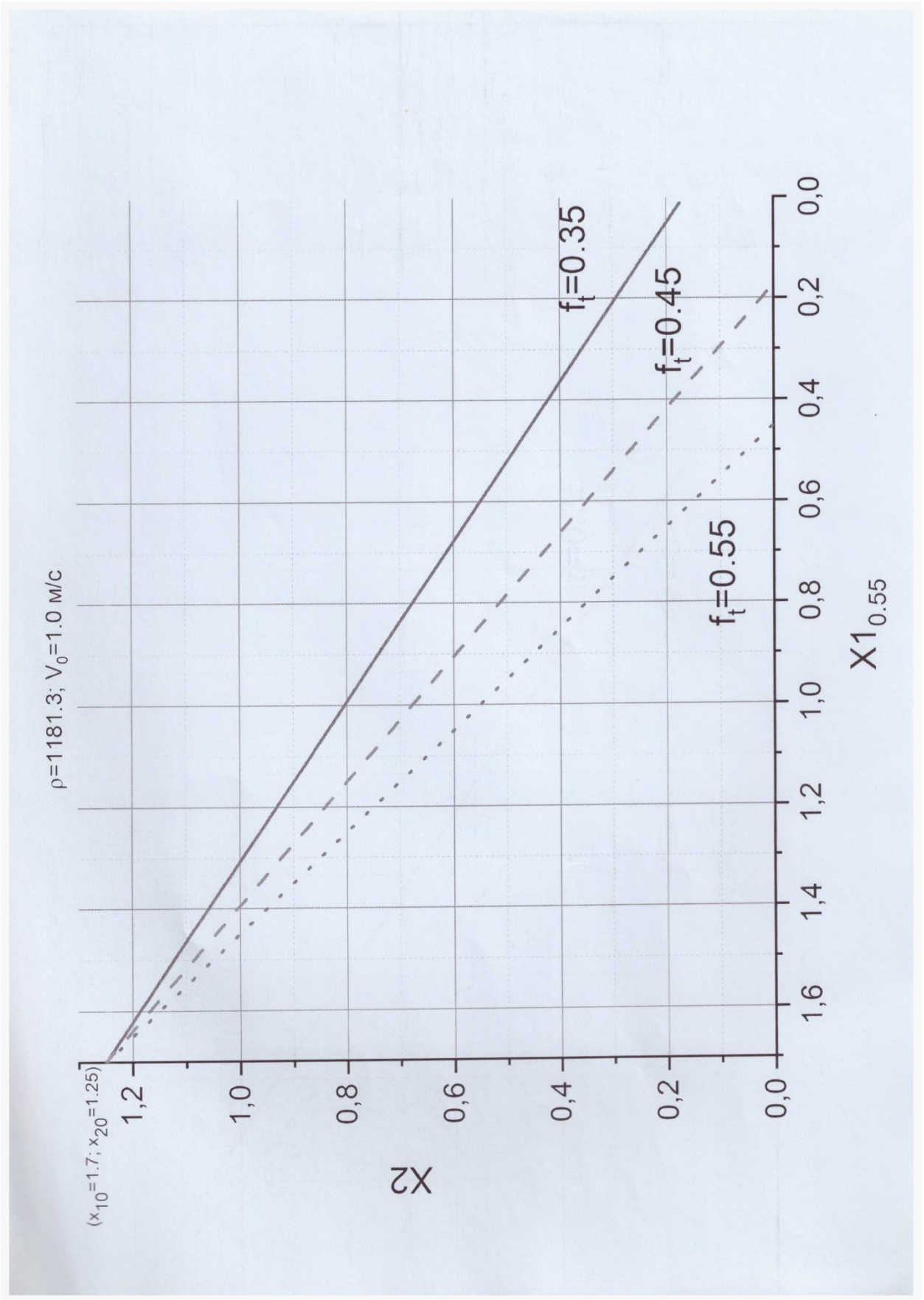
Додаток Б1

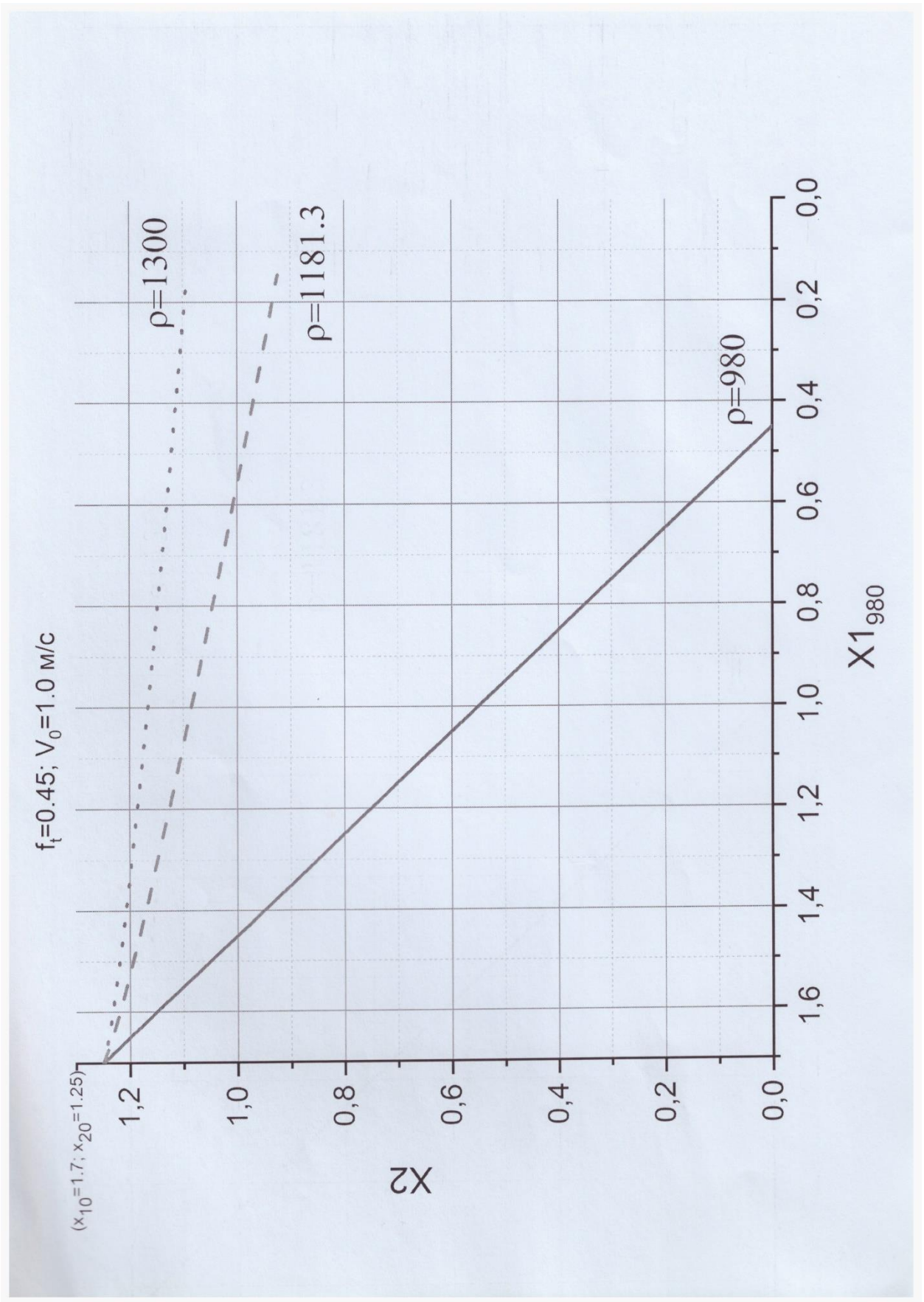
До траєкторії руху НМ по робочій поверхні ПСС

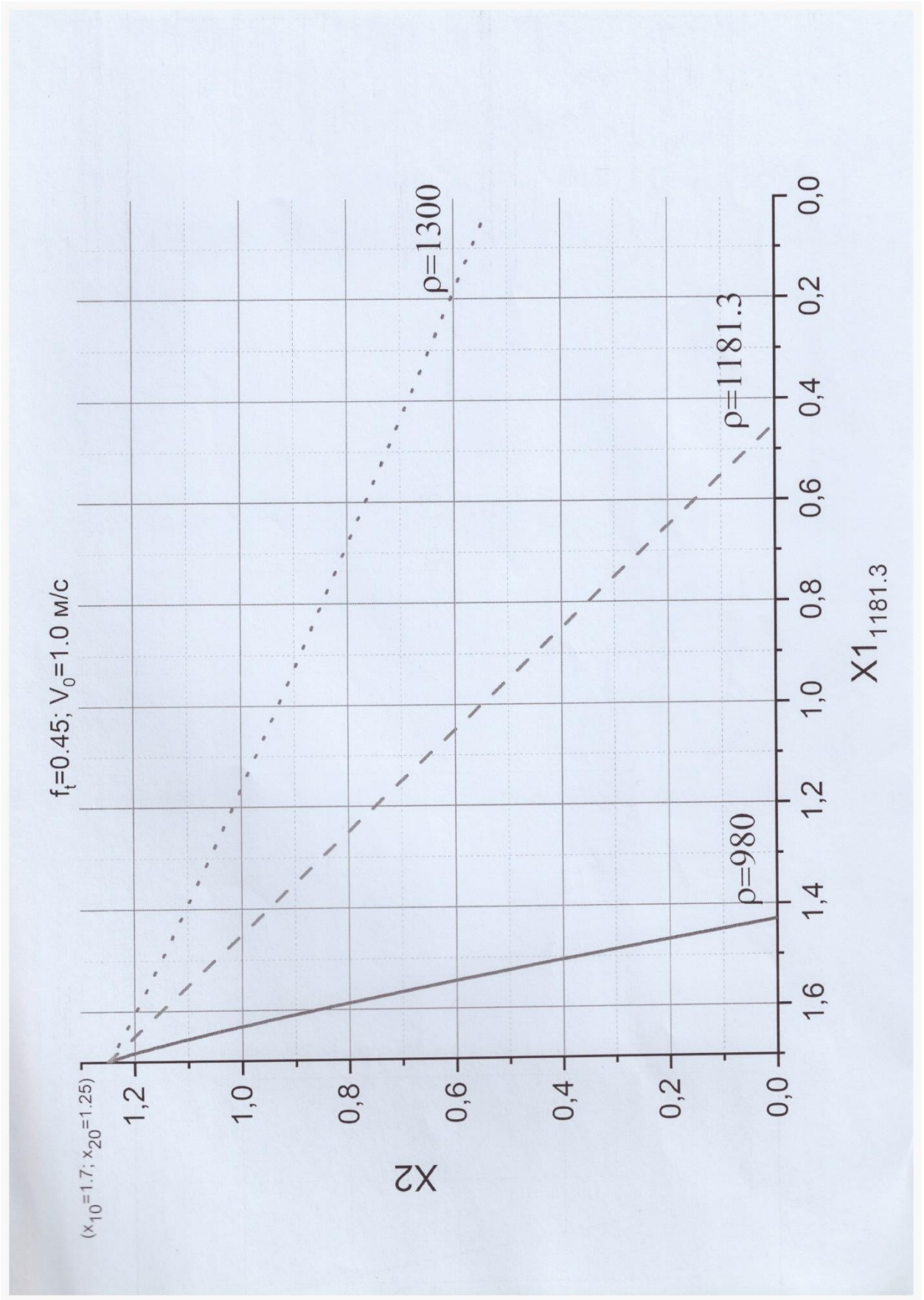


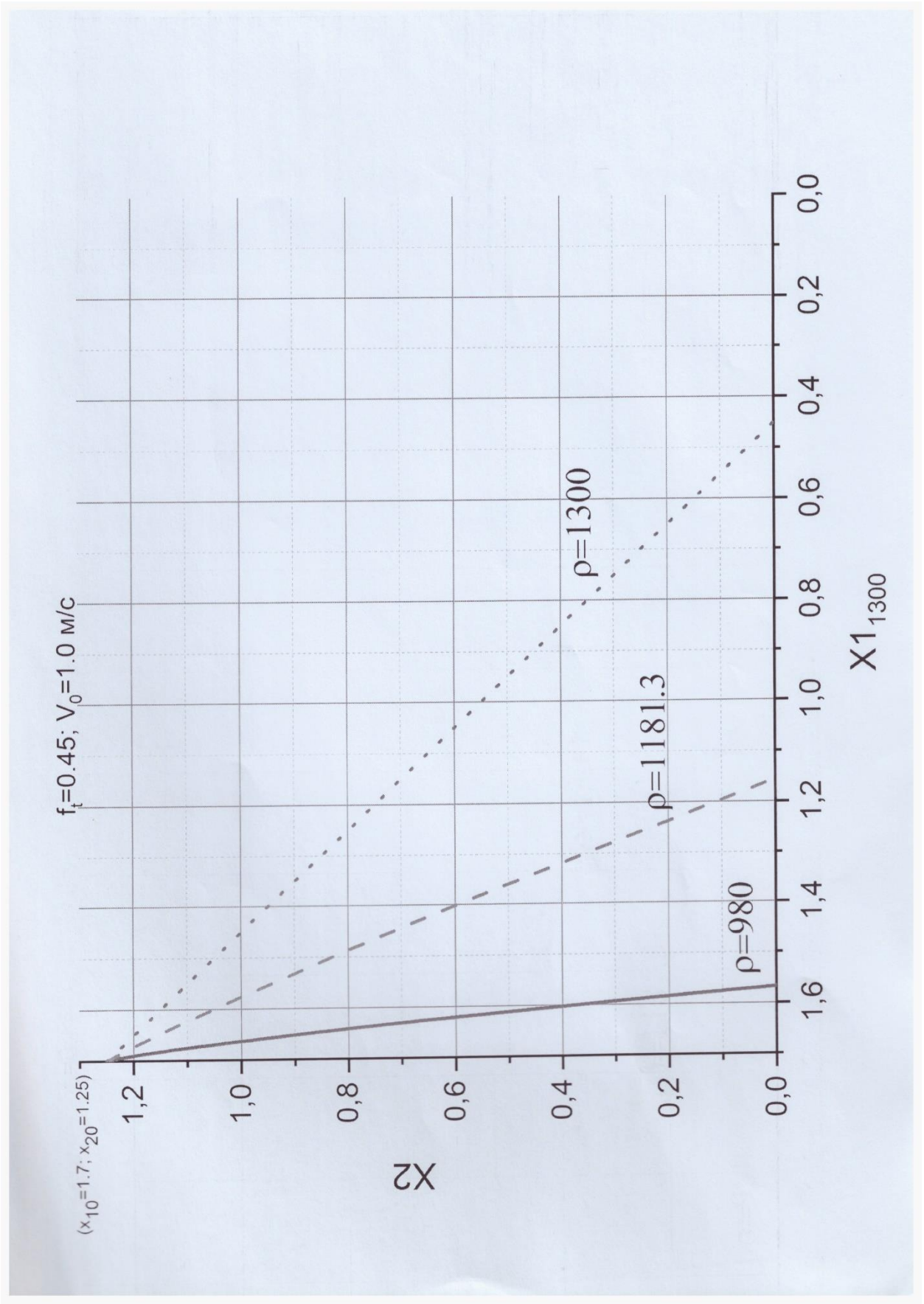

ρ=1181.3; V0=1.0 м/с
(x10=1.7; x20=1.25)
X2
X1 0.35
ft=0.35
ft=0.45
ft=0.55
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0

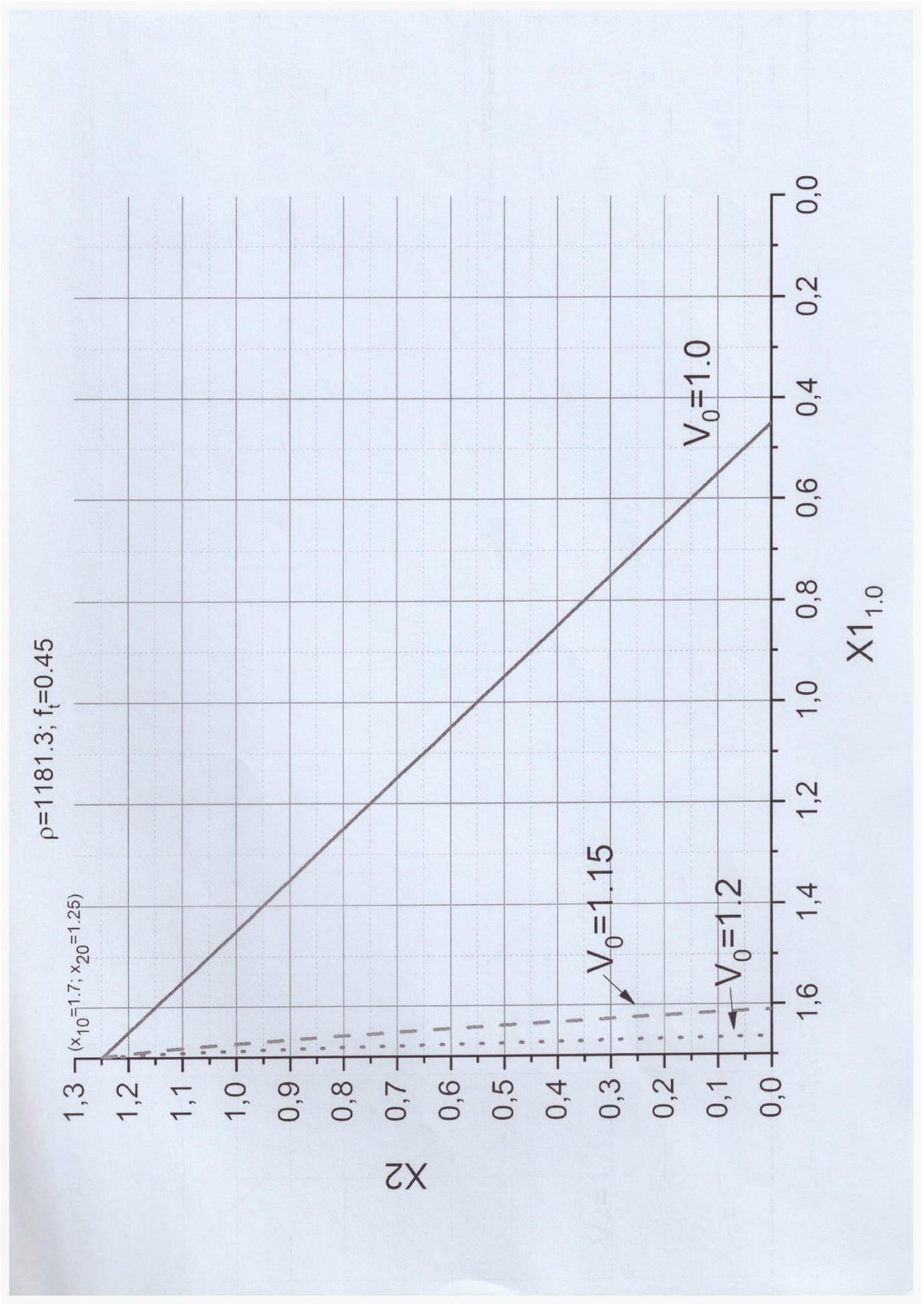

ρ=1181.3; V0=1.0 м/с
(x10=1.7; x20=1.25)
X2
X1 0.45
ft=0.35
ft=0.45
ft=0.55
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0

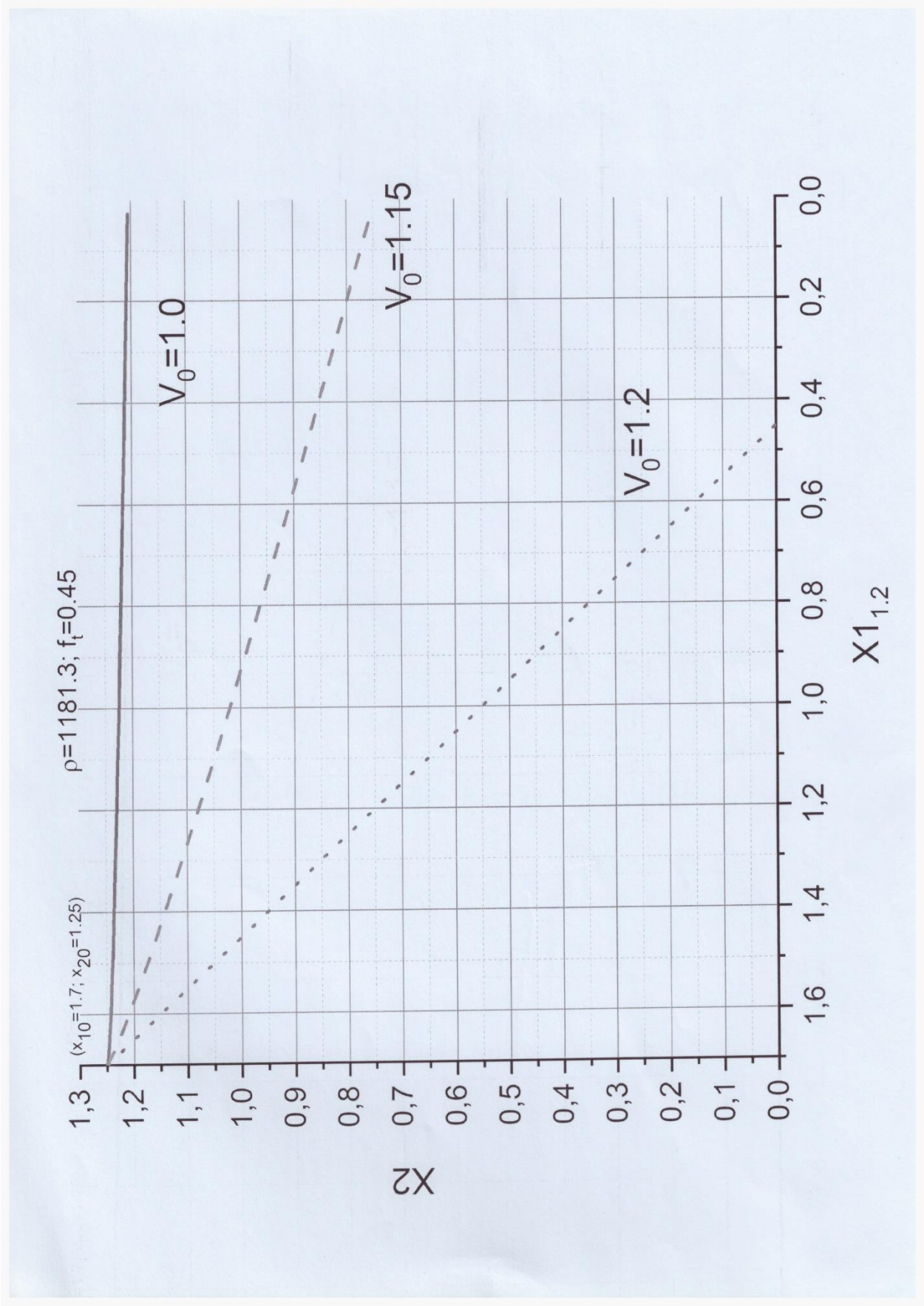

ρ=1181.3; V0=1.0 м/с
(x10=1.7; x20=1.25)
X2
X1 0.55
ft=0.35
ft=0.45
ft=0.55
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6

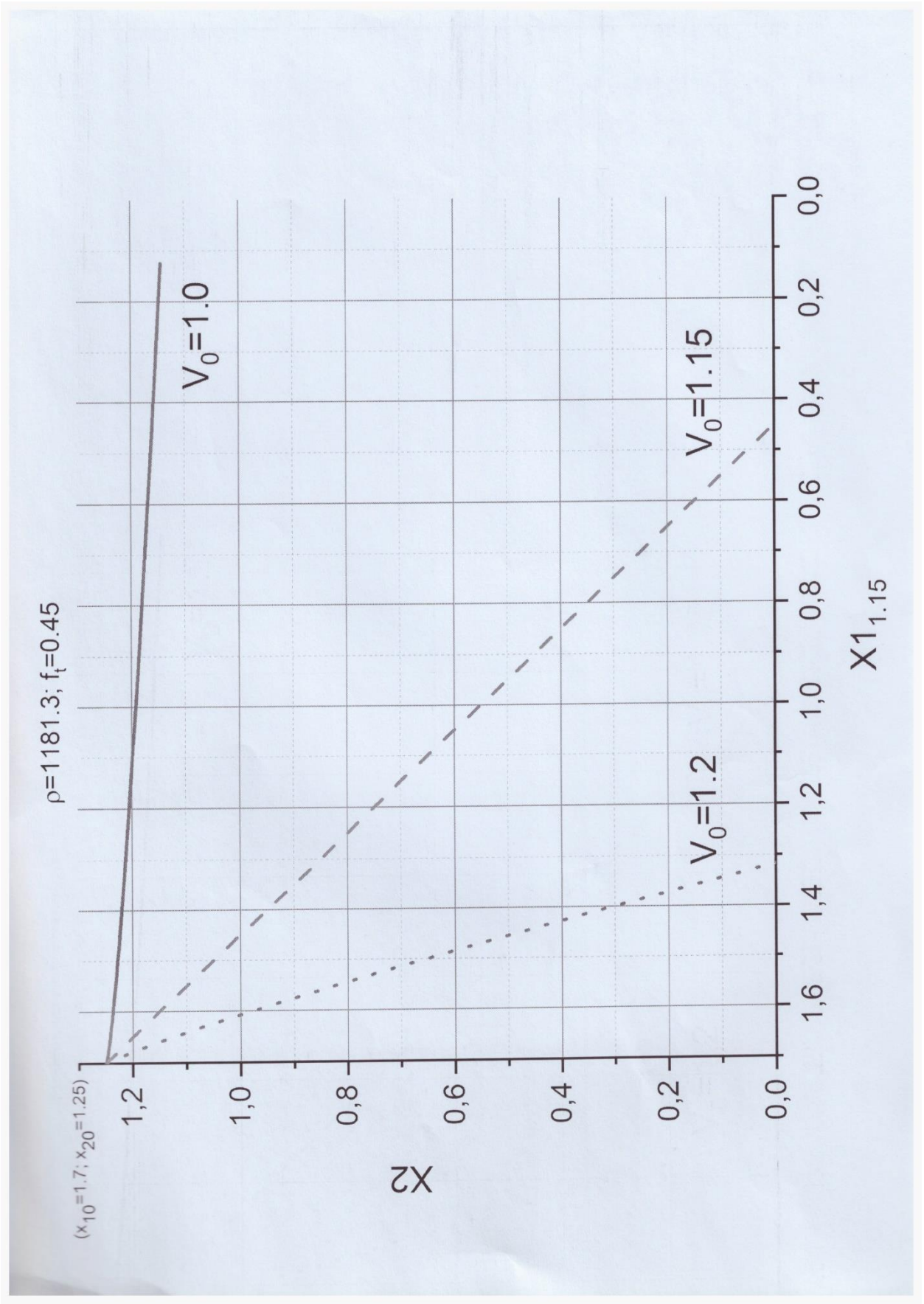

f_t=0.45; V_0=1.0 м/с
(x_{10}=1.7; x_{20}=1.25)
ρ=1300
ρ=1181.3
ρ=980
X2
$X1_{980}$
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0

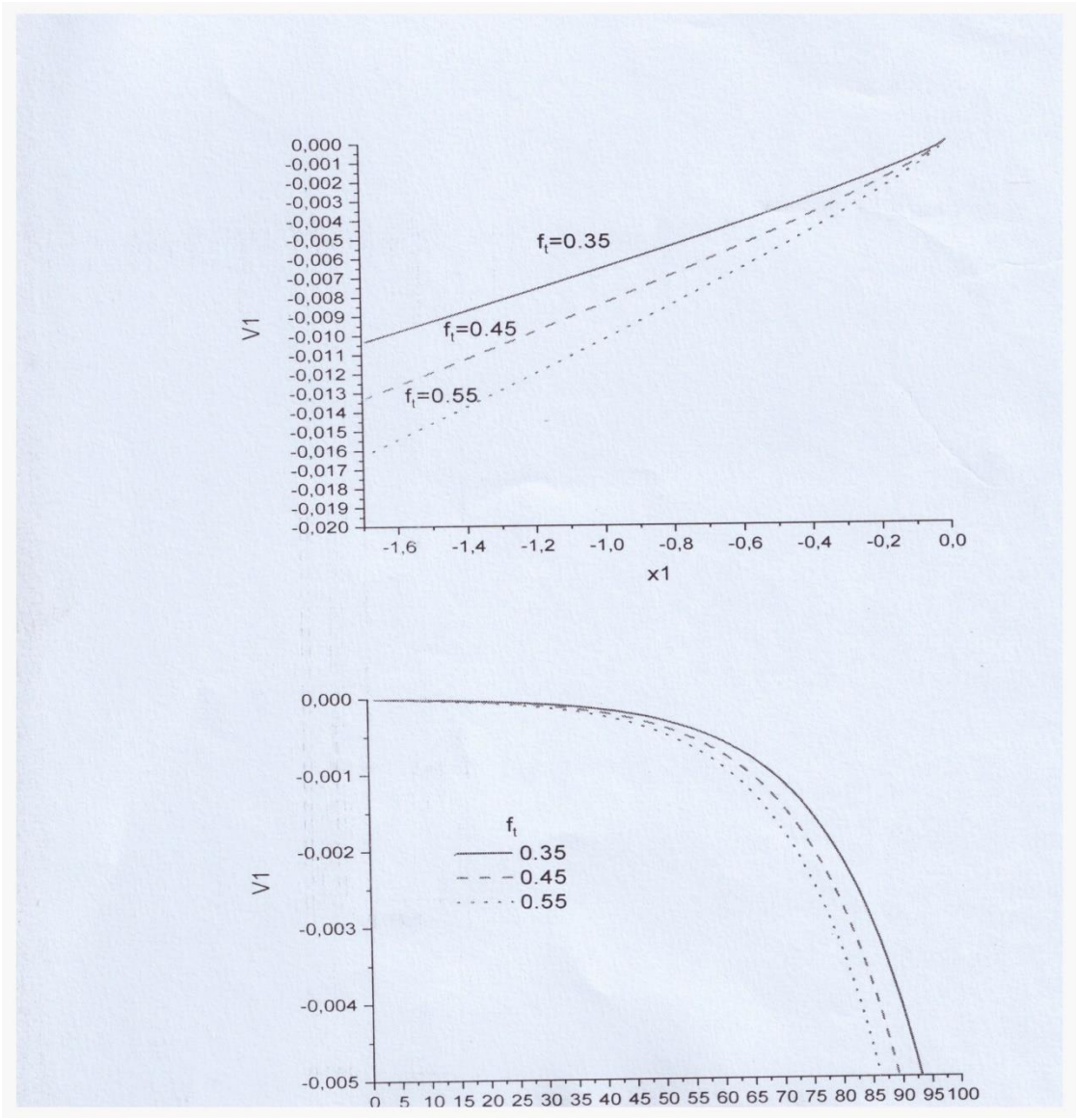

f_t=0.45; V_0=1.0 м/с
(x_{10}=1.7; x_{20}=1.25)
X2
X1
1181.3
ρ=980
ρ=1181.3
ρ=1300
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0

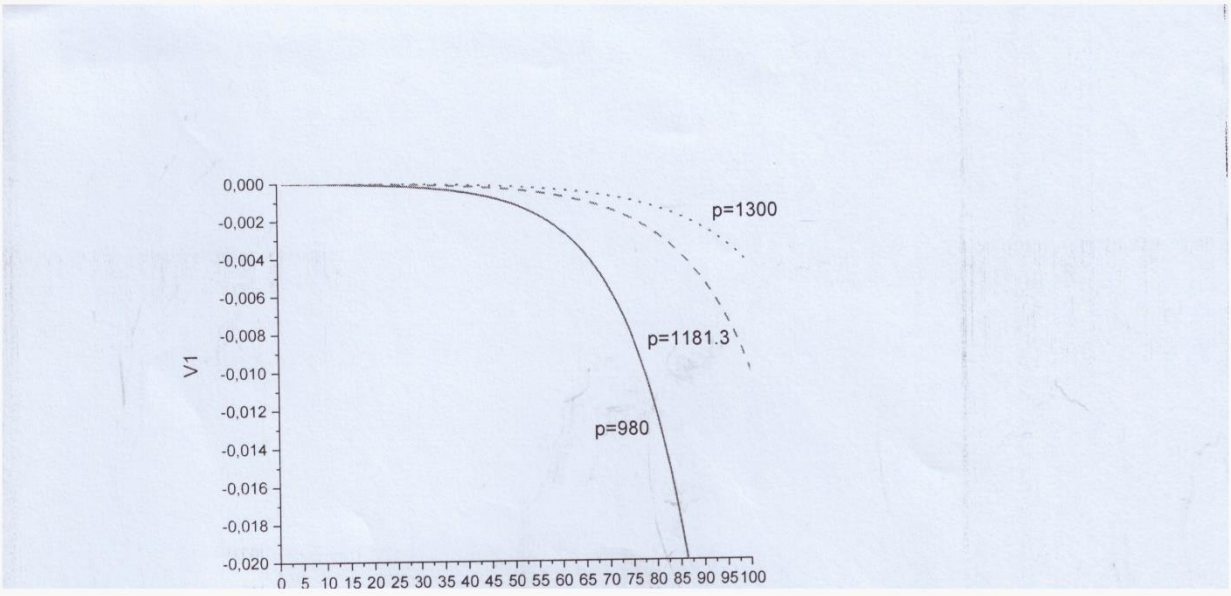

f_t=0.45; V_0=1.0 м/с
(x_{10}=1.7; x_{20}=1.25)
X2
$X1_{1300}$
ρ=980
ρ=1181.3
ρ=1300
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0


ρ=1181.3; f_t=0.45
(x_{10}=1.7; x_{20}=1.25)
V_0=1.0
V_0=1.15
V_0=1.2
X2
$X1_{1.0}$
1,3
1,2
1,1
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0

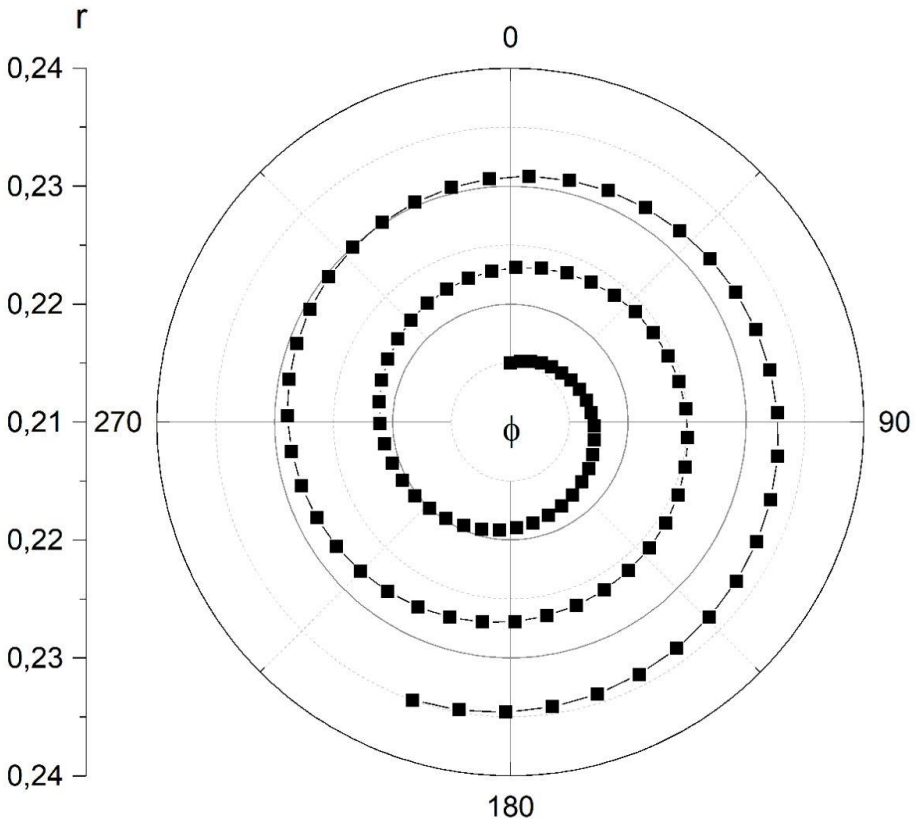

ρ=1181.3; f_t=0.45
(x_10=1.7; x_20=1.25)
V_0=1.0
V_0=1.15
V_0=1.2
X2
X1_1.2
1,3
1,2
1,1
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0


ρ=1181.3; f_t=0.45
(x_10=1.7; x_20=1.25)
V_0=1.0
V_0=1.15
V_0=1.2
X2
X1_1.15
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0


0,000
-0,001
-0,002
-0,003
-0,004
-0,005
-0,006
-0,007
-0,008
-0,009
-0,010
-0,011
-0,012
-0,013
-0,014
-0,015
-0,016
-0,017
-0,018
-0,019
-0,020
V1
f_t=0.35
f_t=0.45
f_t=0.55
-1,6 -1,4 -1,2 -1,0 -0,8 -0,6 -0,4 -0,2 0,0
x1
0,000
-0,001
-0,002
-0,003
-0,004
-0,005
V1
f_t
0.35
0.45
0.55
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100


0,000
-0,002
-0,004
-0,006
-0,008
-0,010
-0,012
-0,014
-0,016
-0,018
-0,020
V1
p=1300
p=1181.3
p=980
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100

Додаток Б2



ДОДАТОК В

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На початку експерименту було визначено рівні варіювання факторів, що мають визначальний вплив на процес розділення НМ за густиною насіння (Розділ 4 та 5).

Таблиця В 1

№ точки плану	Рандомізація досліду		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Результати експериментів		
												y_1	y_2	y_3
1	64	14	+	+	0	+	0	0	+	+	0	0,72	0,75	0,76
2	40	9	-	-	0	+	0	0	+	+	0	0,79	0,78	0,75
3	90	15	+	-	0	-	0	0	+	+	0	0,71	0,79	0,78
4	40	10	-	+	0	-	0	0	+	+	0	0,72	0,70	0,73
5	20	3	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0,56	0,57	0,53
6	26	5	-	0	-	0	+	0	+	0	+	0,60	0,69	0,68
7	18	2	+	0	-	0	-	0	+	0	+	0,59	0,58	0,55
8	31	6	-	0	+	0	-	0	+	0	+	0,66	0,65	0,60
9	36	7	0	+	+	0	0	+	0	+	+	0,88	0,89	0,87
10	44	11	0	-	-	0	0	+	0	+	+	0,86	0,88	0,89
11	21	4	0	+	-	0	0	-	0	+	+	0,88	0,87	0,89
12	46	12	0	-	+	0	0	-	0	+	+	0,82	0,83	0,81
13	03	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,88	0,87	0,89
14	60	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,86	0,87	0,89
15	39	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,88	0,89	0,86

Повторність дослідів: $$G_{розрах} = \frac{S^2_{umax}}{\sum_{u=1}^{N} S^2_{u(0,05;f_1;f_2)}}$$

Дисперсія, що характеризує розсіяність результатів дослідів на u-тому співвідношенні факторів:

$$S_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^{m}(y_{ui} - \bar{y}_i)^2}{m-1}$$

Таблиця В 2

Допоміжна таблиця для розрахунку значення дисперсії

№ опыта	Y_1	Y_2	Y_3	$\overline{y}$	$\sum_{p=1}^{m}(y_{iu}-\overline{y})$	S_u^2
1	0,72	0,75	0,76	0,7433	0,0009	0,0004
2	0,79	0,78	0,75	0,7733	0,0009	0,0004
3	0,71	0,79	0,78	0,76	0,0038	0,0019
4	0,72	0,7	0,73	0,7167	0,0005	0,0002
5	0,56	0,57	0,53	0,5533	0,0009	0,0004
6	0,6	0,69	0,68	0,6567	0,0049	0,0024
7	0,59	0,58	0,55	0,5733	0,0009	0,0004
8	0,66	0,65	0,6	0,6367	0,0021	0,001
9	0,88	0,89	0,87	0,88	0,0002	0,0001
10	0,86	0,88	0,89	0,8767	0,0005	0,0002
11	0,88	0,87	0,89	0,88	0,0002	0,0001
12	0,82	0,83	0,81	0,82	0,0002	0,0001
13	0,88	0,87	0,89	0,88	0,0002	0,0001
14	0,86	0,87	0,89	0,8733	0,0005	0,0002
15	0,88	0,89	0,86	0,8767	0,0005	0,0002

Найбільша дисперсія у строках плану: S^2_{umax}0,0024

Сума дисперсій: $\sum_{u=1}^{N} S_u^2$ =0,0084

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розрах}$ =0,2885

$$G_{розрах} = 0{,}2885 \leq G_{табл} = 0{,}3346$$

Дисперсія повторності (похибка досліду): S_y^2 =0,0006

Коефіцієнти рівняння регресії:

b_0=0,8767 b_{13}=0

b_1=-0,0192 b_{23}=0,0142

b_2=-0,0013 b_{11}=-0,1

b_3=-0,0121 b_{22}=-0,0352

b_{12}=0,01 b_{33}=-0,071

З розрахунком коефіцієнтів регресії одержано рівняння, що має вигляд:

$y = 0,8767 - 0,0192x_1 - 0,0013x_2 - 0,0121x_3 + 0,01x_{12} + 0x_{13} + 0,0142x_{23} - 0,1x_1^2 - 0,0352x_2^2 - 0,071x_3^2$

Дисперсія, що характеризує похибки у визначенні коефіцієнтів регресії:

$S^2\{b_0\}$ =0,0002 $S^2\{b_i\}$ = 0,0001 $S^2\{bij\}$ =0,0001 $S^2\{b_{ii}\}$ =0,0002

Довірливі інтервали коефіцієнтів регресії:

Δb_0 =0,0072 Δb_i =0,0044 Δb_{ij} =0,0063

Δb_{ii} =0,0072

Порівняння коефіцієнтів регресії з довірливими інтервалами:

b_0 =0,8767 $\geq \Delta b_0$ =0,0072 b_{13} =0 $\leq \Delta b_{ij}$ =0,0063

b_1 =-0,0192 $\geq \Delta b_i$ =0,0044 b_{23} =0,0142 $\geq \Delta b_{ij}$ =0,0063

b_2 =-0,0013 $\leq \Delta b_i$ =0,0044 b_{11} =-0,1 $\geq \Delta b_{ii}$ =0,0072

b_3 =-0,0121 $\geq \Delta b_i$ =0,0044 b_{22} =-0,0352 $\geq \Delta b_{ii}$ =0,0072

b_{12} =0,01 $\geq \Delta b_{ij}$ =0,0063 b_{33} =-0,071 $\geq \Delta b_{ii}$ =0,0072

Відкинувши коефіцієнти регресії, що мають низьке значення, рівняння набуде вигляду:

$y = 0,8767 - 0,0192x_1 - 0,0121x_3 + 0,01x_{12} + 0,0142x_{23} - 0,1x_1^2 - 0,0352x_2^2 - 0,071x_3^2$

Перевірка на адекватність рівняння регресії:

$$F_{розрах} = \frac{S^2_{ад}}{S^2_y} \leq F_{(0,05;f_{ад}f_y)}$$

Дисперсія адекватності:

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_{u=1}^{N}(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - (k+1)}$$

Таблиця В 3

Допоміжна *таблиця* для розрахунку значення критерію Фішера

№ опыта	$У_1$	$У_2$	$У_3$	$\overline{У}$	$\hat{y}_u$	$(\overline{У}-\hat{y}_u)^2$
1	0,72	0,75	0,76	0,7433	0,7323	0,0001
2	0,79	0,78	0,75	0,7733	0,7707	0
3	0,71	0,79	0,78	0,76	0,7123	0,0023
4	0,72	0,7	0,73	0,7167	0,7507	0,0012
5	0,56	0,57	0,53	0,5533	0,6744	0,0147
6	0,6	0,69	0,68	0,6567	0,737	0,0065
7	0,59	0,58	0,55	0,5733	0,6986	0,0157
8	0,66	0,65	0,6	0,6367	0,7128	0,0058
9	0,88	0,89	0,87	0,88	0,7726	0,0115
10	0,86	0,88	0,89	0,8767	0,7968	0,0064
11	0,88	0,87	0,89	0,88	0,7684	0,0125
12	0,82	0,83	0,81	0,82	0,7442	0,0057
13	0,88	0,87	0,89	0,88	0,8767	0
14	0,86	0,87	0,89	0,8733	0,8767	0
15	0,88	0,89	0,86	0,8767	0,8767	0

Дисперсія адекватності: S^2_{ad} =0,0075

$F_{розрах}$ = 13,307≤ $F_{табл}$ =2,12

Для використання рівняння регресії, в якості розрахункової формули та інтерпретації результатів дослідів, було проведено у розкодованому вигляді:

при перетворенні лінійних членів рівняння:

$$b_i x_i = \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_i - \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_{0i},$$

b_1x_1 = -0,0869ω + 0,142914027149321

b_2x_2 = -0,0026R + 0,0156

b_3x_3 = -0,0013J_c + 0,0091

при перетворенні членів рівняння, які мають взаємодію:

$$b_{ij} x_i x_j = \frac{b_{ij}}{\varepsilon_i \varepsilon_j}\left(X_i X_j - X_i X_{0j} - X_j X_{0i} + X_{0i} X_{0j}\right),$$

$b_{12}x_1x_2$ 0,0905= (ω- 6R - 1,645ω + 9,87 R)

$b_{13}x_1x_3$ 0= (ωJ- 7$_c$ - 1,645ω J+ 11,515$_c$)

$b_{23}x_2x_3$ 0= (RJ- 7_c - 6R J+ 42_c)

при перетворенні квадратних членів рівняння:

$$b_{ii}x_i^2 = \frac{b_{ii}}{\varepsilon_i^2}\left(X_i^2 - 2X_iX_{0i} + X_{0i}^2\right),$$

$$b_{11}x_1^2 = -2{,}0475(\omega^2 + 3{,}29\omega + 2{,}706025)$$

$$b_{22}x_2^2 = -0{,}1408(R^2 + 12R + 36)$$

$$b_{33}x_3^2 = -0{,}071(J_c^2 + 14J_c + 49)$$

де x_i – кодоване значення фактору(величина не має розмірності), верхній рівень позначено +1, нижній - -1, у центрі – 0;

ε_i – натуральна значення інтервалу варіювання фактору;

X_i – натуральне значення фактору;

X_{0i} – натуральне значення фактору на нульовому рівні.

Таблиця В 4

Значення величин для наведення прикладу обрано з таблиці (ПСС)

Позначення фактору	X_1	X_2	X_3
Найменування фактору	Частота коливань робочої поверхні, $с^{-1}$.	Амплітуда коливань робочої поверхні, мм.	Швидкість повітряного потоку, м/с
Нульовий рівень, X_{0i}	14,5	5,0	1,5
Інтервал варіювання, ε_i	1,0	0.5	0,5
Верхній рівень фактору	16,7	6.0	3,0
Нижній рівень фактору	13,3	4,0	1,0

Коефіцієнти регресії у розкодованому вигляді:

b_0 = -10,9579515898528

b_1 = 6,10627956020557 b_2 = 1,33933122171946 b_3 = 0,8223

b_{12} = 0,0904977375565611 b_{13} = 0 b_{23} = 0,0284

b_{11} = -2,04746012571405 b_{22} = -0,1408 b_{33} = -0,1408

Одержано рівняння регресії у розкодованому вигляді:

$W = -10,9579515898528 + 6,10627956020557\omega + 1,33933122171946R + 0,8223J_c + 0,0904977375565611\omega R - \omega J_c ++ 0,0284J_c +- 2,04746012571405^2 +- 0,1408^2 +- 0,071_c^2$

Отримаємо параметр оптимізації:

W = 0,8767

ДОДАТОК Г
ВИКОНАННЯ НДР

УДК 626.8.002.5, 631.36
№ держреєстрації 0122U000810
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Державний біотехнологічний університет
(ДБТУ)
61002 м. Харків, вул. Алчевських, 44
тел. (057) 700-38-88

ЗАТВЕРДЖЕНО
Ректор ДБТУ, к.т.н.

_____ Андрій КУДРЯШОВ

"27" ___грудня___ 2022 р.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
№ 3-22-23 БО

Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом

ОЦІНКА ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА ПРОБЛЕМАТИКОЮ ПРОЄКТУ (проміжний)

Начальник НДЧ
канд. техн. наук _____ Л.О. Чуйко
старш. наук. співроб

Керівник НДР
завідувач факультету мехатроніки
та інжинірингу, канд. техн. наук, доц. _____ В.В. Бредихин

Харків 2022

Рукопис закінчено 27 грудня 2022 р.
Результати цієї роботи розглянуто Вченою Радою ДБТУ
(Протокол № 5 від 28.12.2022 р.)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 150 с., 8 табл., 50 рис., 160 джерел.

НАСІННЯ, ПОСІВНІ ВЛАСТИВОСТІ, ОЧИЩЕННЯ, СЕПАРУВАННЯ, КАЛІБРУВАННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНУВАННЯ, МОДЕЛЮВАН- НЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ОБЛАДНАННЯ.

Сталий розвиток та продовольча безпека України визначається прискореним і стабільним виробництвом, експортом зерна. Важливою умовою отримання високих врожаїв сільськогосподарських культур є висока якість посівного матеріалу, яка визначається фізіолого-біохімічними процесами в насінні та технічними засобами для його підготовки.

Метою проєкту – розроблення та теоретичне обґрунтування продуктивних, ресурсозберігаючих, екологічно-безпечних технічних засобів з підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу сільськогосподарських культур шляхом інтенсифікації процесів очищення, калібрування та обробки з використанням електромагнітного випромінювання.

Об’єкт дослідження – технологічні процеси очищення, калібрування та передпосівної обробки насіннєвого матеріалу.

Предмет дослідження – обґрунтування параметрів технологічних процесів, розробка технічних засобів з урахуванням властивостей насіннєвих сумішей.

Аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел за темою проекту, його оцінка. Створено математичні моделі процесів калібрування насіння на нових робочих органах насіннєочисних машин, пневмостолів. Встановлені закономірності зміни складових швидкості компонентів насіннєвих сумішей з урахуванням параметрів нових робочих органів та комплексу властивостей насіннєвих сумішей. Проведено дослідження впливу режимів електромагнітного випромінювання на початкові етапу росту та розвитку сільськогосподарських культур. Досліджено механізми впливу електромагнітного випромінювання на метаболічні процеси насіння.

Державний біотехнологічний університет

Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом

Номер державної реєстрації: 0122 U 000810

Керівник: Бредихін В.В.

Харків - 2022

Мета та завдання НДР

- **Строки виконання**: початок - 01.01.2022, закінчення - 31.12.2023
- **Метою проекту** є розроблення та теоретичне обґрунтування продуктивних, ресурсозберігаючих, екологічно-безпечних технічних засобів з підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу сільськогосподарських культур шляхом інтенсифікації процесів очищення, калібрування та обробки з використанням електромагнітного випромінювання.
- **Завдання, на вирішення яких спрямовано проект:**

а. провести аналіз та оцінку досліджень процесів очищення, калібрування насіннєвих сумішей за густиною, аеродинамічними, електромагнітними та геометричними ознаками, існуючих досліджень конструкцій насіннєочисних машин та обладнання для обробки насіння визначити напрямки їх удосконалення;
б. провести теоретичні дослідження динаміки та електромагнітних дій насіння сільськогосподарських культур з урахуванням параметрів розроблених машин;
в. визначити залежності ефективності процесів, що досліджуються, від параметрів розроблених машин та обладнання, властивостей насіннєвих сумішей;
г. встановити особливості дії, оптимальні дози та режими дії ЕМВ на посівні та товарні якості, метаболічні процеси в насінні та елементи продуктивності сільськогосподарських культур;
д. провести експериментальні дослідження та виробничу апробацію розробленої технології, визначити техніко-економічні та екологічні показники її використання.

Назва етапу згідно з технічним завданням	Отримані результати
Оцінка та аналіз досліджень за проблематикою проекту. Вивчення біологічних та техніко-технологічних способів отримання якісного насіннєвого матеріалу. Теоретичне обґрунтування параметрів процесів калібрування та обробки випромінюванням насіннєвого матеріалу.	Проведений аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел за темою проекту, виконано оцінку. Створено математичні моделі процесів калібрування насіння на нових робочих органах насіннєочисних машин, пневмостолів. Встановлені закономірності зміни складових швидкості компонентів насіннєвих матеріалів з урахуванням параметрів нових робочих органів та комплексу властивостей насіннєвих матеріалів. Проведено дослідження впливу режимів електромагнітного випромінювання на початкові етапу росту та розвитку сільськогосподарських культур. Вивчено ефекти електромагнітного випромінювання (некогерентного монохроматичного випромінювання червоного діапазону) на посівні та товарні якості насіння. Досліджено механізми впливу електромагнітного випромінювання на метаболічні процеси насіння.

Зведені результаті НДР

	Статті у наукових журналах, що входять до науково-метричних баз даних WoS та/або Scopus	Статті у фахових виданнях України категорії «Б», статті у періодичних закордонних фахових виданнях, що мають ISSN, а також англомовні тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій.	Представлення науково-практичні результати проєкту на міжнародних комунікативних форумах, всеукраїнських та регіональних науково-технічних/промислових виставкових заходах, в мережі підприємств, що підтверджується відповідним сертифікатом чи посиланням на ел.версію заходу/матеріалів/каталогів	Патент на корисну модель	Акти впро-вадження	Госп. теми, тис.грн	Магістри	
Кіл-ть план	3	4	3	1	-	-	1	
Кіл-ть факт	2	9	12	1	2	27	1	
%	66,7	225	400	100	200		100	181%

5

Статі в БД Scopus

- 1. Investigation of the effect of pre-sowing electrical stimulation of winter rapeseed on its spectral-luminescent properties. S.KOVALYSHYN, S. MYAGKOTA, V. PTASHNYK, S. KHARCHENKO, A. TOMPOROWSKI, P. KIEŁBASA Przeglad Elektrotechnicznythis link is disabled, 2022, 1(1), pp. 79–83. doi: 10.15199/48.2022.01.13
- 2. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., Pasnik, J., Kovalyshyn, S., Sirovitskiy, K. (2022). Influence of Physical and Constructive Parameters on Durability of Sieves of Grain Cleaning Machines. Advances in Science and Technology Research Journal, 22(6).

Статті інші

- 1. Харченко С., Харченко Ф., Панкова О., Бакум М., Харченко Д. Ідентифікація властивостей насіннєвих сумішей при їх поділі на вібровідцентрових решетних сепараторах // Вісник СНАУ, 2022. - №2 (48). – С.83-87.
- 2. Панкова О., Сировицький К., Харченко С., Оничко В., Тарельник В., Думанчук М. Підготовка насіннєвого матеріалу кукурудзи електромагнітним випромінюванням на різних режимах як спосіб підвищення врожайності // Вісник СНАУ, 2022. - № 2(48). – С.50-55.
- 3. Kharchenko S., Kovalyshyn S., Linov A, Abduev M., Kharchenko F., Sirovitskiy K. Identification of significant factors in the process of grain mixtures separation on cylindrical sieve. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry – 2022, Vol. 22, No. 1
- 4. V.Olshanskii, A. Olshanskii, S. Kharchenko, S.Kovalyshyn, F. Kharchenko, O.Pankova. About the dynamics of heterogeneous fine-grained mixture on a flat vibrosieve. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry – 2022, Vol. 22, No. 1

6

Виступи на МНПК

- 1 st Workshop on Experimental and Computational Mechanics "WECM'22" + DIACMEC Canaletto Project Kick-off Meeting Lublin, Poland, June 1st 2022 .
- Multidisciplinary conference for young researchers Sustainable Development in Wartime Ukraine and the World 25.11.2022 (Prague, Czech Republic).
- 86-а науково-технічна та науково-методична конференція університету. Секція кафедри Екології 10 – 13 травня 2022, Харків.
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи». Вінницький національний аграрний університет. 20.10-21.10.2022.
- III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «ІННОВАЦІЇ: теорія і практика». Кропивницький: Академія Прикладних наук. 2022. 25.10-01.12.2022.
- Міжнародна науково-практична конференція за участю молодих науковців «Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2022» Харків, ХНАДУ, 27 жовтня 2022 р.
- Щорічна науково-практична конференція викладачів, аспірантів та студентів, СНАУ, Суми, 14-18 .11. 2022 р.
- Міжнародна науково-практична конференція «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК». Харків, ДБТУ, 12.2022 р

7

Експериментальні дослідження

ПрАТ «Харківпродмаш» **ПАТ «Завод Фрунзе»** **СНАУ**

8

9

Патенти

- 1. Патент на КМ: UA 152095. B07B9/02 (2006.01). Спосіб підвищення якості очищення зернових сумішей пневматичним сепаратором. Харченко С.О., Бакум М.В., Крекот М.М., Майборода М.М., Ковалишин С.Й., Сировицький К.Г., Пташник В.В., Гаєк Є.А., Литвиненко В.В., Нестер Б.В. u 2022 01926, заявл. 07.06.2022, опуб. 26.10.2022. Бюл.№43 – 5с.

- 1. заявка u202201366 28.04.2022
- 2. заяка u202201515 від 11.05.2022
- 3. заявка u202201610 від 18.05.2022
- 4. заявка . u202202764 від 02.08.2022
- 5. заявка патент Польша

10

Договори на науково-технічну продукцію/гранти

- Заплановано в проекті у 2022р- без госпдоговорів.

- 1. ДБТУ-ПраТ "Харків-продмаш" м. Харків керів. Харченко С.О., Гаєк Є.А. – **15 тис. грн.**
- 2. СНАУ - Філія «Конотопський елеватор» ТОВ «Агро-Поліс», м. Конотоп, Сумська обл. «Розробка науково-практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності процесу сепарування насіннєвих матеріалів». Керів. Харченко С.О., Харченко Ф.М., Герасименко В.О., Харченко Д.О., Сировицький К.Г., Шуляк М.Л. - **12 тис. грн.**
- 3. Lublin University of Technology (Poland) - Numerical-experimental analysis of a sieve holes' shape and arrangement effect on the degree of grain damage at the assumed sieving efficiency. Principal Investigator S. Kharchenko. - **846 768 PLN.**

Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Д О Г О В І Р № 26-23 ДП

щодо надання наукових послуг

м. Харків

ДОГОВІР № 26-23 ДП

м. Харків *«01» липня 2023 р.*

Державний біотехнологічний університет (ДБТУ)
(найменування об'єднання, організації, підприємства)

далі – ВИКОНАВЕЦЬ, в особі *проректора з наукової роботи Михайлова Валерія Михайловича,* що діє на підставі *Статуту* з одного боку і

Фізична особа-підприємець Знайдюк Василь Григорович,
(найменування об'єднання, організації, підприємства)

далі – ЗАМОВНИК, що діє на підставі запису в Єдиному державному реєстрі юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців № 2 044 000 0000 002195 з іншого боку, уклали цей договір про наступне:

1. ПРЕДМЕТ ДОГОВОРУ

1.1.ЗАМОВНИК доручає, а ВИКОНАВЕЦЬ бере на себе надання наукових послуг за темою: **Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно - кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур.**

Замовник зобов'язується прийняти надані послуги та оплатити їх.

1.2. Вимоги до процесу надання послуг, що є предметом договору визначаються Технічним завданням, яке становить невід'ємну частину цього договору (Додаток 1).

1.3. Термін здачі виконаних робіт за договором *"30" вересня 2023 р.*

1.4. Зміст та терміни виконання основних етапів визначаються Календарним планом, що становить невід'ємну частину цього договору (Додаток 2).

1.5. Приймання та оцінка наданих послуг здійснюється відповідно до вимог технічного завдання.

1.6. Використання результатів наданих послуг здійснюється ЗАМОВНИКОМ шляхом передачі на підприємство технічної документації з рекомендаціями для впровадження розроблених рекомендацій у технологічну лінію з виробництва насіння зернових культур

(вказати яким чином, коли будуть використані результати, наприклад: передача документів на підприємство для підготовки виробництва, затвердження нормативного документу, освоєння серійного випуску, створення дослідного зразка, підготовка інноваційного проекту, застосування як засіб праці тощо)

1.7. Якість послуг повинна відповідати вимогам, визначеним у пункті 1.2. договору.

2. ВАРТІСТЬ РОБІТ ТА ПОРЯДОК РОЗРАХУНКІВ

2.1. Вартість наукових послуг згідно з цим договором та відповідно до Протоколу угоди про договірну ціну на виконання робіт (Додаток 3) складає 28000,00 грн (двадцять вісім тисяч грн 00 коп.) без ПДВ, 20% ПДВ – 5600,00 грн (п'ять тисяч шістсот грн 00 коп.). Загальна вартість послуг з ПДВ складає 33600,00 грн (тридцять три тисячі шістсот грн 00 коп.).

2.2. Оплата здійснюється *одноразово* авансовим платежем.
(одноразово, поетапно, згідно домовленості замовника і виконавця)

2.3. Наукові послуги оплачуються ЗАМОВНИКОМ згідно з умовами договору.

3. ПОРЯДОК ЗДАЧІ ТА ПРИЙМАННЯ РОБІТ

3.1. Перелік документації, що підлягає оформленню та здачі ВИКОНАВЦЕМ ЗАМОВНИКУ згідно з договором, визначено Технічним завданням, яке становить невід'ємну частину цього договору (Додаток 1).

3.2. Передача оформленої в установленому порядку документації за договором разом з актом здачі-приймання наданих послуг здійснюється супровідними документами ВИКОНАВЦЯ.

3.3. По завершенні надання послуг ВИКОНАВЕЦЬ надає ЗАМОВНИКУ акт здачі-приймання наданих послуг з комплектом звітної документації, передбаченої Технічним завданням, Календарним планом та умовами договору.

3.4. ЗАМОВНИК протягом 3 днів з дня отримання акту здачі-приймання наданих послуг і звітних документів, вказаних в п. 3.3. цього договору, зобов'язаний направити ВИКОНАВЦЮ підписаний акт здачі-приймання наданих послуг або мотивовану відмову від приймання послуг.

3.5. У разі мотивованої відмови ЗАМОВНИКА у прийманні послуг, сторонами складається двосторонній акт з переліком необхідних доопрацювань, термінів їх виконання.

3.6. У разі дострокового надання послуг ЗАМОВНИК має право достроково прийняти і оплатити послуги за договірною ціною.

3.7. Якщо в процесі надання послуг з'ясовується неминучість отримання негативного результату або недоцільність подальшого надання послуг, ВИКОНАВЕЦЬ зобов'язаний припинити її, проінформувавши про це ЗАМОВНИКА в *5-денний* термін після припинення надання послуг.

В цьому випадку сторони зобов'язані в *10-денний* термін розглянути питання про доцільність і напрями продовження надання послуг.

4. ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ СТОРІН

4.1. Якщо у ході виконання робіт виявляється неможливість досягнення результату внаслідок обставин, що не залежать від ВИКОНАВЦЯ, ЗАМОВНИК зобов'язаний оплатити фактичні витрати за виконану роботу, проведену до виявлення неможливості отримати передбачені договором результати, але не вище відповідної частини ціни робіт, визначеної договором.

4.2. За невиконання або неналежне виконання зобов'язань за цим договором ВИКОНАВЕЦЬ та ЗАМОВНИК несуть майнову відповідальність згідно до чинного законодавства.

4.3. За порушення обумовлених договором строків оплати ЗАМОВНИК зобов'язується сплатити пеню у розмірі подвійної облікової ставки НБУ за кожен

день прострочки. Сплата пені не звільняє ЗАМОВНИКА від виконання обов'язків за договором.

4.4. За порушення обумовлених договором строків виконання робіт ВИКОНАВЕЦЬ зобов'язується сплатити пеню у розмірі подвійної облікової ставки НБУ за кожен день прострочки. Сплата пені не звільняє ВИКОНАВЦЯ від виконання обов'язків за договором.

4.5. Відомості щодо предмету цього договору, ходу його виконання та одержаних результатів не є конфіденційними.

4.6. Додаткові, не встановлені законодавством санкції за невиконання або неналежне виконання зобов'язань: *немає*

5. ІНШІ УМОВИ

5.1. Результати виконаної роботи є власністю Виконавця.

5.2. Замовник і Виконавець звільняються від виконання своїх обов'язків за умов виникнення форс-мажорних обставин, передбачити які неможливо на час підписання договору, а саме: військові дії, стихійні лиха, громадські заворушення, та інші, які унеможливлюють подальше виконання договору.

5.3. У разі виникнення форс-мажорних обставин Замовник (Виконавець) зобов'язаний надіслати письмове повідомлення Виконавцю (Замовнику) не пізніше 15 днів після їх виникнення.

5.4. За згодою сторін зміст пунктів технічного завдання, термін дії договору або етапів календарного плану, а також вартість послуг за договором можуть бути змінені згідно чинного законодавства, що оформлюється додатковою угодою, яка є невід'ємною частиною договору.

5.5. Цей Договір складений і підписаний у двох примірниках, по одному примірнику для кожної із Сторін. Обидва примірники Договору мають однакову юридичну силу.

5.6. До цього договору додаються: технічне завдання (Додаток 1), календарний план (Додаток 2), протокол угоди про договірну ціну (Додаток 3).

Всі додатки є невід'ємною частиною договору.

5.7. Всі суперечні питання вирішуються в порядку, передбаченому чинним законодавством.

5.8. Інші умови за погодженням сторін: *немає.*

6. ТЕРМІН ДІЇ ДОГОВОРУ І ЮРИДИЧНІ АДРЕСИ СТОРІН

6.1. Термін дії договору початок *01 липня 2023 р.*

закінчення *30 вересня 2023 р.*

6.2. Адреса та банківські реквізити сторін:

ВИКОНАВЦЯ

Державний біотехнологічний університет
61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, буд. 44
(поштовий і телеграфний індекс та адреса виконавця і банківські реквізити)
р/р UA688201720313251003201130739 в ДКСУ м. Києва,
МФО 820172, код ЄДРПОУ 44234755,
ІПН 442347520317
тел. +38 050 1402629, +38 097 4654604
e-mail: ndh_dbtu@ukr.net

ЗАМОВНИКА

Фізична особа-підприємець Знайдюк Василь Григорович

15172, Чернігівська обл., Чернігівський район, село Макишин, вулиця Лугова, будинок 37
(поштовий і телеграфний індекс та адреса замовника і банківські реквізити)
р/р UA773518230000026006500003962
Банк: АТ „Ощадбанк"
МФО 351823, код ЄДРПОУ 2939513055,
тел. _+380673974239__
e-mail: v.znaidiuk@gmail.com

ВИКОНАВЕЦЬ
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____ *Валерій МИХАЙЛОВ*
М.П. *01 липня 2023 р.*
Науковий керівник роботи
_____ *Вадим БРЕДИХІН*
01 липня 2023 р (прізвище, ім'я)
Головний бухгалтер
_____ *Тетяна ДАНИЛЕНКО*
Провідний фахівець юридичного відділу
_____ *Олександр ПОПОВ*

ЗАМОВНИК
Фізична особа-підприємець
_____ *Василь ЗНАЙДЮК*
(посада, прізвище, ім'я *повністю*)
М.П. *01 липня 2023 р.*

Додаток 1 до договору
№ 26-23 ДП
від *01 липня 2023 р.*

ЗАТВЕРДЖЕНО
Фізична особа-підприємець
_____ *Василь ЗНАЙДЮК*
М.П. *01 липня 2023 р.*

УЗГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____ *Валерій МИХАЙЛОВ*
М.П. *01 липня 2023 р.*

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно - кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур.
(назва послуги)

1. ВИКОНАВЕЦЬ Державний біотехнологічний університет, співробітники кафедр: "Надійності та міцності машин і споруд», «ОІПХВ», «СГМ та інженерії тваринництва»
(найменування ВНЗ, наукової установи, організації, кафедра)
2. Науковий керівник к.т.н., доцент Бредихін Вадим Вікторович
(науковий ступінь, вчене звання та ПІБ повністю)
3. Підстава для виконання роботи договір № 26-23 ДП від *01 липня 2023 р.*
4. Класифікація роботи наукові послуги
5. Терміни виконання: початок *01 липня 2023 р.*
закінчення *30 вересня 2023 р.*

6. Перелік організацій, зацікавлених в результатах наукових послуг Фізична особа-підприємець Знайдюк Василь Григорович

7. Мета роботи, очікувані результати, їх практична цінність
Аналіз та систематизація існуючих машин для точного розділення насіннєвого матеріалу. Розробка оптимальних кінематично-конструктивних параметрів роботи пневмосепарувального столу.
8. Наявний науковий наробок: _____
9. Результати патентних досліджень: _____
10. Форма та умови реалізації результатів роботи: розробка та передача рекомендацій
11. Перелік звітної документації Акт здачі-приймання НТП, _____.

Науковий керівник роботи _____ *Вадим БРЕДИХІН*
01 липня 2023 р. *(ім'я та прізвище повністю)*

Додаток 2 до договору
№ 26-23 ДП
від *01 липня 2023 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН РОБІТ

Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно - кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур.
(назва послуги)

№ з/п	Найменування основних етапів виконання робіт за договором	Термін виконання: початок - закінчення (місяць, рік)	Розрахункова ціна етапу в % до договірної ціни (%, грн)	Очікуваний результат виконання етапу
1.	Аналіз існуючих науково-технічних і технологічних рішень, дослідження та видача рекомендацій	*01 липня 2023 р. - 30 вересня 2023 р.*	28000,00 грн	Результат аналізу сучасних науково-технічних рішень з виробництва насіння. Рекомендації з оптимізації визначальних параметрів процесу. Прогнозований результат: підвищення ефективності процесу, покращення технології виробництва, зниження собівартості процесу. Остаточний звіт.

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Проректор з наукової роботи ДБТУ

Валерій МИХАЙЛОВ

М.П. *01 липня 2023*

Науковий керівник роботи

Вадим БРЕДИХІН

01 липня 2023 (прізвище, ім'я)

ВІД ЗАМОВНИКА

Фізична особа-підприємець

Василь ЗНАЙДЮК
(посада, прізвище, ім'я *повністю*)

М.П. *01 липня 2023 р.*

Додаток 3 до договору
№ 26-23 ДП
від *01 липня 2023 р.*

П Р О Т О К О Л

угоди про договірну ціну на виконання робіт

Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно - кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур.
(назва послуги)

за договором № 26-23 ДП від *01 липня 2023 р*

Ми, що підписалися нижче, від особи ЗАМОВНИКА *Фізична особа-підприємець Знайдюк Василь Григорович*
(посада, повне найменування замовника, прізвище, ім'я, по батькові)
та від особи ВИКОНАВЦЯ *проректор з наукової роботи Державного біотехнологічного університету Михайлов Валерій Михайлович* підтверджуємо, що сторонами досягнута угода про розмір договірної ціни за надання послуг у сумі 28000,00 грн (двадцять вісім тисяч грн 00 коп.) без ПДВ, 20% ПДВ – 5600,00 грн (п'ять тисяч шістсот грн 00 коп.). Загальна вартість послуг з ПДВ складає 33600,00 грн (тридцять три тисячі шістсот грн 00 коп.).
(сума цифрами та прописом)

Цей протокол є підставою для проведення взаємних розрахунків і платежів між ВИКОНАВЦЕМ та ЗАМОВНИКОМ.

ВІД ВИКОНАВЦЯ	ВІД ЗАМОВНИКА
Проректор з наукової роботи ДБТУ	Фізична особа-підприємець
Валерій МИХАЙЛОВ	*Василь ЗНАЙДЮК*
	(посада, прізвище, ім'я *повністю*)
01 липня 2023 р М.П.	М.П. *01 липня 2023 р.*

УТОЧНЕНИЙ ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН

наукових досліджень та розробок, які виконує
Державний біотехнологічний університет
за рахунок коштів державного бюджету у 2022 році

№з/п	Назва НДДКР Номер держреєстрації Категорія роботи ПІБ наукового керівника, науковий ступінь	Терміни виконання	Обсяг фінансуванняна поточний рік, тис.грн.	Очікувані результати в поточному році	Наукові секції за фаховими напрямами
Назва пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки - Раціональне природокористування					
2.	Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом № держреєстрації: 0122U000810 Прикладне дослідження Бредихін Вадим Вікторович,доц., канд. техн. наук	2022 2023	464,873	Очікуваними результатами 1-го етапу є: Очікуваними результатами 1-го етапу є: – Проведений аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел за темою проєкту, виконано оцінку. – Створено математичні моделі процесів калібрування насіння на нових робочих органах насіннєочисних машин, пневмостолів. – Встановлені закономірності зміни складових швидкості компонентів насіннєвих сумішей з урахуванням параметрів нових робочих органів та комплексу властивостей насіннєвих сумішей. – Проведено дослідження впливу режимів електромагнітного випромінювання на початкові етапу росту та розвитку сільськогосподарських культур. – Вивчено ефекти елеткромагнітного випромінювання (некогерентного монохроматичного випромінювання червоного діапазону) на посівні та товарні якості насіння. – Досліджено механізми впливу електромагнітного випромінювання на метаболічні процеси насіння. Звітна документація: – Апробація результатів на міжнародних конференціях; отримання одного патенту,. – Публікація 7 наукових праць, з них 3 статті у журналах, що входять до науково-метричних баз даних WoS та/або Scopus – захист 1 кваліфікаційної роботи магістрів – проміжний звіт.	1-ий: 1. Теорія і практика збільшення кількості і покращання якості рослинних біоресурсів та забезпечення сталого сільського господарства. 1.4. Розроблення нових та удосконалення технологій виробництва, переробки, зберігання і стандартизації сировини рослинного походження 2-ий: 1. Теорія і практика збільшення кількості і покращання якості рослинних біоресурсів та забезпечення сталого сільського господарства. 1.32. Розробка заходів агротехніки та методів стимуляції росту рослинних біоресурсів

Керівник роботи _____ **В.В. Бредихін**
(підпис)

Секція (номер, назва)__Наукові проблеми сільського, лісового і садово-паркового господарства, ветеринарії

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
за завершеним прикладним дослідженням або завершеною науково-технічною (експериментальною) розробкою, виконання яких здійснювалось у 2021–2022 роках

Назва прикладного дослідження або науково-технічної (експериментальної) розробки (далі – дослідження або розробки) __ **Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом**

Керівник дослідження або розробки: __Бредихін Вадим Вікторович

Номер державної реєстрації:___ 0122U000810__

Номер облікової картки заключного звіту:_____

Найменування організації-виконавця: __Державний біотехнологічний університет_____

Назва пріоритетного тематичного напряму організації-виконавця _раціональне природокористування_

Строки виконання: початок - **_01.01.2022__, закінчення - _31.12.2023_ .**

Обсяг коштів, виділених на виконання дослідження або розробки за весь період (згідно із запитом / фактичний) __1499,8__/__432__тис. гривень

1. **КОРОТКИЙ ЗМІСТ ПРОЕКТУ** (до 30 рядків тексту):
1.1. Проблема, на вирішення якої було спрямовано дослідження або розробка.
1.2. Об'єкт і предмет дослідження або розробки.
1.3. Мета і основні завдання дослідження або розробки.
1.4. Коментар. (надати обов'язково у випадку, якщо відбувалися коригування мети, предмету дослідження або розробки, основних завдань, відхилення від запланованого календарного плану роботи).

Важливою умовою отримання високих врожаїв сільськогосподарських культур є висока якість посівного матеріалу, яка визначається фізіолого-біохімічними процесами в насінні та технічними засобами для його підготовки. Відсутність ефективного калібрування насіннєвого матеріалу внаслідок загального врахування їх властивостей, відсутність активізації фізіолого-біохімічних процесів в насінні за умови дотримання екологічної безпеки утворює проблему та потребує відповідних досліджень. Об'єкт дослідження: технологічні процеси очищення, калібрування та передпосівної обробки насіннєвого матеріалу. Предмет дослідження: обґрунтування параметрів технологічних процесів, розробка технічних засобів з урахуванням властивостей насіннєвих сумішей.
Метою проєкту є розроблення та теоретичне обґрунтування продуктивних, ресурсозберігаючих, екологічно-безпечних технічних засобів з підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу сільськогосподарських культур шляхом інтенсифікації процесів очищення, калібрування та обробки з використанням електромагнітного випромінювання.
Завдання, на вирішення яких спрямовано проект:
а. провести аналіз та оцінку досліджень процесів очищення, калібрування насіннєвих сумішей за густиною, аеродинамічними, електромагнітними та геометричними ознаками, існуючих

досліджень конструкцій насіннєочисних машин та обладнання для обробки насіння визначити напрямки їх удосконалення;
б. провести теоретичні дослідження динаміки та електромагнітних дій насіння сільськогосподарських культур з урахуванням параметрів розроблених машин;
в. визначити залежності ефективності процесів, що досліджуються, від параметрів розроблених машин та обладнання, властивостей насіннєвих сумішей;
г. встановити особливості дії, оптимальні дози та режими дії ЕМВ на посівні та товарні якості, метаболічні процеси в насінні та елементи продуктивності сільськогосподарських культур;
д. провести експериментальні дослідження та виробничу апробацію розробленої технології, визначити техніко-економічні та екологічні показники її використання.
Створення та обґрунтування нових концептуальних рішень щодо інтенсифікації процесів, розробка відповідних технічних засобів, дозволить отримати якісне насіння та вирішити актуальну проблему збільшення виробництва зерна в Україні.

2. ОПИС ПРОЦЕСУ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ АБО РОЗРОБКИ (до 50 рядків тексту):

2.1. Описати підхід щодо проведення дослідження або розробки, визначити, у чому його (її) новизна.
2.2. Розкрити основні ідеї дослідження або розробки, як вони втілювались.
2.3. Навести основні гіпотези дослідження або розробки, як вони підтверджувались або спростовувались, визначали формування науково-прикладних результатів.
2.4. Представити нові або оновлені методи та засоби, методику та методологію дослідження або розробки, що створені авторами у ході виконання дослідження або розробки; обґрунтувати, чим вони відрізняються від існуючих.
2.5. Описати особливості структури та складових виконання дослідження або розробки.

Збільшення виробництва сільськогосподарських культур на основі зростання їх врожайності – шлях до продовольчої безпеки та розвитку України. Одним з основних напрямків підвищення врожайності є високоякісна підготовка насінного матеріалу з активізацією його біопотенціалу шляхом інтенсивного очищення та калібрування за комплексом властивостей насіння та кінцевою обробкою електромагнітним випромінюванням.
Для реалізації проєкту використано комплексний підхід, складовими частинами якого є розроблення інноваційних робочих органів машин, математичне моделювання процесів калібрування насіння та теоретичне визначення режимів обробки електромагнітним випромінюванням, використання сучасних лабораторних типових та розроблених методів досліджень, виробнича апробація розробок. Теоретичні дослідження проведені із застосуванням основних положень теоретичної механіки, механіки суцільних середовищ, тензорного аналізу, теорії швидких рухів гранульованих сипких матеріалів тощо. Експериментальні дослідження частково проведені в галузевих науково-дослідних лабораторіях.
Частково розроблені нові актуальні методики підвищення посівних властивостей насіння, які грунтуються на рекомендаціях ефективної експлуатації створенних машин та обладнання запропонованої технології. Частково розроблені нові методи досліджень, які враховують властивості насіння: вирівняність, схожість, життєздатність та стійкість рослин до хвороб, їх вплив на інтенсифікацію процесів роботи насіннєочисних, калібрувальних машин. Розроблений комплекс методів та технічних засобів дозволяє досліджувати та поліпшувати ефективність насіннєочисних машин різних типів при роботі з будь-яким насінням сільськогосподарських культур, забезпечувати підвищення реалізації біопотенціалу рослин.

Частково створенна концептуально нова технологія, яка грунтується на інтенсифікації основних технологічних процесів: просіювання насіннєвих сумішей через отвори віброрешіт насіннєочисних машин з активаторами різних типів, яка відрізняється від існуючих використанням фізичної моделі бульбашкової псевдорідини і методів гідродинаміки багатофазних систем; пневмосепарування насіннєвих сумішей в пневосепарувальному каналі з розшарувальним пристроєм насіннєочисних машин, що ґрунтуються на взаємодії фаз суцільних сипких середовищ за реологічними законами; електро-магнітне розділення насіннєвих сумішей в робочій зоні електросепаратора; пневосепарування насіння за питомою вагою, що грунтується на використанні ініціаторів поділу компонентів гетерогенного сипкого середовища; передпосівної обробки насіння електромагнітним випромінюванням. Новими концептуальними результатами стали: розроблені математичні моделі руху насінин в робочих зонах пневмосепарувального каналу та віброрешіт насіннєочисної машини, пневмостолу, каналу елекро-магнітної насіннєочисної машини; теорія впливу електромагнітного випромінювання на біологічні процеси насіння. Вперше частково досліджено на клітинному рівні механізм впливу калібрування та електромагнітної стимуляції насіння; частково розкритий причинно-наслідковий зв'язок між його обробкою та посівними, урожайними якостями; комплексно обгрунтовано параметри та режими обладнання.

В рамках проєкту досліджено: існуючі світові способи та засоби реалізації біопотенціалу рослин; комплекс властивостей насіннєвого матеріалу сільськогосподарських культур; розроблення технічних засобів з інтенсифікацією процесів; побудову математичних моделей та виразів досліджувальних процесів; експериментальне підтвердження теоретичних положень та уточнення отриманих діапазонів параметрів та режимів роботи розробок; комплексне обгрунтування параметрів повітрорешітного та електромагнітного розділення на насіннєочисних машинах, обладнання для електромагнітного випромінювання; проведення порівняльних з базовими виробничих випробувань нових високоефективних, енергоощадних, функціонально-стабільних та еклогічно-безпечних насіннєочисних машин; перевірка ступеню реалізації біопотенціалу відкаліброваного та обробленого випромінюванням насіння сільськогосподарських культур у польових умовах.

3. ОДЕРЖАНІ НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 100 рядків тексту)

3.1. Результати етапів (відповідно до технічного завдання) відобразити у таблиці:

Таблиця 1

Номер етапу, строки	Назва етапу згідно з технічним завданням	Заплановані результати	Отримані результати
№ 1. з _1.01.2022__ по 31.12..2022__	Оцінка та аналіз досліджень за проблематикою проєкту. Вивчення біологічних та техніко-технологічних способів отримання якісного насіннєвого матеріалу. Теоретичне обгрунтування параметрів процесів калібрування та обробки випромінюванням насіннєвого матеріалу.	Проведений аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел за темою проєкту, виконано оцінку. Створено математичні моделі процесів калібрування насіння на нових робочих органах насіннєочисних машин, пневмостолів. Встановлені закономірності зміни складових швидкості компонентів насіннєвих сумішей з урахуванням параметрів нових робочих органів та комплексу	Проведений аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел за темою проєкту, виконано оцінку. Створено математичні моделі процесів калібрування насіння на нових робочих органах насіннєочисних машин, пневмостолів. Встановлені закономірності зміни складових швидкості компонентів насіннєвих сумішей з урахуванням параметрів нових робочих

		властивостей насіннєвих сумішей. Проведено дослідження впливу режимів електромагнітного випромінювання на початкові етапу росту та розвитку сільськогосподарських культур. Вивчено ефекти елеткромагнітного випромінювання (некогерентного монохроматичного випромінювання червоного діапазону) на посівні та товарні якості насіння. Досліджено механізми впливу електромагнітного випромінювання на метаболічні процеси насіння. Звітна документація: Проміжний звіт. Публікація 7 наукових праць, з них 3 статті у журналах, що входять до науково-метричних баз даних WoS та/або Scopus. Апробація результатів на міжнародних конференціях; отримання одного патенту, захист 1 кваліфікаційної роботи магістрів.	органів та комплексу властивостей насіннєвих сумішей. Проведено дослідження впливу режимів електромагнітного випромінювання на початкові етапу росту та розвитку сільськогосподарських культур. Вивчено ефекти елеткромагнітного випромінювання (некогерентного монохроматичного випромінювання червоного діапазону) на посівні та товарні якості насіння. Досліджено механізми впливу електромагнітного випромінювання на метаболічні процеси насіння. Звітна документація: Проміжний звіт. Публікація 7 наукових праць, з них 3 статті у журналах, що входять до науково-метричних баз даних WoS та/або Scopus. Апробація результатів на міжнародних конференціях; отримання одного патенту, захист 1 кваліфікаційної роботи магістрів.

3.2. Докладно розкрити одержані прикладні наукові результати щодо створення нового наукового знання або навести описи технологій, конструкторської, технологічної та програмної документації, дослідних зразків, положень, регламентів, стандартів, проектів нормативно-правових і методичних документів, що були створені, змінені та/або доповнені авторами у процесі виконання дослідження або розробки.

3.3. Визначити, які із результатів і як само були науково обґрунтовані та доведені, як вони пов'язані із закономірностями організації та розвитку природи, суспільства людини, їх взаємозв'язків (і якими саме); які результати розробки було створено виключно на основі узагальнення практичного досвіду і не вимагали науково-технологічних досліджень.

3.4. Довести наукову і науково-прикладну новизну результатів дослідження або розробки на основі їх змістовного порівняння із існуючими аналогами у світовій науці, техніці і технологіях на основі посилань на конкретні публікації. Список цих публікацій навести у Додатку 1 до цього Анотованого звіту. Довести переваги отриманих науково-прикладних результатів над аналогами, суміжними науково-прикладними напрацюваннями світової спільноти вчених, конструкторів, технологів, програмістів.

3.5. Обґрунтувати цінність очікуваних результатів для світової та вітчизняної науки, техніки і технологій.

Виконання проєкту передбачає створення концептуально нової технології, яка грунтується на інтенсифікації основних технологічних процесів: просіювання насіннєвих сумішей через отвори віброрешіт насіннєочисних машин з активаторами різних типів, яка відрізняється від існуючих використанням фізичної моделі бульбашкової псевдорідини і методів гідродинаміки багатофазних систем; пневмосепарування насіннєвих сумішей в пневосепарувальному каналі з розшарувальним пристроєм насіннєочисних машин, що ґрунтуються на взаємодії фаз суцільних сипких середовищ за реологічними законами; електро-магнітне розділення насіннєвих сумішей в робочій зоні електросепаратора; пневосепарування насіння за питомою вагою, що грунтується на використанні ініціаторів поділу компонентів гетерогенного сипкого середовища; передпосівної обробки насіння електромагнітним випромінюванням. Новими концептуальними результатами стануть: розроблені математичні моделі руху насінин в робочих зонах пневмосепарувального каналу та віброрешіт насіннєочисної машини, пневмостолу, каналу елекро-магнітної насіннєочисної машини; теорія впливу електромагнітного випромінювання на біологічні процеси насіння. Вперше заплановано: дослідити на клітинному рівні механізм впливу калібрування та електромагнітної стимуляції насіння; розкрити причинно-наслідковий зв'язок між його обробкою та посівними, урожайними якостями; комплексно обґрунтувати параметри та режими обладнання, які забезпечують максимальний ефект реалізації біопотенціалу рослин. Буде розроблений макетний зразок модернізованого насіннєпроводу сівалки для обробки насіння оптичним випромінюванням з метою активації біопотенціалу; макетна установка для обробки оптичним випромінюванням насіння та рослин с.-г. культур в лабораторних умовах.

Проєктом передбачено отримання науково-обгрунтованих та доведених результатів, оскільки вони будуть спиратися на фундаментальні закони математики, фізики, аеромеханіки, аеродинаміки, результати комп'ютерних обчислень, які отримані із застосуванням програмних пакетів «Matlab 6,5», «Matcad 14», крім цього розроблення кресленнь з використанням «PTC/Creo».

Виконання проєкту дозволить вирішити декілька взаємопов'язаних актуальних завдань:

а. реалізація проєкту матиме практичне застосування в сільському господарстві для підвищення посівних якостей та врожайності сільськогосподарських культур;

б. підвищити ефективність процесу виробництва продуктів рослинництва та зменшити витрати;

в. дослідити ефективність використання інноваційних конструкторсько-технологічних рішень пневмо-, електромагнітного- та віброрешітного калібрування насіннєвих сумішей сільськогосподарських культур для підвищення їх якості;

г. розробити екологічно-безпечні прийоми підвищення біопотенціалу насіння на основі використання електромагнітного випромінювання.

Порівняно з існуючими дослідженнями у підготовці високоякісного насіннєвого матеріалу заплановано отримання залежностей динаміки насінин в робочих зонах розроблених пневмосепарувальних каналів з попереднім розшаруванням сумішей, нових решіт з активаторами просіювання в насіннєочисних машинах, робочих поверхонь пневмостолів з ініціаторами, каналів електромагнітних сепараторів. Нова технологія передбачає інтенсифікацію процесів насніннєочисних машин, калібрувальників та пневмостолів, яка, на відміну від відомих досліджень, враховує фізико-механічні та геометричні властивості насіннєвих матеріалів, а також параметри робочих органів, дозволить отримати повноцінне відкаліброване насіння з поліпшеними посівними властивостями.

Підготовка високоякісного насіннєвого матеріалу базується на його знезаражені, захисту проростків від зовнішніх патогенних чинників і підвищення стійкості до них, а також стимулювання зростання і розвитку рослин як в період проростання насіння, так і в продовж

всієї вегетації. Це досягається, як класичними хімічними методами: протруєння насіння, обробка регуляторами росту тощо, так і за допомогою фізичних методів: барботування, термічна обробка, електромагнітне випромінювання - Katsenios N., 2020. Хімічні методи негативно впливають на довкілля і людину, на відміну від електромагнітного випромінювання яке супроводжується екологічною чистотою, технологічністю, що важливо в сучасних умовах високого антропогенного навантаження на довкілля - Govindaraj M., (2017). Більшість досліджень електромагнітного випромінювання мають суперечливі данні, які спрямовані на вивчення результату безпосередньо одразу після опромінення або протягом доби – Deyue Yang, 2016. Пролонговані ефекти дії електромагнітного випромінювання досі вивчені не достатньо. Перевагами методу, що пропонується, в порівнянні з вже існуючими, є ефективність, відсутність негативних явищ навколишнього середовища, проблем шкідників та хвороб ґрунту, комфортність вирощування, економічність та низька енергоємність. В результаті виконання даного проєкту буде теоретично обґрунтовано та експериментально доведено ефективність передпосівної обробки насіння електромагнітним випромінюванням з метою поліпшення життєздатності насіння, ростових процесів та реалізації біопотенціалу.

4. ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ДЛЯ СУСПІЛЬСТВА ТА ЕКОНОМІКИ (до 100 рядків)

4.1. Визначити та обґрунтувати використання очікуваних результатів для конкретної галузі, потреб розвитку науково-технологічної сфери, вирішення світових проблем; довести відповідність потребам суспільства та економіки країни. Навести у Додатку 2 до цього Анотованого звіту результати проведених маркетингових досліджень щодо просування науково-прикладних результатів на світовий ринок, визначити потенційних замовників, навести у Додатку 3 до цього Анотованого звіту перелік реальних майбутніх користувачів, з якими вже встановлено попередні договірні стосунки.

4.2. Довести цінність результатів для підготовки фахівців у системі освіти, зокрема фахівців вищої кваліфікації. Відокремити використання очікуваних результатів від науково-методичних завдань, що виконуються викладачами у межах їх основної педагогічної діяльності. Навести у Додатку 4 до цього Анотованого звіту теми досліджень магістрантів (студентів), аспірантів і докторантів, кількість місяців їх роботи за темою з оплатою.

Кожен з напрямків дослідження, запланованих у проєкті, є перспективним з точки зору практичного використання результатів у селекційній практиці з метою підвищення посівних якостей насіння, врожайності та стійкості рослин до захворювань, підвищення біопотенціалу сорту шляхом активізації метаболічних процесів та резервів, калібруванню та відбору найбільш цінних, фізіологічно дозрілих насінин для посіву та вдосконалення процесів післязбиральної обробки насіннєвого матеріалу.

Проведені дослідження дозволять запропонувати сільськогосподарським підприємствам теоретично-обґрунтовані, прості у використанні, екологічно-чисті та економічно-вигідні методики підвищення посівних якостей насіння, врожайності. Це дозволить значно оптимізувати технології вирощування продуктів рослинництва.

Машинобудівним заводам, виробникам сільськогосподарської продукції, насіннєвим станціям та іншим установам будуть запропоновані науково-технічні розробки, практичні рекомендації методи передпосівної обробки насіння з метою підвищення життєздатності та реалізації біопотенціалу насіння сільськогосподарських культур. Серед потенційних замовників результатів досліджень (листи додаються) присутні машинобудівні заводи ПРАТ «Карлівський

машинобудівний завод» (м. Карлівка, Полтавська обл.) та ПРАТ «ХПМ» (м.Харків); установи, що спеціалізуються в області насінництва: науково-дослідний інститут овочівництва та баштанництва УААН (м. Харків), Державне підприємство «Дослідне господарство «Елітне» Інституту рослинництва імені В.Я.Юр'єва.

В процесі реалізації проєкту будуть створені експериментальні лабораторні та виробничі зразки універсальних технологічних засобів калібрування та обробки насіння сільськогосподарських культур у технологічних процесах його підготовки; проєкт технологічної лінії підготовки насіння культурних рослин для формування адаптивного рослинництва районованих насіннєвих культур. Заплановані розробки при впровадженні сприяють підвищенню ефективності і культурного рослинництва та вирішення екологічних проблем національних агроландшафтів, сприяють збільшенню урожайності та отриманню приросту рослинницької сільськогосподарської продукції.
Запропоновані дослідження дозволять отримувати економічний ефект за рахунок:
1. Впровадження розробок та закінчених методик на машинобудівних підприємствах.
2. Впровадження практично-методичних, теоретично-обґрунтованих, екологічно-чистих та економічно-вигідних методик та рекомендацій щодо поліпшення біопотенціалу на сільськогосподарських підприємствах, наукових установах які займаються дослідженням та виробництвом якісного насіннєвого матеріалу.
3. Забезпечення якісним насінням виробництво продукції рослинництва в Україні та збільшення експорту власного насіння.
4. Зменшення експлуатційних витрат на обробку насіннєвих сумішей.

Проєктом передбачено створення концептуальних науково-технічних рішень післязбиральної та передпосівної обробки насіннєвих сумішей пшениці, кукурудзи, гороху, соняшнику та дрібнонасіннєвих овочевих культур. Використані підходи математичного моделювання та теоретичного визначення параметрів та режимів процесів калібрування насіннєвих матеріалів та їх обробки електромагнітним випромінюванням є оригінальними та будуть корисні при дослідженнях руху сипких середовищ, визначенню впливу випромінювання на інші біологічні об'єкти. Визначені за проєктом аналітичні і експериментальні напрацювання є інноваціними та складуть базу для подальшого можливого удосконалення насіннєочисних машин, обладнання для випромінювання, технологій підготовки посівного матеріалу сільськогосподарських культур тощо. У результаті виконання проєкту будуть створені нові методи та отримані нові наукові результати світового рівня, окреслені шляхи подальших досліджень, що сприятимуть подальшому розвитку вітчизняної науки.
Отримані результати за проєктом будуть використані в навчальних процесах Державного біотехнологічного університету, Львівського національного аграрного університету. Планується підготовка нових та удосконалення лекційних курсів та циклів лабораторних робіт з дисциплін: «Екобезпека аграрного виробництва», «Технологія вирощування продуктів рослинництва», «Наукове обґрунтування параметрів процесу очищення зернових сумішей», «Сучасні аспекти первинної переробки продукції рослинництва», «Електротехнології в АПК».
Використання розроблених теоретично-методичних положень дозволило підсилити забезпечення навчального процесу, підвищити рівень виконання студентами курсових, дипломних та магістерських робіт, сприятиме зростанню професійного рівня майбутніх фахівців за спеціальністю «агроінженерія», «машинобудування» «агрономія».
За матеріалами роботи планується:
а. захист докторської дисертації Бредихіна В.В. на тему «Теоретичні основі вібропневмовідценрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння»;

б. захист магістерських робіт на теми: «Обгрунтування впливу низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання для активації росту та розвитку сільськогосподарських культур»; «Обгрунтування параметрів процесу калібрування насіннєвого матеріалу зернових культур на вібросепараторах», «Обгрунтування параметрів процесу розділення насіннєвого матеріалу зернових культур на густиною».

а. Будуть запропоновані методичні рекомендації для виробництв «Особливості ефективної післязбиральної та передпосівної обробки насіння».
б. Для оптимізації конструктивно-технологічних, режимних параметрів обладання для післязбиральної обробки насіння створені математичні моделі та кінцеві математичні вирази, які здатні враховувати властивості насіннєвої суміші та узагальнені в методику інженерно-технологічного розрахунку.
в. Будуть запропоновані виробництву нові конструкторські рішення насіннєочисних машин та обладнання для електромагнітного випромінювання, в тому числі модернізований насіннєпровод сівалки для обробки насіння оптичним випромінюванням з метою активації біопотенціалу; макетний зразок для обробки оптичним випромінюванням насіння та рослин с.-г. культур в лабораторних умовах, макетний зразок універсального сепаратора для калібрування насіння.
г. На базі отриманих результатів досліджень будуть підготовлені оглядові статті, патенти, монографії по техніко-технологічним рішенням розроблення комплексу машин на основі інтенсифікації процесів калібрування насіннєвого матеріалу та його обробки електромагнітним випромінюванням. Опубліковані статті та допоміжні матеріали будуть передані потенційним замовникам.

5. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБКИ

(зазначати виключно доробок, серед авторів яких 50% і більше належать до колективу виконавців, визначеного у Таблиці 11. Оцінюючи наукові праці на відповідність меті, предмету та завданням дослідження або розробки, експерт має право не зараховувати їх у разі повної невідповідності).

5.1. Перелік опублікованих за темою статей в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus та/або Web of Science Core Collection (WoS) (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) відповідно до таблиці 2 *(окремо за кожною наукометричною базою)*

Таблиця 2

№ з/п	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців	Наукометрична база даних
1.	**Kovalyshyn S.**, **Myagkota S.,** Ptashnyk V., **Kharchenko S.,** Tomporowski A., Kiełbasa P. Investigation of the effect of pre-sowing electrical stimulation of winter rapeseed on its spectral-luminescent properties. Przeglad Elektrotechnicznythis link is disabled, 2022, 1(1), pp. 79–83. doi: 10.15199/48.2022.01.13	Scopus
2.	**Kharchenko, S.,** Samborski, S., Kharchenko, F., Pasnik, J., **Kovalyshyn, S., Sirovitskiy, K.** (2022). Influence of Physical and Constructive Parameters on Durability of Sieves of Grain Cleaning Machines. Advances in Science and Technology Research Journal, 22(6).	Scopus
3, 4	3. Serhii Stepanenko, Borys Kotov, Alvian Kuzmych, Viktor Shvydia, Roman Kalinichenko, **Serhii Kharchenko**, Taras Shchur, Sławomir Kocira, Dariusz Kwa´sniewski and Dariusz Dziki. To the Theory of Grain Motion in an Uneven Air Flow in a Vertical Pneumatic Separation Channel with an Annular Cross Section. Processes 2022, 10, 1929. https: //doi.org/10.3390/pr10101929 4. V.Olshanskyi, **S. Kharchenko**, F.Kharchenko, **S.Kovalyshyn,** T. Shchur, Y. Gabriel, P. Bałdowska-Witos, A. Tomporowski and Robert Kasner. About Calculation	Scopus

	and Forecast of Temperature in the Layer Cell of Self-Heating of Raw Materials in a Silo. Sustainability 2022, 14, 14362. https://doi.org/10.3390/su142114362	

Анотації статей українською мовою, які представляють основні результати дослідження або розробки, навести у Додатку 5 до цього Анотованого звіту

5.2. Перелік опублікованих англомовних статей та тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються у наукометричній базі Scopus або WoS (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) відповідно до таблиці 3 *(окремо за кожною наукометричною базою)*

Таблиця 3

№ з/п	Повні дані про статті та тези доповідей з веб-адресою електронної версії; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців	Наукометрична база даних
1.		

5.3. Перелік опублікованих статей, у журналах що входять до переліку фахових видань України *(окремо статті у журналах, що рекомендовані секціями Наукової ради МОН)*, а також статей у закордонних журналах, які не увійшли до підпунктів 1 і 2 пункту 5, відповідно до таблиці 4

Таблиця 4

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців
1.	**Харченко С.**, Харченко Ф., **Панкова О., Бакум М., Харченко Д.** Ідентифікація властивостей насіннєвих сумішей при їх поділі на вібровідцентрових решетних сепараторах // Вісник СНАУ, 2022. - №2 (48). – С.83-87.
2.	**Панкова О., Сировицький К., Харченко С.,** Оничко В., Тарельник В., Думанчук М. Підготовка насіннєвого матеріалу кукурудзи електромагнітним випромінюванням на різних режимах як спосіб підвищення врожайності // Вісник СНАУ, 2022. - № 2(48). – С.50-55.
3.	**Kharchenko S., Kovalyshyn S.**, Linov A, **Abduev M.**, Kharchenko F., **Sirovitskiy K.** Identification of significant factors in the process of grain mixtures separation on cylindrical sieve. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry – 2022, Vol. 22, No. 1.
4.	V.Olshanskii, A. Olshanskii, **S. Kharchenko**, **S.Kovalyshyn**, F. Kharchenko5, **O.Pankova** About the dynamics of heterogeneous fine-grained mixture on a flat vibrosieve. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry – 2022, Vol. 22, No. 1.
5.	**Kharchenko, S.** Kharchenko, F./ Intensification of technological processes of equipment for post-harvest processing of grain. Study of reliability of sieves with complex shapes of holes. 1 st Workshop on Experimental and Computational Mechanics "WECM'22" + DIACMEC Canaletto Project Kick-off Meeting Lublin, Poland, June 1st 2022 – P.12.
6.	**S. Kharchenko,** V. Lytvynenko. Direction of efficiency increasing of seed materials pneumatic separation. Multidisciplinary conference for young researchers Sustainable Development in Wartime Ukraine and the World 25.11.2022 (Prague, Czech Republic).
7.	**S. Kharchenko,** F. Kharchenko. Evaluation of seeds damage during post-harvest handling. Multidisciplinary conference for young researchers Sustainable Development in Wartime Ukraine and the World 25.11.2022 (Prague, Czech Republic).
8.	**S. Kharchenko,** S. Sumborski. Reliability studies of sieves with holes of complex geometric shape. Multidisciplinary conference for young researchers Sustainable Development in Wartime Ukraine and the World 25.11.2022 (Prague, Czech Republic).
9.	**Pankova O., Kharchenko S., Sirovitskii K.** The influence of electromagnetic radiation on sowing qualities of agricultural crops // Book of Abstracts. Multidisciplinary conference for young researchers «Sustainable Development in Wartime Ukraine and the World». 25 November, 2022. Prague, Czech

	Republic.

5.4. Перелік опублікованих монографій відповідно до таблиці 5

Таблиця 5

№ з/п	Повні дані про монографії; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців
1.	

Анотації монографій українською мовою навести у Додатку 6 до цього Анотованого звіту.

5.5. Перелік опублікованих підручників, навчальних посібників, словників, довідників відповідно до таблиці 6

Таблиця 6

№ з/п	Повні дані про підручники, навчальні посібники, словники, довідників; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців
1.	

5.6. Перелік отриманих охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності України або інших країн (патенти, свідоцтва на право автора на твір) відповідно до таблиці 7

Таблиця 7

№ з/п	Повні дані про охоронні документи; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців
1.	Патент на КМ: UA 152095. B07B9/02 (2006.01). Спосіб підвищення якості очищення зернових сумішей пневматичним сепаратором. **Харченко С.О., Бакум М.В.,** Крекот М.М., Майборода М.М., **Ковалишин С.Й., Сировицький К.Г.,** Пташник В.В., **Гаєк Є.А.,** Литвиненко В.В., Нестер Б.В. u 2022 01926, заявл. 07.06.2022, опуб. 26.10.2022. Бюл.№43 – 5с
	1. заявка **u202201366** 28.04.2022 2. заявка u202201515 від 11.05.2022 3. заявка u202201610 від 18.05.2022 4. заявка . u202202764 від 02.08.2022

5.7. Створено та передано для використання поза межами організації-виконавця методик, технологій, зразків, проектної і конструкторської документації; інформаційно-аналітичні матеріали, рекомендації, пропозиції до органів влади тощо, зокрема на основі укладеного договору на науково-технічну продукцію, що підтверджується довідкою від бухгалтерії закладу вищої освіти (наукової установи) із зазначенням обсягів фінансування виконаних робіт відповідно до таблиці 8

Таблиця 8

№ з/п	Передані методики, рекомендації, пропозиції, інші документи; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців	З них на основі укладеного договору на науково-технічну продукцію	Обсяг фінансування за договором, тис. гривень
1.	Договір №4-21 ДП «Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності роботи пневмосепаратора ALMA-5» **Харченко С.О., Гаєк Є.А**.	ПраТ "Харківпродмаш" м. Харків	**15**
2	«Розробка науково-практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності процесу сепарування насіннєвих матеріалів».	Філія «Конотопський елеватор» ТОВ «Агро-Поліс», м.	**12**

	Харченко С.О., Харченко Ф.М., Герасименко В.О., **Харченко Д.О., Сировицький К.Г.**, Шуляк М.Л.	Конотоп, Сумська обл.	

5.8. Перелік захищених дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук та кандидата наук відповідно до таблиці 9

Таблиця 9

№ з/п	Інформація про дисертацію
1.	

Анотації дисертацій навести у Додатку 7 до цього Анотованого звіту.

5.9. Кількість грантів, за якими працювали виконавці дослідження або розробки, що фінансувались закордонними організаціями (з відповідним підтвердженням від закладу вищої освіти (наукової установи), посиланням на сайт грантового проекту або офіційним листом від грантодавця) відповідно до таблиці 10

Таблиця 10

№ з/п	ПІБ виконавців	Назва дослідження за грантом	Фінансування, тис. гривень
1.			

Короткий зміст (анотації) досліджень за грантами навести у Додатку 8 до цього Анотованого звіту

6. **ВИКОНАВЦІ ДОСЛІДЖЕННЯ АБО РОЗРОБКИ** (з оплатою в межах дослідження)
(навести у текстовому та табличному відповідно до таблиці 11 вигляді)
- доктори наук: _2__; кандидати наук: _3_;
- молоді вчені _3_, з них кандидатів _2_, докторів____; докторантів: ___; аспірантів_1;
- наукові працівники без ступеня _____;
- інженерно-технічні кадри: _____, допоміжний персонал _____;
- студенти _1_.

Р а з о м :__9__

Таблиця 11.

Виконавці дослідження або розробки* (з оплатою в межах дослідження або розробки)

№ з/п	Прізвище, ім'я, по батькові	Науковий ступінь	Вчене звання	Посада і місце основної роботи	Вік

* вносяться дані про всіх виконавців за весь час виконання дослідження або розробки, окрім допоміжного персоналу та студентів

7. **Рішення вченої (наукової, науково-технічної) ради** від _____ протокол № _____ щодо авершення дослідження або розробки

Керівник дослідження або розробки _____ В.В. Бродницький
(підпис) (ініціали, прізвище)

Проректор із наукової роботи

12

(Керівник наукової установи) _____ В.М. Михайлов
(підпис) (ініціали, прізвище)

М.П.

Додаток 1. Список основних публікацій закордонних та вітчизняних вчених, на які посилаються автори для доведення наукової новизни власних результатів

№ з/п	Повні дані про публікації
1.	

Додаток 2. Список потенційних замовників

№ з/п	Реквізити замовників, з якими велися переговори	Документи, якими зафіксовано переговори
1.	ПаТ «Завод Фрунзе» м.Харків	Акт впровадження результатів

Додаток 3. Список реальних замовників

№ з/п	Реквізити замовників, з якими укладено договори щодо передачі результатів дослідження або розробки, або документи, що підтверджують використання їх замовником	Документи, якими зафіксовано використання результатів
1.	ПраТ «Харківпродмаш» м.Харків	Договір №4-21 ДП
2	Філія «Конотопський елеватор» ТОВ «Агро-Поліс», м. Конотоп, Сумська обл.	Договір №

Додаток 4. Дані про магістрантів (студентів), аспірантів і докторантів, які працювали за темою з оплатою праці

№ з/п	ПІБ	Статус	Назва досліджень	Кількість місяців роботи з оплатою
1.	Пришляк Діана Валеріївна	магістр	Модернізація машино-апаратурної лінії короткорізанних макаронних виробів з борошна поліпшеної якості та розробкою механізму різання мініпресу	2
2	Харченко Дмитро Олександрович	аспірант	Обгрунтування параметрів процесу калібрування насіннєвих зернових матеріалів на барабанних сепараторах	1

Додаток 5. Анотації українською мовою статей у журналах, що входять у наукометричні бази Scopus та/або Web of Science Core Collection (WoS) (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) і представляють результати дослідження або розробки

№ статті у Таблиці 2	Анотації
1	Досліджено зразки ріпакової олії, отримані шляхом розчинення подрібненого насіння ріпаку в гексані (метод хімічної екстракції). Частину зразків насіння залишали без змін як еталон, іншу оброблювали електростатичним полем за напруженості E = (0,5 ÷ 2,5) кВ/см і t = 30с. Поведінка флуорофорів розчинів ріпакової олії в гексані, а саме токоферолу, фенолу, жирних кислот, вітамінів і пігментів дала інформацію про хімічний склад і структуру клітин досліджуваного насіння. Встановлено, що флуорофори розчинів ріпакової олії в гексані, приготованих із незабрудненого насіння та насіння, обробленого за напруженості електростатичного поля E = (0,5 ÷

	2,5) кВ/см і t = 30с, характеризуються однаковими спектральними характеристиками. люмінесцентні властивості. Спектрально-люмінесцентні властивості фенолів, токоферолів, жирних кислот, вітамінів і пігментів ріпакової олії, отриманої з необробленого та протруєного насіння, були однаковими незалежно від режимів його передпосівної обробки. Передпосівна електрообробка ріпаку електростатичним полем у цьому режимі не викликає змін хімічного складу і структури клітини, її жирнокислотного складу та вмісту вітамінів і пігментів. *The samples of rapeseed oil obtained by dissolving ground rapeseed in hexane (chemical extraction method) were studied. Portion of sample seeds was left unthreatened as the reference, another was treated by an electrostatic field at intensity of E = (0,5 ÷ 2,5) kV/cm and t = 30c. The behavior of fluorophores of solutions of rapeseed oil in hexane, namely, tocopherol, phenol, fatty acids, vitamins and pigments provided information on the chemical composition and cell structure of the studied seeds. It was established that the fluorophores of solutions of rapeseed oil in hexane prepared from unthreatened seeds and seeds treated at an electrostatic field intensity of E = (0,5 ÷ 2,5) kV/cm and t = 30c are characterized by identical spectral-luminescent properties. The spectral-luminescent properties of phenols, tocopherols, fatty acids, vitamins and pigments of rapeseed oil obtained from the untreated and treated seed, were identical, regardless of the modes of its pre-sowing treatment. Presowing electric treatment of rapeseed by an electrostatic field in this mode does not cause changes in the chemical composition and structure of the cell, its fatty acid composition and the content of vitamins and pigments.*
2	Наведено вплив параметрів технологічного навантаження, властивостей зерносумішей та конструктивних параметрів сит на величини утворених еквівалентних напружень та їх довговічність. Зміну еквівалентних напружень досліджували як на серійних ситах з базовими трикутними отворами, так і на ситах з активаторами – інноваційними отворами у формі епіциклоїди. Для прогнозування довговічності перфорованих сит використовується метод кінцевих елементів на основі продукту Pro/ENGINEER і даних досліджень. Встановлено, що використання активаторів на ситах, завдяки їх інноваційним формам, підвищує довговічність перфорованого сита на 12,3 %. Розроблена методика дозволяє аналізувати різні конструкції отворів сита за критерієм їх довговічності. *The influence of parameters of technological loading, properties of grain mixes and constructive parameters of sieves on the values of the formed equivalent stresses and their durability is given. The change in equivalent stresses was studied both on serial sieves with basic triangular holes and on sieves with activators – innovative holes in the form of an epicycloid. Finite element method based on Pro/ENGINEER product and research data is used to predict the durability of perforated sieves. It was found that the use of activators on sieves, due to their innovative forms, increases the durability of the perforated sieve by 12.3 %. The developed technique allows to analyze different designs of sieve openings by the criterion of their durability.*

Додаток 6. Анотації українською мовою до монографій, які представляють результати дослідження або розробки, і наведені у Таблиці 5

№ монографії у Таблиці 5	Анотації

Додаток 7. Анотації захищених виконавцями дослідження або розробки дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук та кандидата наук, що наведені у Таблиці 9

№ з/п	Назви дисертацій та їх анотації
1.	

Додаток 8. Короткий зміст (анотації) досліджень за грантами, що наведені у Таблиці 10

№ з/п	Назви досліджень за грантом та їх анотації
1.	

Керівник дослідження або розробки _____ В.В. Бредихін
(підпис) (ініціали, прізвище)

ДОДАТОК Д
ПРОТОКОЛИ ВИПРОБУВАНЬ

Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України

Державна наукова установа
«Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого»
(УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого)

Харківська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Випробування з метою достовірного висвітлення споживчих характеристик та сприяння реалізації сільськогосподарської техніки (Focus-test)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ХФ УкрНДІПВТ
ім. Л. Погорілого
_____ С. А. Лебедєв
«1» лютого 2021 р.

ХАРКІВСЬКА філія УКРНДІПВТ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 33894362

ПРОТОКОЛ № 05-04Ф-2021 від 1 лютого 2021 року

РЕШЕТО З ОТВОРАМИ У ФОРМІ ОВАЛУ КАССІНІ

Визначення ефективності просіювання сипких матеріалів через отвори решета

1. Опис виробу

Решета виготовлено із листової холоднокатаної сталі за ГОСТ 16523, шляхом штампування і мають отвори інноваційної геометрії у формі овалу Кассіні. Застосування решіт з отворами у формі овалу Кассіні, замість класичних круглих базових отворів, призводить до збільшення пропускної спроможності решета. Задача вирішується шляхом того, що отвори, запропонованої форми, мають змінний перетин. Це надає частинкам матеріалу простір для маневрування із урахуванням взаємних зіткнень між частинками, що знижує заклинювання у отворах до мінімуму. Також, змінний переріз перетину, запропонованого отвору, дає можливість усереднювати різноманітність форми частинок

матеріалу. За рахунок плавного хвильового переходу однієї половини овалу у другу травмування частинок у вигляді механічних здирань зведено до мінімуму .

Дослідні зразки решіт с отворами у вигляді овалу Кассіні було виготовлено підприємством «ТОРКРЕТМАШ», м. Харків.

2. Призначення виробу

Решето з отворами у вигляді овалу Кассіні належить до технічних засобів для очищення і розділення сипких матеріалів. Розділення (сепарація) компонентів сипких матеріалів відбувається за розміром та формою частинок суміші. Решето може використовуватися у масложировій, мукомельній, елеваторній, круп'яній, комбікормовій, зернопереробній промисловості та насінництві.

3. Місце проведення випробувань: на території ПрАТ «Харківський комбікормовий завод», м. Харків, вул. Велика Панасівська, 236.

Для проведення досліджень було виготовлено чотири решета (рис. 1) з відповідними отворами (ширина решета – 770 мм., довжина 990 мм.) розташування отворів виконано зі зміщенням рядів друг відносно друга. Розміри отворів: b24мм. (12*8*24, 12мм. – діаметр одного з фокусів отвору; 8 мм – розмір «талії» отвору; 24 мм – довжина отвору) величину t було обрано мінімально допустимою – (розмір менше, суттєво знижує характеристики надійності решета) m_o та m виконано 10 мм.

Комплект решіт встановлено на сепаратор БСХ – 100

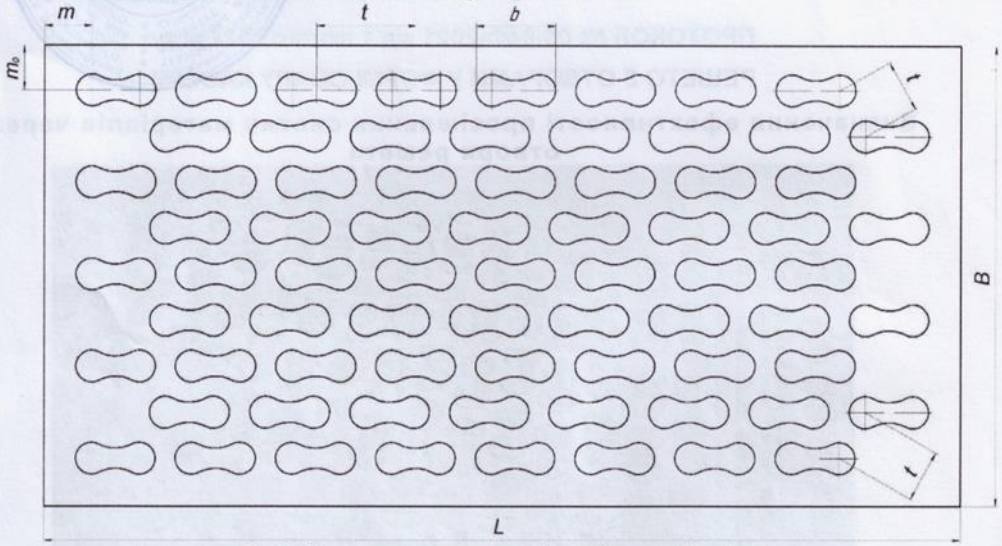


Рис.1. Решето с отворами у формі овалу Кассіні

Вид кліматичного виконання "У", категорія виробу 1 згідно з ГОСТ 15150

4. Метод випробувань

Випробування проводились на серійному зерноочисному сепараторі БСХ-100.

Метою випробувань було порівняльне визначення ступеню забиваємості отворів решіт двох зразків (перфорація с круглими отворами Ø12 та з отворами у формі овалу Кассіні з діаметром кожного фокусу Ø12) при змінній експлуатаційній продуктивності сепаратора БСХ-100. Технічні характеристики сепаратора БСХ-100 наведено у таблиці 1.

При визначенні експлуатаційної продуктивності сепаратора БСХ-100 при очищенні

партій кукурудзи було обрано три показники: вологість, об'ємна маса та вміст важко відокремлюваних (сміттєвої і зернової) домішок у партії зерна, що оброблюється.

Продуктивність сепаратора БСХ-100 визначали за формулою:

$$Q = Q_П * K * 0,6 \text{ , т/г} \quad (1)$$

де: $Q_П$ – паспортна продуктивність машини при очищенні (інструкція з експлуатації БСХ.РЭ, м. Хорол - 2003);

К – коефіцієнт, що залежить від культури зерна, вологості, вмісту домішки, яка відокремлюється (табл. 2);

0,6 – відношення фактичної продуктивності до паспортної при очищенні зерна.

Об'ємна маса кукурудзи варіювалась залежно від партії 680 до 820 кг/ вологість кукурудзи варіювалась у межах від 16 до 25%. Вміст домішок, що відокремлювались, від 3 до 10%. Відповідно експлуатаційна продуктивність машини БСХ-100, завдяки неоднорідності партій, змінювалася від 33 до 54 т/г.

Ступінь забиваємості отворів решіт (округлі і у формі овалу Кассіні) визначалась, після одинадцяти годин безперервної роботи сепаратора БСХ-100, у елеваторному режимі на етапі попередньої очистки. Машину зупиняли виймали верхній ярус решітних рамок, лист перфорації різної геометрії прикручений до рамки. Конструктивно кожну решітну рамку розділено на сектори. Загальна кількість секторів на рамці – 15 штук. Після кожної зміни, неперервної роботи (11 годин) протягом 10 днів визначалося кількість забитих отворів. Знімалися покази кількості забитих отворів, загальна кількість отворів, сектори на яких виконувалися дослідження обирались довільно, у шаховому порядку, горизонтально та вертикально, по 3 сектори для одного дослідження. Отримані дані заносилися до таблиці 3. У таблиці 3 так само фіксувалося число, місяць та рік проведення дослідження. Для зручності фіксування даних, таблиці було виготовлено у вигляді стікера (10 шт.) на кожен день. Отримані дані маркером наносились на стікер, паперова етикетка вклеювалася у змінний журнал.

Після десяти разового зняття показань на підставі даних, які фіксувалися у таблиці 3, по кожному ситу окремо у відсотковому співвідношенні оптимізувався середній показник відношення забитих отворів до працюючих.

5. Результати випробувань

Решето з перфорацією круглої форми Ø12 на етапі попереднього очищення партій кукурудзи, різної вологості та засміченості, працювало на 87,62% з 100% можливих. Вперше застосоване решето з отворами нової геометрії (діаметром кожного фокусу Ø12) у формі овалу Кассіні працювало з 100% можливих на 98,48%.

Таблиця 1. Технічні характеристики сепаратора БСХ 100

№п\п	Найменування параметру	Значення показника
1	Встановлена потужність, кВт	1,5
2	Частота кругових коливань кузову, кол.\хв.	375
3	Радіус кругових коливань кузову, мм	10±2
4	Продуктивність технічна, т\г - попередня очистка	100

Таблиця 2. Коефіцієнт К

Кукурудза	При вологості, %														
	до 16			16-18			18-20			20-22			22-25		
	І вміст домішки (сміттєвої і зернової) %														
	до3	5	10	до3	5	10	до3	5	10	до3	5	10	до3	5	10
	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,55	0,55	0,55

* продуктивність сепаратора БСХ-100 залежно від вологості і вмісту домішок
- вологість 16-18% і вміст домішки (сміттєвої та зернової) 3-10% (100*0,9*0,6=54 т/г)
- вологість 18-20% і вміст домішки (сміттєвої та зернової) 3-10% (100*0,8*0,6=48 т/г)
- вологість 20 – 22 % і вміст домішки (сміттєвої та зернової) 3-10% (100*0,7*0,6=42 т\г)
- вологість 22-25 % і вміст домішки (сміттєвої та зернової) 3-10% (100*0,55*0,6=33 т/г)

Таблиця 3. Кількості забитих отворів по відношенню до загальної кількості отворів сектора решета

Число, місяць, рік.	Номер обраного сектора		Кількість забитих отворів сектора шт.		Загальна кількість отворів сектора шт.	
19.10.20	Кассіні	Кругле	Кассіні	Кругле	Кассіні	Кругле
	10	1	2	15	110	186
	11	5	1	12	110	186
	12	9	2	19	110	186

6. Коментарі за результатами випробувань

Решето з отворами у формі овалу Кассіні можуть використовуватися в зерноочисних машинах на зернопереробних підприємствах, замість базових решіт з круглими отворами, забезпечивши підвищення пропускної здатності.

Виконавці:

від ХФ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого:

Науковий співробітник _____ Г.О. Тетівник

від ХНТУСГ ім. Петра Василенка:

_____ С.Р. Тікунов

_____ В.В. Бредихін

_____ Н.В. Сметанкіна

від ПрАТ «Харківський комбікормовий завод»:

_____ В.А. Мезенцев

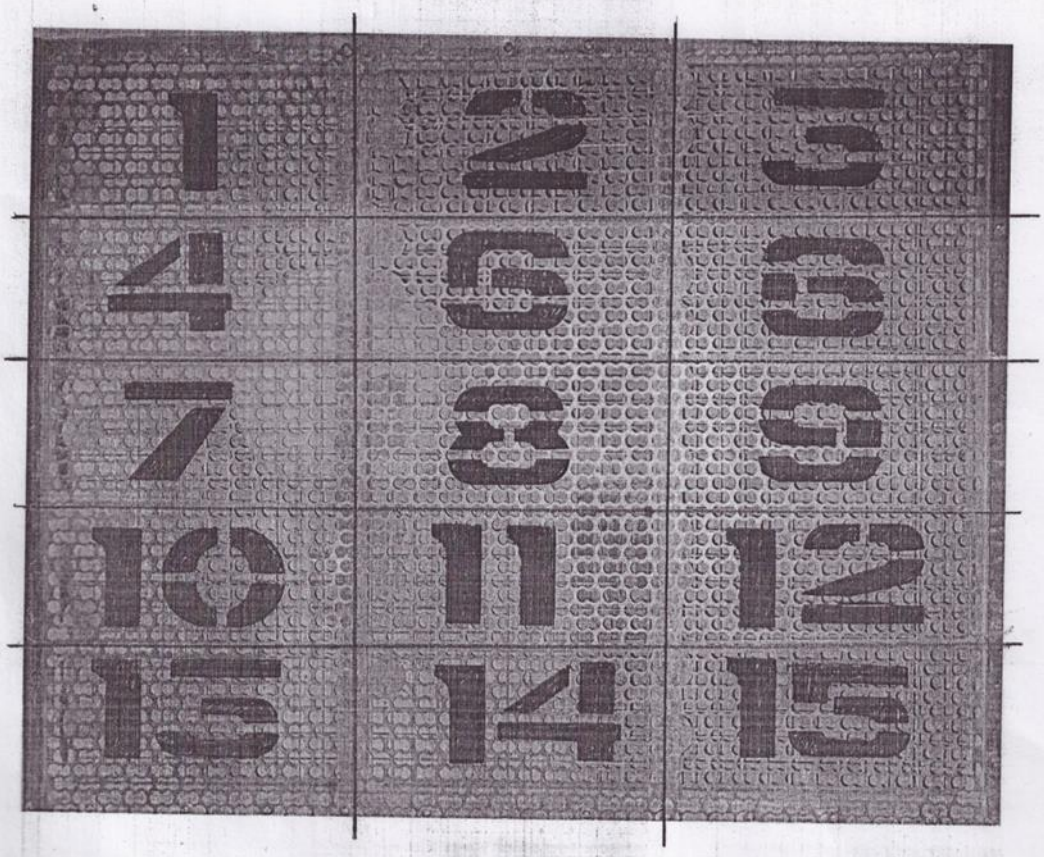


Рис.2. Решітна рамка з ситами овалу Кассіні(складається з 15 секторів у кожному секторі розташовано каучукові м'ячики)

ДОДАТОК Ж
ПАТЕНТИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 127393

ПРИЛАД ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.07.2018.**

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України М.І. Тітарчук

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508536

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **127393** (13) **U**

(51) МПК (2018.01)
B03B 4/00
B07B 4/08 (2006.01)
B07B 9/02 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2018 02685**
(22) Дата подання заявки: **16.03.2018**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.07.2018**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.07.2018, Бюл.№ 14**

(72) Винахідник(и):
Бредихін Вадим Вікторович (UA),
Мезенцев Владислав Олександрович (UA),
Черняєв Олександр Олександрович (UA)

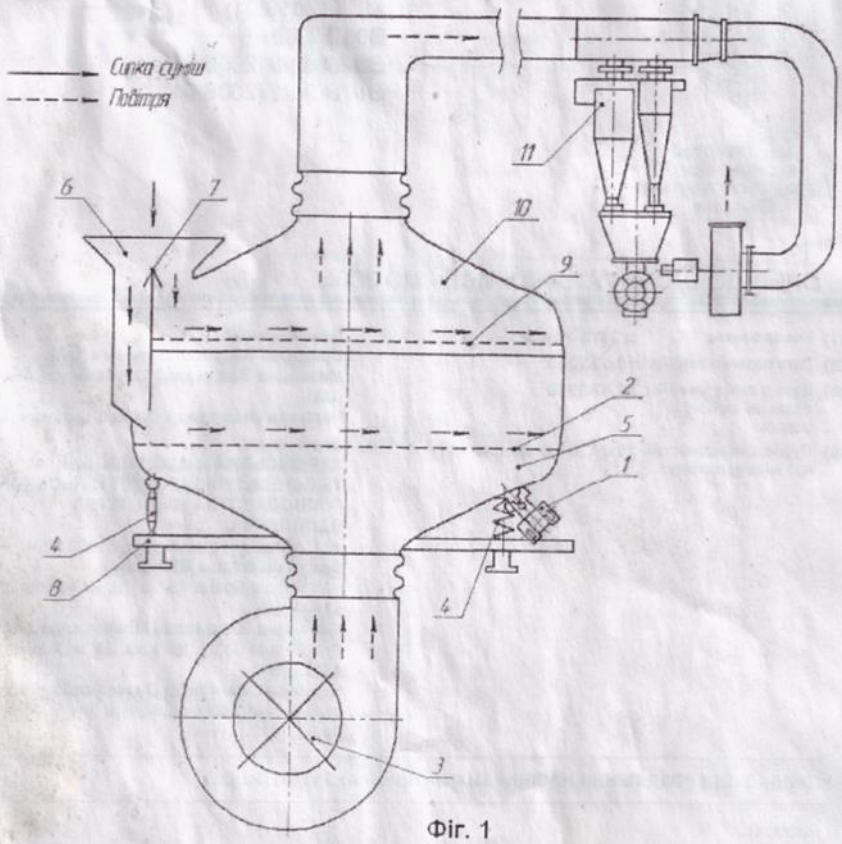
(73) Власник(и):
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА,
вул. Артема, 44, м. Харків, 61002 (UA),
Бредихін Вадим Вікторович,
вул. Героїв Праці, 15, кв. 78, м. Харків, 61144 (UA),
Мезенцев Владислав Олександрович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 29, м. Харків, 61135 (UA),
Черняєв Олександр Олександрович,
вул. Целіноградська, 52, гур. 3, к. 508, м. Харків, 61202 (UA)

(54) ПРИЛАД ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ

(57) Реферат:

Прилад для розділення насіннєвих матеріалів за густиною складається з двох розміщених одна над одною, похилих вібраційних поверхонь (дек), які продуваються повітряним потоком і виконують просторові коливання, повздовжніх і поперечних рифлів, що розташовані на робочій поверхні кожної деки, бункера подачі вхідного матеріалу на кожну деку окремо, приводу та приймачів продуктів розділення. Кожна дека має окремий вентилятор для подачі повітряного потоку.

UA 127393 U



Фіг. 1

Корисна модель належить до технічних засобів сепарації (сортування) насіннєвих матеріалів, зокрема зернових, зернобобових, овочевих культур і трав за густиною насіння.

Відомий прилад для розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння: пневматичний сортувальний стіл, що складається з ділильної площини - перфорованої деки, повітряної камери, вентилятора, що нагнітає повітря, привідного механізму. На матеріал, що подається на перфоровану деку, яка виконує просторові коливання, впливає повітряний потік, під дією якого матеріал набуває псевдорозрідженого стану і розділяється на шари, які різняться за густиною часток [1]. Основним недоліком цієї машини є порівняно невелика продуктивність.

Цей недолік усунуто в пристрої [2], який має дві, розташовані одна над одною, похилі вібраційні деки з загальним приводом. Подача повітря здійснюється одним вентилятором через два яруси столів.

Недоліками даного пристрою є нерівномірний розподіл повітряного потоку за всією площиною верхньої деки, внаслідок чого погіршується якість очищення і знижується продуктивність. Проте за кількістю схожих ознак дане рішення прийняте за прототип.

Задачею корисної моделі, що пропонується, є збільшення продуктивності приладів для розділення матеріалів за густиною часток.

Поставлена задача вирішується тим, що пневмосортувальний стіл включає дві, розміщені одна над одною, похилі вібраційні деки, подовжні і поперечні рифлі, які розташовано на робочій поверхні кожної деки, бункер подачі вхідного матеріалу на дві деки, привод та приймачі продуктів розділення. Відповідно до корисної моделі з метою збільшення продуктивності кожну деку забезпечено окремим вентилятором.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями де показано: фіг. 1 - схема приладу для розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння, вигляд збоку, фіг. 2 - схема приладу для розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння, вигляд зверху, нижня дека. фіг. 3 - схема приладу для розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння, вигляд зверху, верхня дека.

Конструкція, що запропонована, включає: збудник вібрацій 1, нижній вібраційний стіл НВ 2 (деку), нагнітальний вентилятор 3, вібраційні опори 4, корпус нижнього столу 5, живильник 6, заслінку, що регулює завантаження суміші 7, станину 8, верхній вібраційний стіл ВВ 9 (дека), герметичний корпус верхнього вібраційного столу ВВ 10, повітроочисний пристрій (циклон з вентилятором), що всмоктує 11, повздовжній риф НВ 12, поперечний риф НВ 13, пневматичний патрубок для всмоктування 14, торцевий поворотний клапан НВ 15, бічний поворотний клапан НВ 16, бічний приймач продуктів розділення НВ (важка фракція) 17, торцевий приймач продуктів розділення НВ (важка фракція) 18, приймачі продуктів розділення НВ (середня фракція) 19, приймачі продуктів розділення НВ (легка фракція) 20, поздовжній риф ВВ 21, поперечний риф ВВ 22, торцевий поворотний клапан ВВ 23, приймач продуктів розділення ВВ (важка фракція) 24, приймач продуктів розділення ВВ (середня фракція) 25, приймач продуктів розділення ВВ (легка фракція) 26.

Робочий процес розділення насіннєвих матеріалів за допомогою запропонованого приладу відбувається наступним чином.

Насіннєвий матеріал потрапляє до живильника 6, заслінка, що регулює подачу 7, дозволяє рівномірним шаром розподілити суміш по вхідній частині верхнього 9 та нижнього 2 вібраційних столів. Висхідний повітряний потік, що нагнітається вентилятором 3, пронизує деку НВ 2. Під дією повітряного потоку і гармонічних коливань насіннєвий матеріал переходить у псевдорозріджений стан. Легкі частки спливають до верхнього псевдорозрідженого шару, а важкі частинки (з більшою густиною) занурюються до нижнього шару і вступають в контакт з поверхнею деки та рифлями. Поперечні рифлі 13 відіграють роль інтенсифікаторів-сходинок по яких частки рухаються в напрямку приймачів продуктів розділення (важка фракція) 17, 18, а повздовжні рифлі 12 підштовхують суміш, тим самим пришвидшуючи процес розшарування. Під дією коливань нижнього вібраційного столу НВ 2, важкі частинки, що знаходяться у нижньому псевдорорзрідженому шарі, переміщуються до верхньої бічної стінки в бік приймача 18. При збільшені подачі насіннєвого матеріалу на стіл з метою збільшення продуктивності відчиняють бічний клапан 16 для збільшення швидкості руху важкої фракції до приймачів продуктів розділення 17. Частки з меншою густиною рухаються в протилежний бік в напрямку пневматичного патрубка для всмоктування 14 та потрапляють до приймача продуктів розділення 20. Пил і легкі домішки виділяються із загальної маси шляхом відсмоктування за допомогою пневматичного патрубка 14. Середні за густиною частки рухаються під дією коливань та механічної дії рифлів до приймача продуктів розділення 19.

Гармонічні коливання НВ і ВВ викликаються віброзбудником 1.

Корпус нижнього вібраційного столу 5, опирається через нижні вібраційні опори 4, на станину 8.

Верхній вібраційний стіл 9 розташовано в герметичному корпусі 10. Герметичний корпус з'єднано з повітроочисним пристроєм, що всмоктує 11, який складається з циклона і всмоктувального вентилятора. Пристрій 11 встановлено за межами машині. Віброзбудник 1 змушує верхній вібраційний стіл 9 виконувати зворотно-поступальні коливання. Під дією вібрацій і повітряного потоку суміш розпушується, важкі частки занурюються до нижнього шару і вступають в контакт з сепаруючою поверхнею, що вібрує. Зерновий матеріал набуває властивостей в'язкої рідини і "тече" в напрямку приймачів продуктів розділення. Важкі частки знаходяться у фрикційній взаємодії з декою і рухаються до приймачів продуктів розділення (важка фракція) 24. Середні за густиною частки займають центр деки і рухаються в напрямку приймачів продуктів розділення. 25. Частки з найменшою густиною притискаються до борту і переміщуються до приймача продуктів розділення 26. Для того, щоб суміш швидше переміщувалась по робочій поверхні в бік приймачів продуктів розділення, по всій робочій поверхні розташовані поперечні 22 і повздовжні 21 рифлі, що підштовхують важкі частки зернового матеріалу.

Для уникнення потрапляння важкої фракції до середньої, а середньої до легкої (перемішування шарів) передбачено торцевий поворотний клапан НВ 15 і торцевий поворотний клапан ВВ 23, що обертається навколо власної осі, стаючи на шляху суміші, що рухається, тим самим відсікаючи її від приймачів, які призначено для інших фракцій.

Кут нахилу робочих поверхонь позначено на фіг. 2 і фіг. 3 літерою F. Напрямок коливань вібраційних столів позначено на фіг. 2 і фіг. 3 літерою Е. Місце подачі зернового матеріалу на робочі поверхні столів на фіг. 2 і фіг. 3 позначено літерою А.

Рішення, що запропоновано, прийнятне для промислового використання. В інших джерелах інформації прилад для розділення зернових матеріалів за густиною з такими ознаками автори не виявили, тому просимо надати даному рішенню правовий захист.

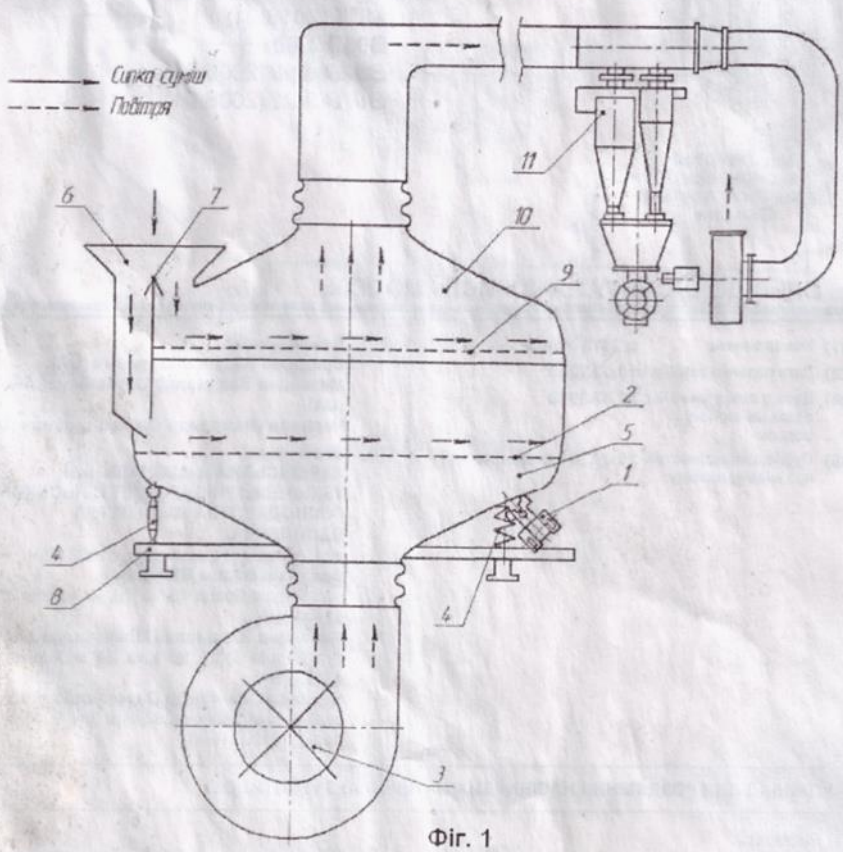
Джерела інформації:

1. Цециновский В.М., Птушкина Г.Е. Технологическое оборудование зерно-перерабатывающих предприятий. М., "Колос", 1976. - 169 с. (С.368).

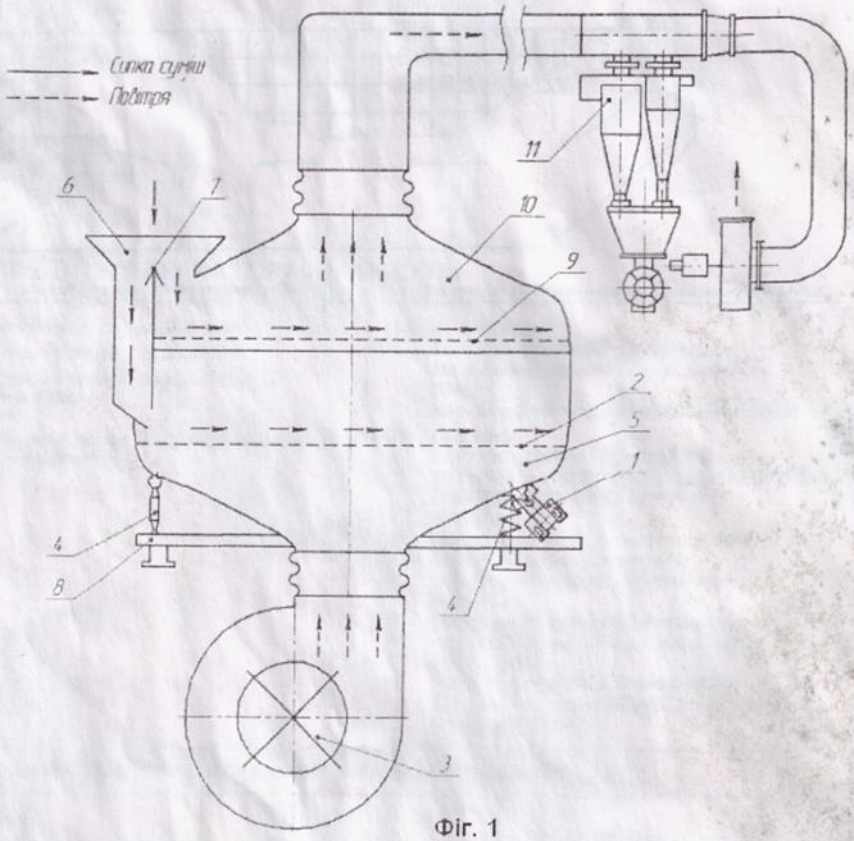
2. Авторське свідоцтво СССР SU 1480753, кл B03B 4/00, B07B 9/02, 1986.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

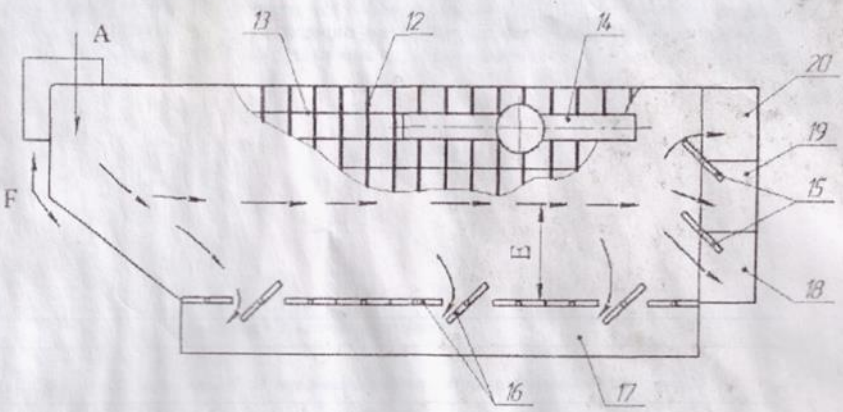
Прилад для розділення насіннєвих матеріалів за густиною, який складається з двох розміщених одна над одною, похилих вібраційних поверхонь (дек), які продуваються повітряним потоком і виконують просторові коливання, повздовжніх і поперечних рифлів, що розташовані на робочій поверхні кожної деки, бункера подачі вхідного матеріалу на кожну деку окремо, приводу та приймачів продуктів розділення, який **відрізняється** тим, що з метою збільшення продуктивності кожну деку забезпечено окремим вентилятором для подачі повітряного потоку.



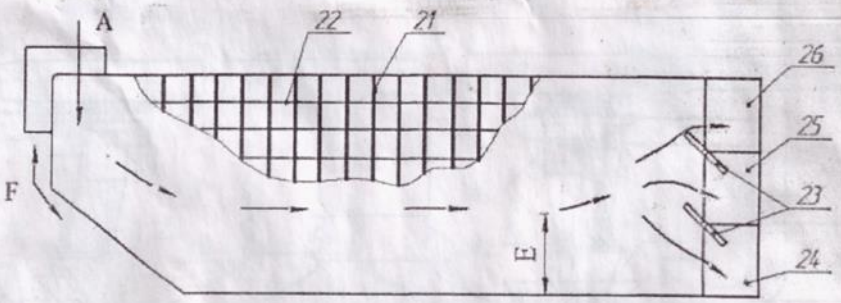
Фіг. 1


Суміш сушки
Повітря
11
6
7
10
9
2
5
1
4
8
4
3

Фіг. 1


A
13
12
14
20
19
15
F
E
18
16
17

Фіг. 2



Фіг. 3

Комп'ютерна верстка А. Крулевський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 133625

РЕШЕТО ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ З ОТВОРАМИ У ВИГЛЯДІ ОВАЛУ КАССІНІ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.04.2019.**

Заступник Міністра економічного розвитку і торгівлі України Ю.П. Бровченко

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

(11) **133625**

(19) **UA**

(51) **МПК**
B07B 1/46 **(2006.01)**

(21) Номер заявки: **u 2018 12181**

(22) Дата подання заявки: **10.12.2018**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.04.2019**

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **10.04.2019, Бюл. № 7**

(72) Винахідники:
Бредихін Вадим Вікторович, UA,
Сметанкіна Наталя Володимирівна, UA,
Мезенцев Владислав Олександрович, UA,
Черняєв Олександр Олександрович, UA,
Тікунов Станіслав Романович, UA

(73) Власники:
Мезенцев Владислав Олександрович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 29, м. Харків, 61135, UA,
Бредихін Вадим Вікторович,
вул. Героїв Праці, 15, кв. 78, м. Харків, 61144, UA,
Сметанкіна Наталя Володимирівна,
вул. Академіка Павлова, 311-а, кв. 18, м. Харків, 61168, UA,
Черняєв Олександр Олександрович,
вул. Целіноградська, 52, гур. 3, к. 508, м. Харків, 61202, UA,
Тікунов Станіслав Романович,
вул. Героїв Праці, 60-а, 21, м. Харків, 61135, UA

(54) Назва корисної моделі:

РЕШЕТО ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ З ОТВОРАМИ У ВИГЛЯДІ ОВАЛУ КАССІНІ

(57) Формула корисної моделі:

Решето, що містить перфоровану пластину з отворами, яке **відрізняється** тим, що отвори виконані у вигляді овалу Кассіні.

(11) **133625**

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 0951050419.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці http://base.uipv.org/searchInvStat/.

2. Виконати пошук за номером заявки.

3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту І.Є. Матусевич

10.04.2019

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508396

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

УКРАЇНА (19) UA (11) 133625 (13) U

(51) МПК
B07B 1/46 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 12181
(22) Дата подання заявки: 10.12.2018
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.04.2019
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.04.2019, Бюл.№ 7

(72) Винахідник(и):
Бредихін Вадим Вікторович (UA),
Сметанкіна Наталя Володимирівна (UA),
Мезенцев Владислав Олександрович (UA),
Черняєв Олександр Олександрович (UA),
Тікунов Станіслав Романович (UA)

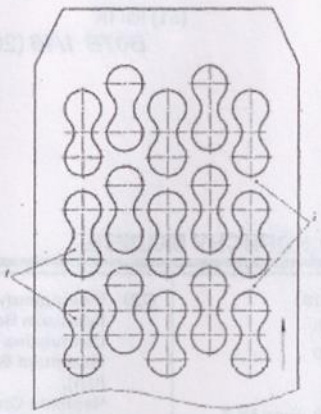
(73) Власник(и):
Мезенцев Владислав Олександрович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 29, м. Харків, 61135 (UA),
Бредихін Вадим Вікторович,
вул. Героїв Праці, 15, кв. 78, м. Харків, 61144 (UA),
Сметанкіна Наталя Володимирівна,
вул. Академіка Павлова, 311-а, кв. 18, м. Харків, 61168 (UA),
Черняєв Олександр Олександрович,
вул. Целіноградська, 52, гур. 3, к. 508, м. Харків, 61202 (UA),
Тікунов Станіслав Романович,
вул. Героїв Праці, 60-а, 21, м. Харків, 61135 (UA)

(54) РЕШЕТО ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ З ОТВОРАМИ У ВИГЛЯДІ ОВАЛУ КАССІНІ

(57) Реферат:

Решето містить перфоровану пластину з отворами. Отвори виконані у вигляді овалу Кассіні.

UA 133625 U



Фіг. 2

Корисна модель належить до технічних засобів для попереднього очищення зернового вороху. Розділення (сепарація) компонентів зернового вороху відбувається за розміром та формою частинок суміші. Такий пристрій може використовуватися в масложировій, мукомельній, елеваторній, круп'яній, комбікормовій, зернопереробній промисловості та насінництві.

Найбільш вживаними робочими поверхнями для попереднього очищення зернового вороху, за відмінністю розмірів та форми частинок, є решета з отворами у формі кола. Зерновий ворох переміщується шаром по робочій поверхні решета, компоненти суміші, ширина яких менша за діаметр отвору, проходять через отвори і потрапляють до прохідної фракції [1].

Недоліком таких решіт є недостатня проникність компонентів через його круглі отвори. Це пояснюється хаотичним переміщенням частинок вздовж поверхні решета. Частинка, що не встигла розташуватись довгою віссю перпендикулярно до площини решета, залишається на поверхні і потрапляє до сходової фракції, що значно знижує якість очистки.

Цей недолік усунуто у пристрої [2]. Решето виконано у формі кола воронкоподібної форми. Впадини навколо отворів покращують орієнтування частинок до отворів довгою віссю, перпендикулярно до площини решета, що дає можливість більшому відсотку часток необхідного розміру і форми потрапляти до прохідної фракції.

При сепарації сипких матеріалів на решетах з отворами у формі кола частинки суміші за розміром та формою мають практично стовідсотковий контакт з периметром отвору, що приводить до застрягання частинок у отворах і, тим самим, до зменшення пропускної спроможності решета.

Задачею корисної моделі, що пропонується, є збільшення пропускної спроможності решіт.

Поставлена задача вирішується тим, що у запропонованому решеті із замкненим перерізом отвору, згідно з корисною моделлю, отвори виконані у вигляді овалу Кассіні.

Овал Кассіні - крива четвертого порядку, яка є геометричним місцем точок М, добуток відстаней яких до двох заданих точок (фокусів) є сталою величиною і дорівнює квадрату деякого числа α. Графік овалу Кассіні показано на Фіг. 1.

Точка М - поточна точка овалу Кассіні; фіксовані точки F_1 та F_2 -фокуси овалу Кассіні з координатами α та α [3].

За означенням овалу Кассіні - добуток відстаней від фокусів до точки М дорівнює α.

Рівняння овалу Кассіні у полярній системі координат має вигляд [3]

$$r^2(\varphi) = c^2\left(\cos 2\varphi \pm \sqrt{\cos^2 2\varphi + \left(\lambda^4 - 1\right)}\right), \quad (1)$$

де λ- параметр кривої овалу Кассіні, який дорівнює відношенню двох незалежних параметрів;

$$\lambda = \frac{\alpha}{c} \quad (2)$$

α - корінь квадратний з добутку відстаней від фокусів до будь якої кривої; с -половина відстаней між фокусами.

Очевидно, що на форму кривої суттєво впливає відношення параметрів, а не їх розміри.

Для вибору раціональної форми отвору решета у вигляді овалу Кассіні необхідно, щоб крива овалу була гладкою і не мала кутових точок, які можуть привести до забивання отворів решета. Доведено [4], що така умова виконується, якщо значення параметру λ належить нерівності

$$1 < \lambda < \sqrt{2}. \quad (3)$$

Перепишемо нерівність (3) у вигляді

$$c < \alpha < \sqrt{2}c. \quad (4)$$

Для заданого значення X, в межах нерівності (3), побудуємо таблицю для визначення параметра с при вибраному значенні параметра α

Таблиця

λ	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4
c	0,952a	0,91a	0,87a	0,83 a	0,8a	0,75 a	0,74 a	0,714a

За допомогою представленої таблиці, можна побудувати решета з отворами, які відповідають розміру частинок суміші призначеної для попередньої очистки.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де: на фіг.1 наведено графік овалу Кассіні. На Фіг. 2 конструктивну схему запропонованого решета для попереднього очищення зернового вороху. Запропоноване сито із замкнутим перерізом отвору у вигляді овалу Кассіні, (Фіг. 2) включає отвори 1 і перемички 2, також на Фіг. 2 стрілка вказує, що найбільша вісь отвору співпадає з напрямом коливань решета, на Фіг. 3 - фрагмент виду збоку. Величина товщини "b" листа перфорованої пластини складає від 0,6 мм до 1,5 мм.

Під час роботи решета матеріал, що підлягає очищенню, переміщується по його робочій поверхні. Частинки матеріалу, розмір яких менше розміру отвору проходять у отвори у вигляді овалу Кассіні - проходова фракція. Частинки, розмір яких більше розміру отвору Кассіні переміщуються по поверхні решета і потрапляють до сходової фракції. Змінний перетин отвору дає частинкам місце для маневру з урахуванням взаємозіткнень між частинками, що знижує заклинювання у отворах до мінімуму. Також, змінний переріз перетину отвору, який виконаний у вигляді овалу Кассіні, дає можливість усереднювати різноманітність форм частинок матеріалу. За рахунок плавного хвильового переходу однієї половини овалу у другу (за умови, що значення параметру λ =1.05) травмування частинок у вигляди здирань зведено до нуля.

Корисна модель, яка пропонується, прийнята до промислового використання. В інших джерелах інформації пристрій, що належить до технічних засобів попереднього очищення зернового вороху, де як признак відокремлювання використовується різниця у формі та характеристики розмірів компонентів, з такими ознаками автори не виявили, тому просимо надати даній корисній моделі правовий захист.

Джерела інформації:

1.В.И.Горбатюк. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: "Колос",1999. - С. 32-33.

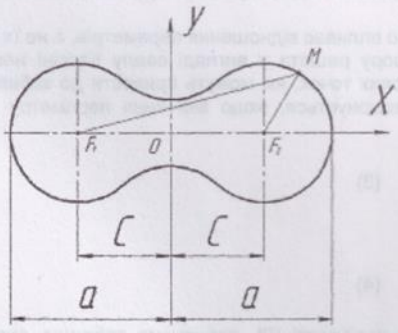
2.И.Г. Воронов, И.Е. Кожуховский, ПП. Колышев, Г.Т. Павловский. Очистка и сортировка семян. - М., 1959. - С. 287-288.

3.В.Н. Иванов. Овал Кассини, лемниската и лемнискатные поверхности. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2014. - № 5. - С. 3-9.

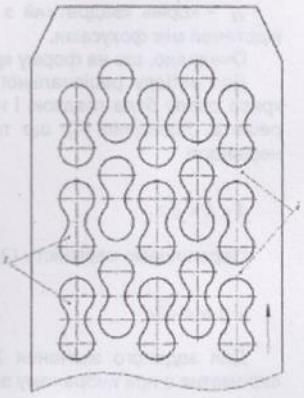
4.Математическая энциклопедия (в 5-и томах),. - М., 1982. - Т. 2. - С. 759

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

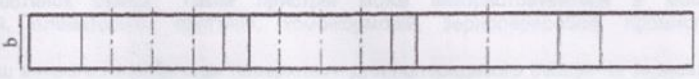
Решето, що містить перфоровану пластину з отворами, яке **відрізняється** тим, що отвори виконані у вигляді овалу Кассіні.



Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 150092

СИТО ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей **29.12.2021.**

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

А.В. Кудін

«УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ»
Ідентифікаційний код
31032378

(11) **150092**

(19) **UA**

(51) **МПК**
B07B 1/46 **(2006.01)**

(21) Номер заявки: **u 2021 04691**

(22) Дата подання заявки: **16.08.2021**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **29.12.2021**

(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **29.12.2021, Бюл. № 52**

(72) Винахідники:
Тікунов Станіслав Романович, UA,
Бредихін Вадим Вікторович, UA,
Сметанкіна Наталя Володимирівна, UA,
Мезенцев Владислав Олександрович, UA

(73) Володілець:
Тікунов Станіслав Романович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 21, м. Харків, 61135, UA,
Бредихін Вадим Вікторович,
вул. Героїв Праці, 15, кв. 78, м. Харків, 61144, UA,
Сметанкіна Наталя Володимирівна,
вул. Академіка Павлова, 311-а, кв. 18, м. Харків, 61168, UA,
Мезенцев Владислав Олександрович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 29, м. Харків, 61135, UA

(54) Назва корисної моделі:

СИТО ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

(57) Формула корисної моделі:

Сито, що містить перфоровану пластину, яке **відрізняється** тим, що отвори у вигляді овала Кассіні виконані лійкоподібними.

(11) **150092**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності».

Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 1146281221 необхідно:

1. Перейти за посиланням https://sis.ukrpatent.org.

2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документу.

3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документу та натиснути «Завантажити».

Уповноважена особа Укрпатенту І.Є. Матусевич

«УКРАЇНСЬКИЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ» Ідентифікаційний код 31032378

29.12.2021

УКРАЇНА (19) UA (11) 150092 (13) U
(51) МПК
B07B 1/46 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2021 04691
(22) Дата подання заявки: 16.08.2021
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 30.12.2021
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 29.12.2021, Бюл.№ 52

(72) Винахідник(и):
Тікунов Станіслав Романович (UA),
Бредихін Вадим Вікторович (UA),
Сметанкіна Наталя Володимирівна (UA),
Мезенцев Владислав Олександрович (UA)

(73) Володілець (володільці):
Тікунов Станіслав Романович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 21, м. Харків, 61135 (UA),
Бредихін Вадим Вікторович,
вул. Героїв Праці, 15, кв. 78, м. Харків, 61144 (UA),
Сметанкіна Наталя Володимирівна,
вул. Академіка Павлова, 311-а, кв. 18, м. Харків, 61168 (UA),
Мезенцев Владислав Олександрович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 29, м. Харків, 61135 (UA)

(54) СИТО ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

(57) Реферат:

Сито містить перфоровану пластину, згідно з корисною моделлю отвори у вигляді овала Кассіні виконані лійкоподібними.

UA 150092 U

Корисна модель належить до технічних засобів для калібрування сипких матеріалів. Калібрування матеріалів відбувається за розмірами та формою частинок матеріалу.

Пристрій може використовуватися у насінництві, зернопереробній, елеваторній, мукомельній, круп'яній, масложировій та комбікормовій промисловості.

Перфоровані плоскі пластини з отворами у формі кола є найбільш вживаними робочими поверхнями для калібрування сипких матеріалів. Калібрування здійснюється по принципу розділення матеріалу на дві фракції. Неочищений сипкий матеріал подається на ситовий стан який приводиться в коливання, приводним механізмом. Матеріал під дією вібрації рухається по нахиленому ситовому стану. Частинки, розмір яких менше діаметра отвору, проходять крізь отвори сита. Залишок сипкого матеріалу, розмір частинок яких більше розміру отвору сита, продовжує рух до протилежного краю сита[1].

Недоліком таких сит є значний контакт частки по довжині кола отвору, це створює несприятливі умови проходження частинок крізь круглі отвори сита та знижує пропускну спроможність сита за рахунок заклинювання часток клиноподібної форми (кукурудза, соняшник) у отворах круглої форми.

Недолік заклинювання усунуто у пристрої [2] із замкнутим перерізом отворів, який розроблено у вигляді овала Кассіні. Зниження заклинювання у отворах з формою овала Кассіні зведено до мінімуму за рахунок змінного перерізу отворів перфорації. Таке виконання дає частинкам місце для маневру усередині отвору і підвищує просіюваність сита.

Довільне розташування частинок матеріалу на перфорованій поверхні відносно отворів при калібруванні зернового матеріалу є значним недоліком, що знижує кількісний показник проходження частинок крізь отвори сита. Вільний рух часток по перфорованій плоскій поверхні позбавляє максимальної можливості збільшення ймовірності просіювання крізь отвори за рахунок виходу часток з отворів на поверхню сита протягом одного періоду коливання ситового стану машини, знижуючи якість калібрування.

В основу корисної моделі поставлена задача покращення якості калібрування зернового матеріалу.

Поставлена задача вирішується тим, що отвори у формі овала Кассіні у запропонованому пристрої виконано лійкоподібними.

Суть корисної моделі пояснюють креслення, де на фіг. 1 - наведено сито, вигляд згори, на фіг. 2 - переріз сита, на фіг. 3-4 принцип калібрування насіння на ситах з лійкоподібними отворами у формі овала Кассіні.

Перелік позначень на кресленнях.

t - відстань від центра одного отвору до центра іншого отвору;

b - ширина "талії" отвору;

Прилад працює наступним чином. Сито кріпиться на рамку, яку встановлюють під певним кутом нахилу до горизонту. При коливальному русі ситового стана, зерновий матеріал починає рухатись від верхнього краю сита до нижнього. Частинка, потрапляючи до лійки отвору, під дією коливань самоорієнтується довгою віссю перпендикулярно до площини сита, тим самим забезпечуючи спрямований рух насіння і збільшуючи ймовірність проходження крізь отвори поверхні. При цьому навантаження зерна на поверхні сита повинно бути забезпечено одним шаром. Крок t між центрами отворів підбирається мінімальним, для максимального збільшення перерізу сита. Ширина b - "талії" отвору забезпечує плавний хвильовий перехід, що знижує забиваність отворів.

Запропоноване рішення прийняте для промислового використання. У джерелах інформації прилад для калібрування сипких матеріалів за формою та розмірами частинок матеріалу з такими ознаками автори не виявили.

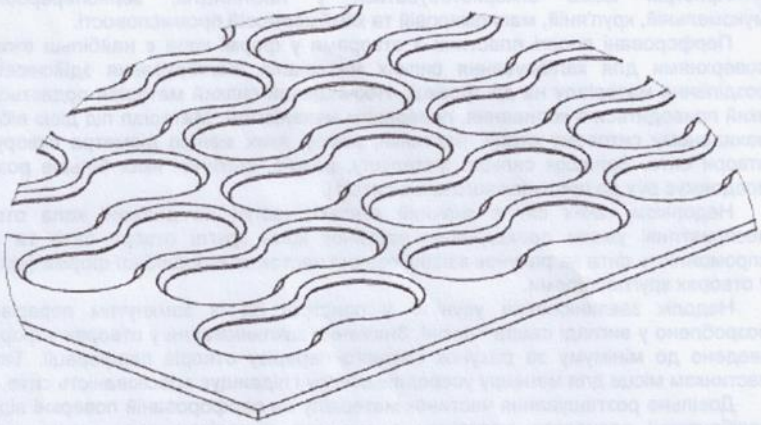
Джерела інформації:

1. Агроминимум. Киев 1954, 4-издание ГОССЕЛЬХОЗИЗДАТ УССР - С. 297-305.

2. Патент 133625 України, МПК B07B 1/46. Решето для очистки зернового вороху з отворами у вигляді овала Кассіні. В.В. Бредихін, Н.В. Сметанкіна, В.О. Мезенцев, О.О. Черняев, С.Р. Тікунов.

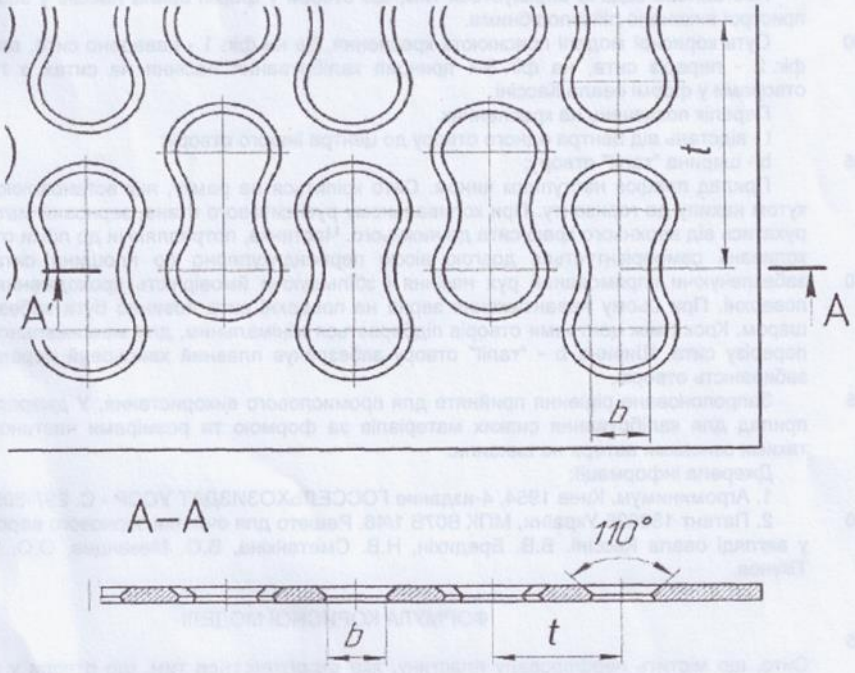
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Сито, що містить перфоровану пластину, яке **відрізняється** тим, що отвори у вигляді овала Кассіні виконані лійкоподібними.



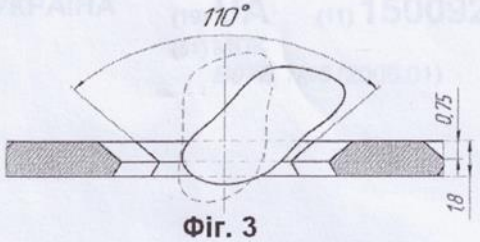
вигляд зверху

Фіг. 1

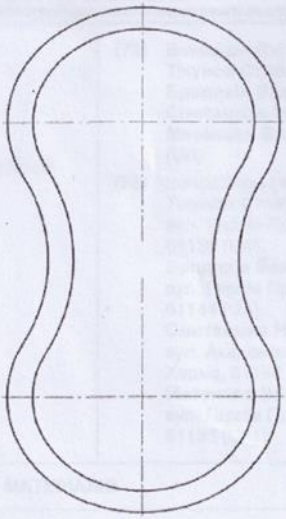


переріз сита

Фіг. 2



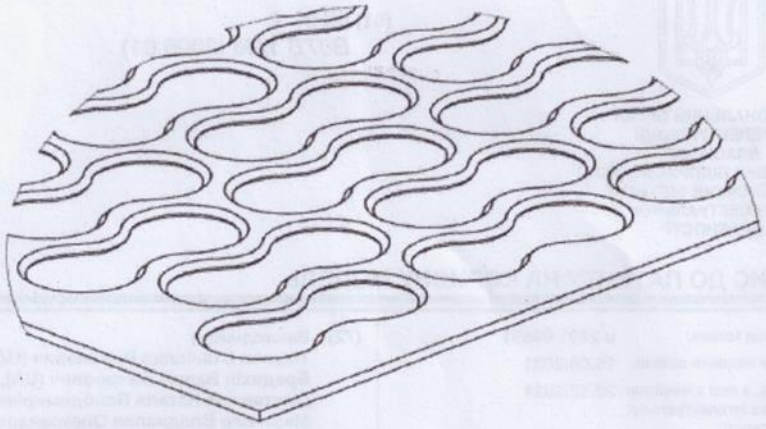
Фіг. 3



Фіг. 4

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



вигляд зверху

Фіг. 1

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 145733

ЖОЛОБЧАТЕ СИТО З ОТВОРАМИ У ВИГЛЯДІ ОВАЛУ КАССІНІ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей **28.12.2020.**

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності» А.В. Кудін

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ» Ідентифікаційний код 31032378

УКРАЇНА (19) UA (11) 145733 (13) U
(51) МПК
B07B 1/46 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2020 05599
(22) Дата подання заявки: 31.08.2020
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 29.12.2020
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 28.12.2020, Бюл.№ 24

(72) Винахідник(и):
Тікунов Станіслав Романович (UA),
Бредихін Вадим Вікторович (UA),
Сметанкіна Наталя Володимирівна (UA),
Мезенцев Владислав Олександрович (UA)

(73) Володілець (володільці):
Тікунов Станіслав Романович,
вул. Героїв Праці, 60-а, 21, м. Харків, 61135 (UA),
Бредихін Вадим Вікторович,
вул. Героїв Праці, 15, кв. 78, м. Харків, 61144 (UA),
Сметанкіна Наталя Володимирівна,
вул. Академіка Павлова, 311-а, кв. 18, м. Харків, 61168 (UA),
Мезенцев Владислав Олександрович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 29, м. Харків, 61135 (UA)

(54) ЖОЛОБЧАТЕ СИТО З ОТВОРАМИ У ВИГЛЯДІ ОВАЛУ КАССІНІ

(57) Реферат:

Сито містить перфоровану пластину з отворами у вигляді овалу Кассіні. Клинчасті жолобки розташовано між рядів отворів по усій довжині сита.

UA 145733 U

Корисна модель належить до засобів для калібрування зернового вороху. Калібрування вороху відбувається за формою та розмірами частинок матеріалу. Такий прилад може використовуватися у мукомельній, елеваторній, круп'яній, комбікормовій, зернопереробній промисловості та насінництві.

Сито з отворами у формі кола є найбільш вживаними перфорованими робочими поверхнями. Принцип технологічного процесу роботи сита полягає у поділі оброблюваного матеріалу на дві фракції за розмірами та формою. Матеріал під дією вібрації неперервно рухається по похилій поверхні від верхнього кінця сита до нижнього. Частки, розмір яких менше діаметру круглого отвору, проходять в отвори сита. Масу цих частинок називають проходовою, дрібною фракцією. Частки, розмір яких більше розміру отворів, рухаються по поверхні сита. Масу цих частинок називають сходом, крупною фракцією [1].

Недоліком таких сит є несприятливі умови проходження частинок через круглі отвори, а саме значний контакт насіння по довжині кола отвору, розмір якого наближається до розміру отвору сита. Це призводить до заклинювання насіння у круглих отворах, як наслідок зниження пропускної здатності сита.

Цей недолік усунуто у приладі [2]: сито із замкнутим перерізом отворів, які виконані у вигляді овалу Кассіні. Змінний перетин отворів дає часткам місце для маневру в середині отвору, що знижує заклинювання у отворах до мінімуму та підвищує пропускну здатність.

При калібруванні сипких матеріалів на ситах з отворами у вигляді овалу Кассіні значним недоліком є довільне розташування частинок на площині по відношенню до отворів. Такий вільний режим руху позбавляє можливості орієнтування частки по відношенню до отворів, знижуючи відсоток виділення проходової фракції та тим самим погіршуючи якість очищення.

В основу корисної моделі поставлено задачу покращення якості калібрування насіння.

Поставлена задача вирішується тим, що запропонований прилад виконано з отворами у формі овалу Кассіні та клинчастими жолобками, які розташовані між рядами отворів по всій довжині сита.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де на фіг. 1 - наведено сито, вигляд зверху, на фіг. 2 - загальний вигляд сита, на Фіг. 3 - переріз сита.

Перелік позначень на кресленнях

f - відстань від центру одного отвору до центра іншого отвору;

e - довжина отвору;

λ - номінальне значення "талії" овалу Кассіні;

m - ширина клинчастого жолобка;

h - товщина перфорації з клинчастими жолобками;

Прилад працює наступним чином. Сито встановлюють під певним кутом до горизонту. При зворотно поступальному русі сита насіння кукурудзи переміщуються у напрямку, вказаному стрілкою на фіг. 2, рух зерна в даному жолобку ізольовано від зерен, що знаходяться в суміжних жолобках. Рифи m забезпечують спрямований рух насіння, частка спрямовано рухається, не відриваючись від поверхні сита, довгою віссю уздовж жолобка т, стає на ребро, проходить через отвір e. Також рифи перешкоджають розповзанню зернового матеріалу у різні боки. Рух відбувається тільки у напрямку вниз. Висота клинчастого гребеню h вибирається такою, щоб центр ваги самого широкого зерна даної фракції не видавався над поверхнею жолобка. Таким чином, калібрування на цих ситах відбувається за найменшим розміром - товщині зерна. Величина товщини d листа перфорованої пластини складає від 0,6 до 1,5 мм. Крок f між центрами отворів підбирається мінімальнім, що б максимально збільшити перетин сита.

Вибір довжини отвору e сита у вигляді овалу Кассіні виконується за умови, якщо значення параметру λ належить нерівності

$$1 < \lambda < \sqrt{2}. \quad (1)$$

Рівняння овалу Кассіні у полярній системі координат має вигляд [3]

$$r^2(\varphi) = c^2\left(\cos 2\varphi \pm \sqrt{\cos^2 2\varphi + (\lambda^4 - 1)}\right), \quad (2)$$

де λ параметр кривої овалу Кассіні, який дорівнює відношенню двох незалежних параметрів;

$$\lambda = \frac{a}{c} \quad (3)$$

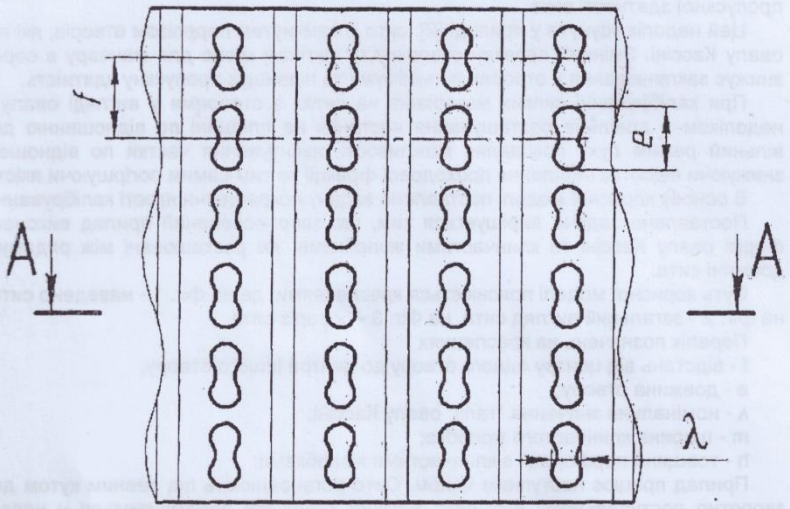
a - корінь квадратний з добутку відстаней від фокусів до будь-якої кривої; c - половина відстаней між фокусами.

Запропоноване рішення прийняте для промислового використання. У джерелах інформації прилад для калібрування зернового вороху за формою та розмірами частинок суміші з такими ознаками автори не виявили, тому просимо надати даному рішенню правовий захист.

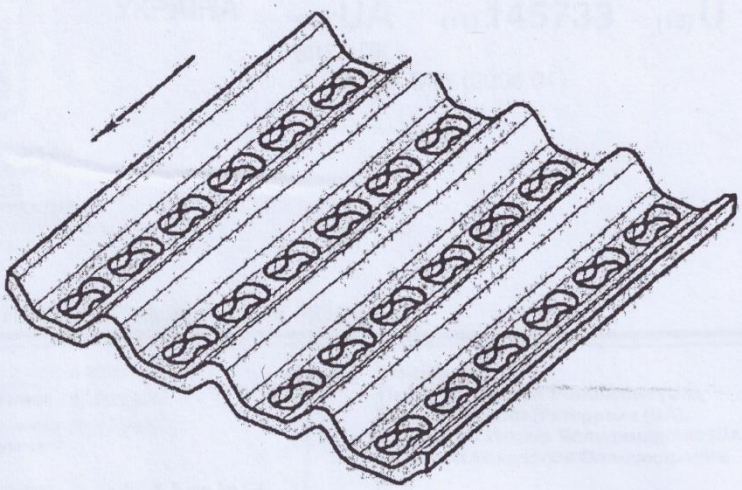
Джерела інформації:
1. И.А.Наумов. Технология мукомольного производства. М. 1958. С. 20-21.
2. Патент 133625 України, МПК B07B 1/46. Решето для очистки зернового вороху з отворами у вигляді овалу Кассіні. В.В.Бредіхін, Н.В.Сметанкіна, В.О. Мезенцева, О.О. Черняев, С.Р. Тікунов.
3. В.Н.Иванов. Овал Кассини, лемниската и лемнискатные поверхности. Строительная механіка инженерных конструкцій и сооружений, 2О14. № 5, С. 3-9.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

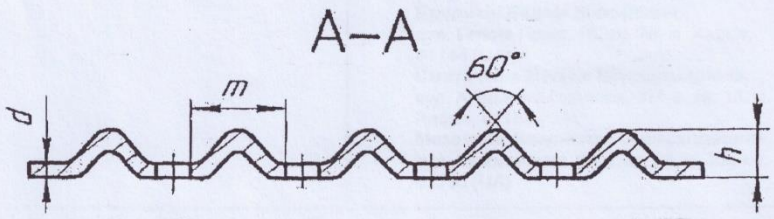
Сито, що містить перфоровану пластину з отворами у вигляді овалу Кассіні, яке **відрізняється** тим, що клинчасті жолобки розташовано між рядів отворів по усій довжині сита.



Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

(11) **145733**

(19) **UA**

(51) **МПК**
B07B 1/46 **(2006.01)**

(21) Номер заявки: **u 2020 05599**

(22) Дата подання заявки: **31.08.2020**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **29.12.2020**

(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **28.12.2020, Бюл. № 24**

(72) Винахідники:
Тікунов Станіслав Романович, UA,
Бредихін Вадим Вікторович, UA,
Сметанкіна Наталя Володимирівна, UA,
Мезенцев Владислав Олександрович, UA

(73) Володілець:
Тікунов Станіслав Романович,
вул. Героїв Праці, 60-а, 21, м. Харків, 61135, UA,
Бредихін Вадим Вікторович,
вул. Героїв Праці, 15, кв. 78, м. Харків, 61144, UA,
Сметанкіна Наталя Володимирівна,
вул. Академіка Павлова, 311-а, кв. 18, м. Харків, 61168, UA,
Мезенцев Владислав Олександрович,
вул. Героїв Праці, 60-а, кв. 29, м. Харків, 61135, UA

(54) Назва корисної моделі:

ЖОЛОБЧАТЕ СИТО З ОТВОРАМИ У ВИГЛЯДІ ОВАЛУ КАССІНІ

(57) Формула корисної моделі:

Сито, що містить перфоровану пластину з отворами у вигляді овалу Кассіні, яке **відрізняється** тим, що клинчасті жолобки розташовано між рядів отворів по усій довжині сита.

(11) **145733**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності».

Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 1357281220 необхідно:

1. Перейти за посиланням https://sis.ukrpatent.org.

2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документу.

3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документу та натиснути «Завантажити».

Уповноважена особа Укрпатенту І.Є. Матусевич

29.12.2020

ДОДАТОК З
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
голова правління
ПрАТ «ХКЗ»
_____Тібілов І.В.
«04» 10 2020р.
М.П.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
ректор ХНТУСГ ім..П.Василенка
_____Нанка О.В.
«04» 10 2020р.
М.П.

АКТ

Про впровадження закінченої науково дослідної, дослідно – конструкторської роботи

Ми, що нижче підписалися, представник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка в особі керівника науково дослідної (дослідно – конструкторської) роботи **Бредихіна Вадима Вікторовича** та представника приватного акціонерного товариства «Харківський комбікормовий завод», в особі голови правління **Тібілова Івана Володимировича** склали цей Акт про те, що результати науково – дослідної (дослідно - конструкторської) роботи на тему " Обґрунтування параметрів процесів сепарування сипких матеріалів повітряпроникними робочими поверхнями за густиною насіння ", що виконані кафедрою (лабораторією) «Фізики і теоретичної механіки» ХНТУСГ.
в період з 4 березня 2020 по 4 жовтня 2020 впроваджені у ПрАТ «ХКЗ».

У період з липня по жовтень 2020 шляхом використання робочих поверхонь циліндричної та плоскої форми на серійних зерноочисних сепараторах БЦС та ПСС було проведено порівняльне визначення якісних показників параметрів процесу сепарації за густиною насіння.

Впровадження результатів дослідження дало можливість підприємству (організації) отримати наступний техніко економічний ефект: *за квартал на одну зерноочисну машину 15085 гр. (п'ятнадцять тисяч вісімдесят п'ять гривень).*

Зауваження і пропозиції що до подальшої роботи з впровадження наукових розробок Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: *продовжити роботу по збільшенню продуктивності зерноочисних сепараторів та якості процесу розділення зернових матеріалів за густиною насіння.*

Даний Акт не є підставою для перерахунку підприємством фондів матеріального стимулювання.

Представник
підприємства
_____
(підпис)
«04» жовтня 2020

Представник
науковий керівник групи
_____
(підпис)
«4» жовтня 2020

Виконавці: Бредихін В.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Голова Правління ПрАТ ХМЗ
_____Михайло Міщенко
«__» жовтня 2023 р.
М.П.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____Михайлов В.М.
«__» жовтня 2023 р.
М.П.

АКТ

ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАКІНЧЕНОЇ НАУКОВО–ДОСЛІДНОЇ, ДОСЛІДНО–КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОБОТИ

Ми, що нижче підписалися, представник Державного біотехнологічного університету (м. Харків) в особі керівника науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи **Бредихіна Вадима Вікторовича** та представника ПрАТ ХМЗ, в особі Заступника Голови Правління по маркетингу і правової роботи Полуектова Геннадія Олексійовича, склали цей Акт про те, що результати науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи за темою «Оптимізація кінематичних режимів сепаруючих машин для підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу», що виконані співробітниками університету в період з «01» серпня 2023 року по «31» вересня 2023 року впроваджені у ПрАТ ХМЗ в складі виробу ПСС-3,5.Пневмосортувальний стіл.

У період з «01» серпня по «31» вересня 2023 року шляхом дослідження інтенсифікаторів хвилеподібного типу, розроблених Бредихіним Вадимом Вікторовичем, які встановлюються на робочу повітропроникну поверхню пневмосепарувальних столів, що включено до технологічної лінії з підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу, було проведено порівняльне визначення ефективності процесу підготовки насіння.

Результати дослідження прийнято для модернізації, удосконалення виробу ПСС-3,5.Пневмосортувальний стіл та буде використано в розробці більш потужного виробу ПСС-10.Пневмосортувальний стіл для підготовки насіннєвого матеріалу.

Зауваження та пропозиції що до подальшої роботи з впровадження наукових розробок Державного біотехнологічного університету: *продовжити роботу з покращення ефективності роботи зерноочисних сепараторів та якості процесу підготовки насіннєвих матеріалів.*

Даний Акт не є підставою для перерахунку підприємством фондів матеріального стимулювання.

Представник
підприємства
_____
(підпис)
«__» жовтня 2023
Геннадій Полуектов

Керівник
науково–дослідної групи
_____
(підпис)
«__» жовтня 2023
Бредихін В.В.

УЗГОДЖЕНО
В.о. директора
Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва
НААН
_____ Олег ЛЕОНОВ
«13 » вересня 2023 р.

УЗГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
Державного біотехнологічного університету
_____ Валерій МИХАЙЛОВ
«13» _____ 2023 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт в освітній процес закладів вищої освіти

Замовник Інститут рослинництва імені В.Я. Юр'єва НААН
(найменування організації)
в особі в.о. директора Інституту д.с/г.н. Леонова Олега Юрійовича

Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи:
«Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур»
(назва роботи)
виконаної на кафедрах: «Надійності та міцності машин і споруд ім. В.Я. Аніловича», «Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв»
впроваджено в процес сортування насіння зразків зернових колосових культур лабораторії генетичних ресурсів зернових, зернобобових і круп'яних культур
(найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження)

1. **Вид впроваджених результатів:** результати НДР включено до процесу підготовки якісного посівного матеріалу колекційних зразків
2. **Форма впровадження:** впроваджено в процес підготовки насіннєвого матеріалу для закладання в Національне сховище на довготривале збереження
3. **Новизна результатів науково-дослідних робіт:** якісно нове
(піонерське, принципово нове, якісно нове, модифікації, модернізація старих розробок)
4. **Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких впроваджено результати НДР:**
генетичні ресурси рослин, селекція, рослинництво
5. **Соціальний і науково-економічний ефект:** удосконалення підготовки насіння для подальшої репродукції та зберігання колекційних зразків для потреб вітчизняної селекції

Керівник НДР:
канд. тех. наук, професор
кафедри надійності та міцності машин
і споруд ім. В.Я. Аніловича
_____ **Вадим БРЕДИХІН**
«19» вересня 2023 р.

Завідувач лабораторії генетичних ресурсів зернових, зернобобових і круп'яних культур Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, канд.с.-г.наук, ст. науковий співробітник
_____ **Ольга БЕЗУГЛА**
«13 » вересня 2023 р.

УЗГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
Державного біотехнологічного університету
_____ Валерій МИХАЙЛОВ
«__» _____ 2023 р.

УЗГОДЖЕНО
Проректор з науково-педагогічної роботи
Державного біотехнологічного університету
_____ Максим СЕРІК
«__» _____ 2023 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт в освітній процес закладів вищої освіти

Замовник Державний біотехнологічний університет
найменування організації
В.о. ректора ДБТУ к.т.н. Кудряшов А.І.

Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи:
«Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур»
(назва роботи)

виконаної на кафедрах: «Надійності та міцності машин і споруд ім. В.Я. Аніловича», «Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв»

впроваджено в освітній процес кафедр: «Надійності та міцності машин і споруд ім. В.Я. Аніловича» та «Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв»
(найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження)

1. Вид впроваджених результатів: результати НДР включено до робочих програм дисциплін кафедр

2. Форма впровадження: впроваджено у навчальний процес здобувачів вищої освіти ІІ та ІІІ рівнів підготовки

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт: якісно нове
(піонерське, принципово нове, якісно нове, модифікації, модернізація старих розробок)

4. Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких впроваджено результати НДР:
- по кафедрі надійності та міцності машині споруд ім. В.Я. Аніловича, за дисциплінами «Надійність», «Технічна механіка» (спеціальність 133 – «Глузеве машинобудування; 208 – «Агроінженерія»; 131 – «Прикладна механіка»); по кафедрі обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, за дисциплінами «ФМВСГ», «Процеси та апарати», «МНРТСР» (спеціальність 133 – «Глузеве машинобудування;208 – «Агроінженерія»; 131 – «Прикладна механіка»).

5.Соціальний і науково-економічний ефект: *удосконалення методики підготовки здобувачів вищої освіти за вказаними дисциплінами*

Керівник НДР:
канд. тех. наук, професор
кафедри надійності та міцності машин
і споруд ім. В.Я. Аніловича
_____ **Вадим БРЕДИХІН**
«__» _____ 2023 р.

Завідувач кафедрою надійності та міцності машин і споруд ім. В.Я.Аніловича, канд. техн. наук., доцент
_____ **Максим СЛІПЧЕНКО**
«__» _____ 2023 р.

Завідувач кафедрою обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, докт. техн. наук., професор
_____ **Олексій БОГОМОЛОВ**
«__» _____ 2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПОГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____ *Валерій МИХАЙЛОВ*
М.П. « » _____ 2023 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
ФОП Знайдюк Василь
_____ *Василь ЗНАЙДЮК*
М.П. « » _____ 2023 р.

А К Т
ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник ФОП Знайдюк Василь
Знайдюк Василь Григорович
(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему № 26-23 ДП «*Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур*»
(найменування теми, № держ. реєстрації)
на кафедрі *надійності та міцності машин і споруд ім. В.Я. Аніловича*
вартістю *33600,00 грн (тридцять три тисячі шістьсот грн 00 коп.)*
(цифрами та прописом)
яка виконувалася з 01. липня 2023 р. по *30 вересня 2023 р.*
впроваджені *ФОП Знайдюк Василь Григорович*
(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів *впровадження рекомендацій з оптимізації режимних параметрів роботи пневмосортувальних столів*
(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження універсальне
(унікальне, одиночне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:
Методика (метод) *ефективного підбору оптимальних режимів роботи пенвмосортувальних столів в залежності від фізико-математичних властивостей матеріалу, що обробляється.*

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: *якісно-нові*
(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка *з 01 липня по 30 вересня 2023 року*
найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:
- в промислове виробництво *технологічна лінія підготовки насіннєвого матеріалу*
(участок, цех/и, процес)
- в проектні роботи _____
(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)
очікуваний один мільйон грн. _____
(від впровадження в проект)
фактичний один мільйон п'ятсот тис. грн. _____

8. Соціальний і науково-технічний ефект *удосконалення технологічної лінії*
(охорона навколишнього середовища, надр; оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВИКОНАВЦЯ
Керівник роботи
_____ *Вадим БРЕДИХІН*
(підпис) (ініціали, прізвище)

ВІД ПІДПРИЄМСТВА
ФОП Знайдюк Василь
_____ *Василь ЗНАЙДЮК*
(підпис) (ініціали, прізвище)

ДОВІДКА

щодо соціального ефекту від впровадження результатів

госпдоговірної теми № 26-23 ДП «*Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур*»

Соціальний ефект від виконання госпдоговірної теми «*Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур*» полягає в удосконаленні процесу технологічної лінії з підготовки насіннєвого матеріалу зернових культур

Директор …….. *Василь ЗНАЙДЮК*

Назва виконавця
Державний біотехнологічний університет (ДБТУ)
Адреса: 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, буд. 44
р/р UA688201720313251003201130739
Банк: ДКСУ м. Києва
МФО 820172
код ЄДРПОУ 44234755

Назва замовника
Фізична особа-підприємець Знайдюк Василь Григорович
Адреса: 15172, Чернігівська обл., Чернігівський район, село Макишин, вулиця Лугова, будинок 37
р/р UA773518230000026006500003962
Банк: АТ „Ощадбанк"
МФО 351823
код ЄДРПОУ 2939513055

А К Т

здачі-приймання послуг
за договором № 26-23 ДП від 01 липня 2023 р.
«*Розробка рекомендацій з оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур*»
(назва теми)

м. Харків «29» вересня 2023 р.

Ми, що нижче підписалися, представник виконавця в особі *проректора з наукової роботи Державного біотехнологічного університету Михайлова Валерія Михайловича* з однієї сторони, та представник замовника в особі *Фізичої особи-підприємця Знайдюка Василя Григоровича,* склали цей акт про те, що надані послуги задовольняють умовам договору та ТЗ.

Короткий опис наукових послуг: *проведено аналіз існуючих науково-технічних і технологічних рішень. Сплановано та проведено експериментальні дослідження. Надані рекомендації.*

Одержані результати: *отримано рекомендації з оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів пневмосортувальних столів та технології підготовки насіння зернових культур. Остаточний звіт.*

Ефективність роботи: *полягає в удосконаленні процесу технологічної лінії з підготовки насіннєвого матеріалу зернових культур.*

Договірна ціна складає згідно договору: *33600,00 грн (тридцять три тисячі шістьсот грн 00 коп), в т.ч. ПДВ 20% - 5600,00 грн.*
(прописом)

Загальна сума авансу, перерахована за виконані роботи склала: *33600,00 грн (тридцять три тисячі шістьсот грн 00 коп)*
(прописом)

Слід перерахувати за цим договором: 0,00 грн (нуль грн 00 коп)
(прописом)

Роботу здав:
Від виконавця
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____ *Валерій МИХАЙЛОВ*
М.П. «29» вересня 2023 р.
Науковий керівник теми
_____ *Вадим БРЕДИХІН*
«29» вересня 2023 р.

Роботу прийняв:
Від замовника
Фізична особа-підприємець
_____ *Василь ЗНАЙДЮК*
М.П. «29» вересня 2023 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ "БАТЬКІВЩИНА"
_____ Кутіль Б.І.
«__» _____ 2023 р.
М.П.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____ Михайлов В.М.
«__» _____ 2023 р.
М.П.

АКТ

ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАКІНЧЕНОЇ НАУКОВО–ДОСЛІДНОЇ, ДОСЛІДНО–КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОБОТИ

Ми, що нижче підписалися, представник Державного біотехнологічного університету (м. Харків) в особі керівника науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи **Бредихіна Вадима Вікторовича** та представника Товариства з обмеженою відповідальністю "БАТЬКІВЩИНА", в особі директора Кутіля Бориса Івановича склали цей Акт про те, що результати науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи за темою «Оптимізація кінематичних режимів сепаруючих машин для підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу», що виконані співробітниками університету в період з «01» серпня 2023 року по «31» вересня 2023 року впроваджені у виробництво.

У період з «01» червня по «31» серпня 2023 року шляхом використання розробленого Бредихіним Вадимом Вікторовичем математичного апарату для оптимізації кінематичних режимів зерноочисних сепараторів (пневмосепарувальних столів), що включено до технологічної лінії підготовки зерна, було проведено порівняльне визначення ефективності процесу підготовки насіннєвих матеріалів.

Впровадження результатів дослідження дало можливість підприємству (організації) отримати наступний економічний ефект: *за звітній період 24985 грн 00 коп. на одну машину (двадцять чотири тисячі дев'ятсот вісімдесят п'ять гривень 00 копійок.)*

Зауваження та пропозиції що до подальшої роботи з впровадження наукових розробок Державного біотехнологічного університету: *продовжити роботу з покращення ефективності роботи зерноочисних сепараторів та якості процесу підготовки насіннєвих матеріалів, включити в науково-дослідну роботу плоскорешітні сепаратори.*

Даний Акт не є підставою для перерахунку підприємством фондів матеріального стимулювання.

Директор
ТОВ "БАТЬКІВЩИНА"
_____ Кутіль Б.І.
(підпис)
«05» вересня 2023

Керівник
науково–дослідної групи
_____ Бредихін В.В.
(підпис)
«07» вересня 2023

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
ТОВ " РЕМАВТОКОМПЛЕКТ-СЕРВІС "
_____Кравченко Д.М.
«__06__» ___Вересня___ 2023 р.
М.П

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____Михайлов В.М.
«__07__» ___Вересня___ 2023 р.
М.П.

АКТ

ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАКІНЧЕНОЇ НАУКОВО–ДОСЛІДНОЇ, ДОСЛІДНО–КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОБОТИ

Ми, що нижче підписалися, представник Державного біотехнологічного університету (м. Харків) в особі керівника науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи **Бредихіна Вадима Вікторовича** та представника Товариства з обмеженою відповідальністю " РЕМАВТОКОМПЛЕКТ-СЕРВІС ", в особі директора Кравченка Дмитра Миколайовича склали цей Акт про те, що результати науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи за темою «Оптимізація кінематичних режимів сепаруючих машин для підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу», що виконані співробітниками університету в період з «01» серпня 2023 року по «31» вересня 2023 року впроваджені у виробництво.

У період з «01» червня по «31» серпня 2023 року шляхом використання розробленого Бредихіним Вадимом Вікторовичем математичного апарату для оптимізації кінематичних режимів зерноочисних сепараторів (пневмосепарувальних столів), що включено до технологічної лінії підготовки насіння, було проведено порівняльне визначення ефективності процесу підготовки насіннєвих матеріалів.

Впровадження результатів дослідження дало можливість підприємству (організації) отримати наступний економічний ефект: *за звітній період 22243 грн 00 коп. на одну машину (двадцять дві тисячі двісті сорок три гривні 00 копійок.)*

Зауваження та пропозиції що до подальшої роботи з впровадження наукових розробок Державного біотехнологічного університету: *продовжити роботу з покращення ефективності роботи зерноочисних машин та якості процесу підготовки насіннєвих матеріалів, включити в науково-дослідну роботу барабанні сепаратори.*

Даний Акт не є підставою для перерахунку підприємством фондів матеріального стимулювання.

Директор "
ТОВ " РЕМАВТОКОМПЛЕКТ-СЕРВІС
_____ Кравченко Д.М.
(підпис)
«__06__» ___Вересня___2023

Керівник
науково–дослідної групи
_____Бредихін В.В.
(підпис)
«__07__» ___Вересня___2023

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Генеральний Директор
ТОВ «Крок-Укрзалізбуд»
_____ Андрієвська Л.М.
«__» _____ 2023 р.
М.П

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи ДБТУ
_____ Михайлов В.М.
«__» _____ 2023 р.
М.П.

АКТ

ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАКІНЧЕНОЇ НАУКОВО–ДОСЛІДНОЇ, ДОСЛІДНО–КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОБОТИ

Ми, що нижче підписалися, представник Державного біотехнологічного університету (м. Харків) в особі керівника науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи **Бредихіна Вадима Вікторовича** та Генерального Директора ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» **Андрієвської Людмили Михайлівни** склали цей Акт про те, що результати науково–дослідної (дослідно–конструкторської) роботи за темою «Оптимізація кінематичних режимів сепаруючих машин для підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу», що виконані співробітниками університету в період з «01» серпня 2023 року по «30» вересня 2023 року впроваджені у ТОВ «Крок-Укрзалізбуд».

У період з «01» серпня по «30» вересня 2023 року шляхом використання розробленого Бредихіним Вадимом Вікторовичем математичного апарату для оптимізації кінематичних режимів зерноочисних сепараторів (пневмосепарувальних столів), що включено до технологічної лінії ТОВ «Крок-Укрзалізбуд», було проведено порівняльне визначення ефективності процесу підготовки насіннєвих матеріалів.

Впровадження результатів дослідження дало можливість підприємству (організації) отримати наступний економічний ефект: *за звітній період 23155 грн 00 коп. на одну машину (двадцять три тисячі сто п'ятдесят п'ять грн. 00 коп.)*

Зауваження та пропозиції що до подальшої роботи з впровадження наукових розробок Державного біотехнологічного університету: *продовжити роботу з покращення ефективності роботи зерноочисних сепараторів та якості процесу підготовки насіннєвих матеріалів.*

Даний Акт не є підставою для перерахунку підприємством фондів матеріального стимулювання.

Генеральний Директор
ТОВ «Крок-Укрзалізбуд»
_____ Андрієвська Л.М.
«__» _____ 2023 року

Керівник
науково–дослідної групи
_____ Бредихін В.В.
«07» вересня 2023 року

ДОДАТОК К
МОНОГРАФІЇ

В.П. ОЛЬШАНСЬКИЙ, В.В. БРЕДИХІН,
В.М. ЛУК' ЯНЕНКО,М.В. ПІВЕНЬ,
М.В. СЛІПЧЕНКО, С.О. ХАРЧЕНКО

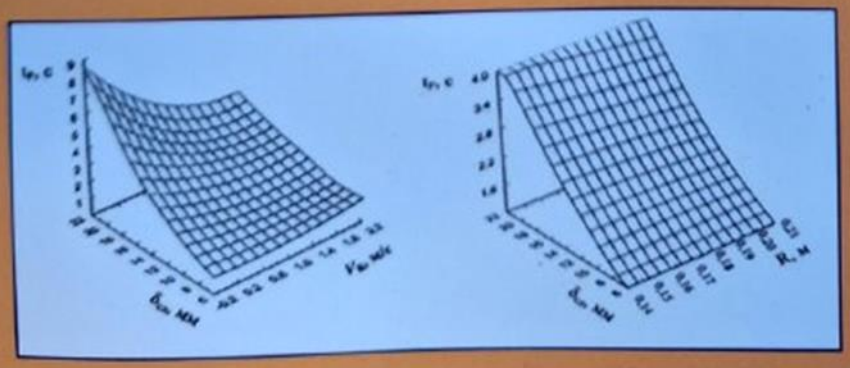
ТЕОРІЯ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНА

Харків - 2017

В. В. БРЕДИХІН

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІБРОПНЕВМОВІДЦЕНТРОВОГО РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

Монографія

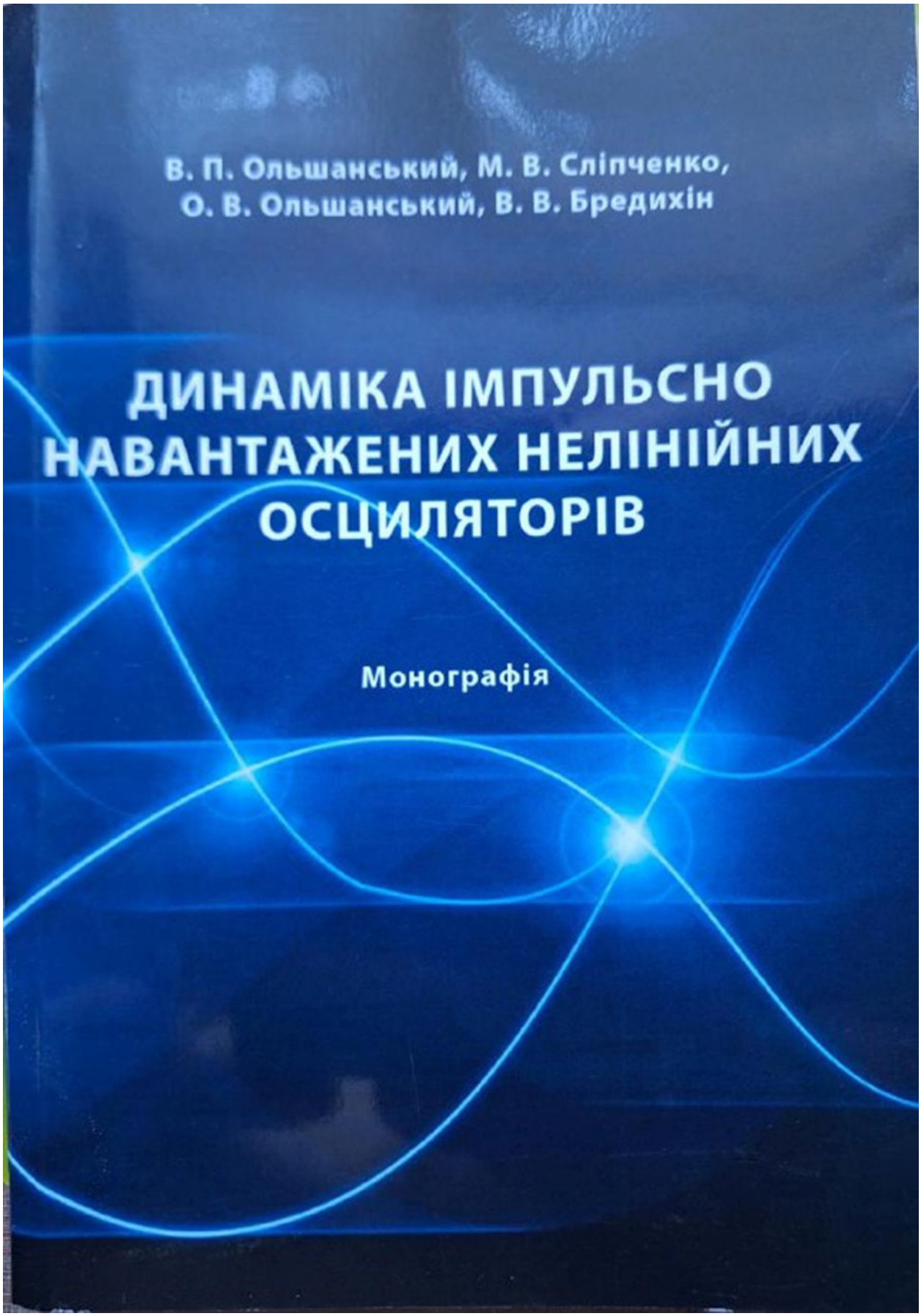


Харків
2017

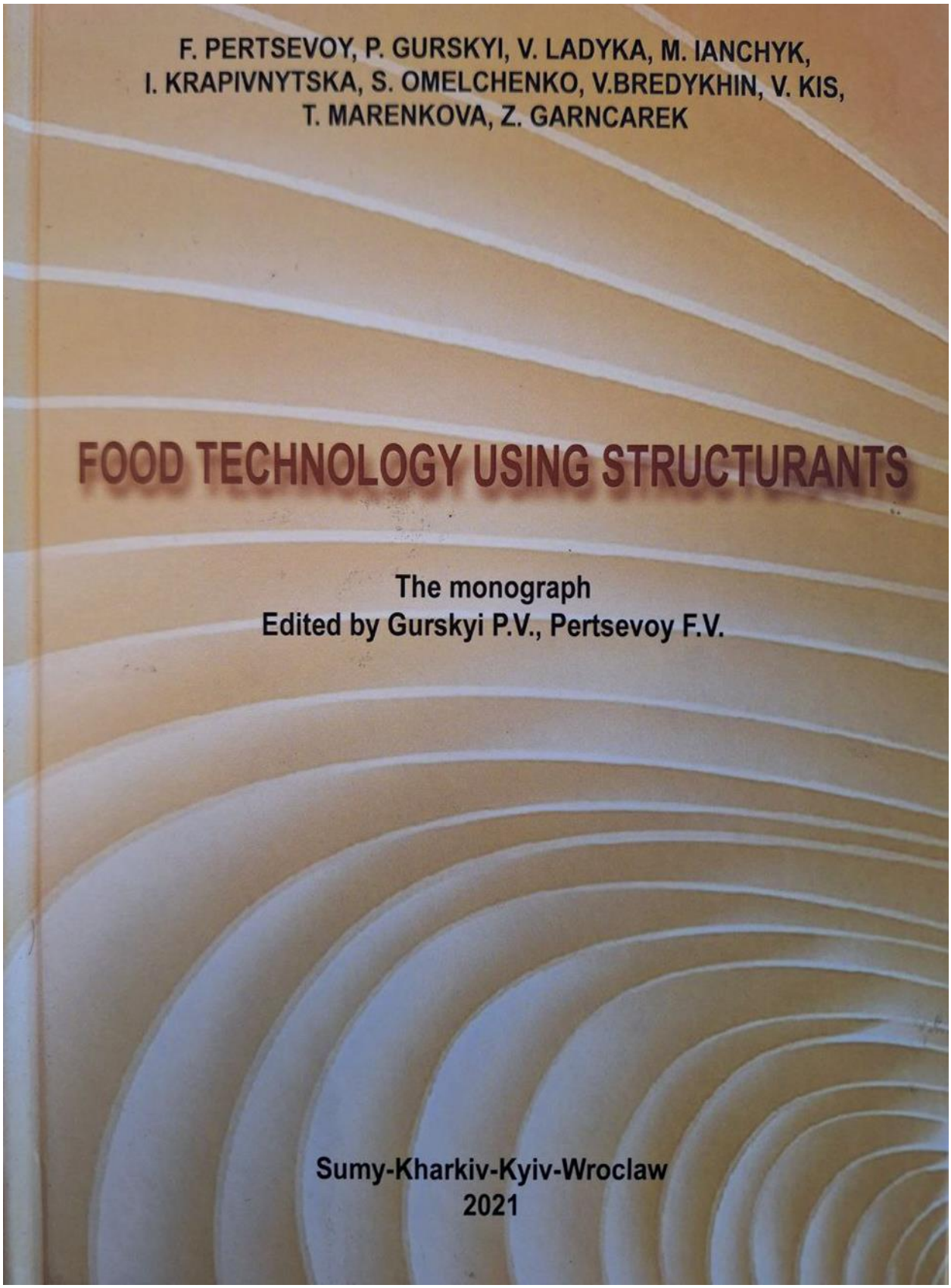
В. В. БРЕДИХІН, О. В. БОГОМОЛОВ,
М. В. СЛІПЧЕНКО, Л. В. КІСЬ-КОРКІЩЕНКО,
С. Г. ІВАЩЕНКО, В. І. ІРКЛІЄНКО, О. О. ЧЕРНЯЄВ,
С. Р. ТІКУНОВ

НАУКОВІ ОСНОВИ ОЩАДЛИВОЇ ПІДГОТОВКИ НАСІННЯ З ПОЛІПШЕНИМ БІОЛОГІЧНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ

Монографія


В. П. Ольшанський, М. В. Сліпченко,
О. В. Ольшанський, В. В. Бредихін
ДИНАМІКА ІМПУЛЬСНО НАВАНТАЖЕНИХ НЕЛІНІЙНИХ ОСЦИЛЯТОРІВ
Монографія

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
Монографія
Харків - 2021


F. PERTSEVOY, P. GURSKYI, V. LADYKA, M. IANCHYK,
I. KRAPIVNYTSKA, S. OMELCHENKO, V.BREDYKHIN, V. KIS,
T. MARENKOVA, Z. GARNCAREK
FOOD TECHNOLOGY USING STRUCTURANTS
The monograph
Edited by Gurskyi P.V., Pertsevoy F.V.
Sumy-Kharkiv-Kyiv-Wroclaw
2021