

**Міністерство освіти і науки України
Кіровоградський національний технічний університет**

**В.М. Сало, С.М. Мороз, О.М. Васильковський
С.М. Лещенко, Д.І. Петренко**

**РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ
ПНЕВМОРЕШІТНОЇ ЗЕРНООЧИСНОЇ
МАШИНИ**

Том 1

**Обґрунтування параметрів
транспортера-сепаратора**

МОНОГРАФІЯ

Кіровоград
Видавець Лисенко В.Ф.
2014

УДК 631.362.36

ББК 34.4

Р 64

Рецензенти:

Дідух В.Ф. – завідувач кафедрою експлуатації та технічного сервісу машин ім. професора Семковича О.Д. Львівського національного аграрного університету, доктор технічних наук, професор

Котов Б.І. – професор кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. Мартиненко І.І. Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор технічних наук, професор

Пашинський В.А. – професор кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва Кіровоградського національного технічного університету, доктор технічних наук, професор

Монографію розглянуто й схвалено до друку на засіданні вченої ради Кіровоградського національного технічного університету (протокол №1 від 1 жовтня 2013 року).

Р 64

Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора / В.М. Сало, С.М. Мороз, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко – Кіровоград: Видавець Лисенко В.Ф., 2014 – 108 с.

ISBN 978-966-2570-86-1

У монографії наведено вирішення прикладної наукової задачі підвищення ефективності решітного очищення зерна шляхом суміщення двох технологічних операцій – транспортування і сепарації. Розділення зерна на компоненти в процесі транспортування дозволяє зменшити масу, габарити машини, знизити енергоємність процесу. У роботі використані результати власних досліджень, а також досліджень українських та закордонних вчених.

Монографія призначена для наукових співробітників, магістрантів, конструкторів сільськогосподарської техніки та фахівців сільського господарства.

ББК 34.4

Монографія виконана в рамках роботи над виконанням фундаментального дослідження «Науково-технологічні основи та технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання», (№ ДР 0112U001105)

ISBN 978-966-2570-86-1

© В.М. Сало, С.М. Мороз, О.М. Васильковський,
С.М. Лещенко, Д.І. Петренко, 2014
©Видавець Лисенко В.Ф., 2014

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕХАНІЗАЦІЇ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОГО ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	7
1.1. Задачі і засоби післязбиральної обробки зерна	7
1.2. Аналіз функціональних схем зерноочисних машин	8
1.3 Огляд конструкцій технічних засобів для реалізації суміщення технологічних операцій транспортування зернового матеріалу та його сепарування за розмірами.....	15
1.4. Аналіз основних результатів досліджень сепарації зерна на решетах.....	21
1.5 Висновки. Задачі дослідження	26
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ І ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТЕРА–СЕПАРАТОРА	28
2.1. Аналіз багат шарового руху зерна.....	28
2.2. Моделювання руху прохідної частки по перетинці пруткового решета.....	34
2.3. Аналіз процесу сепарування зерна	40
2.4. Обґрунтування діаметру поздовжніх перетинок решета	45
2.5. Визначення кроку між ковшами транспортера–сепаратора	48
2.6. Висновки по розділу.....	52
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	54
3.1. Програма експериментальних досліджень	54
3.2. Методика визначення фізико-механічних властивостей зерна.....	54
3.2.1. Методика визначення фракційного складу оброблюваного матеріалу	54
3.2.2. Методика визначення об’ємної маси оброблюваного матеріалу	55
3.2.3. Методика визначення вологості вороху.....	55
3.3. Методика визначення закономірностей просівання зерна крізь канали решета	56
3.3.1. Опис конструкції і роботи експериментальної установки	56
3.3.2. Прилади та обладнання	60
3.3.3. Методика та умови проведення дослідів.....	63
3.3.4. Методика визначення залежності впливу діаметру перетинок решета на просівання зерна.....	63
3.3.5. Методика визначення швидкості руху часток нижнього шару	64
3.3.6. Методика визначення робочої довжини решета.....	65

3.3.7. Методика визначення залежності технологічної ефективності роботи сепаруючого органу	65
3.4. Математичне моделювання експериментів	66
3.4.1. Постановка задачі	66
3.4.2. Вибір факторів.....	66
3.4.3. Розробка плану, його реалізація та побудова моделі	67
3.5. Методика визначення потужності витраченої на привід транспортера-сепаратора.....	68
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТЕРА–СЕПАРАТОРА НА	
ПОКАЗНИКИ ЙОГО РОБОТИ	
4.1. Результати визначення фізико-механічних властивостей зерна	69
4.1.1. Фракційний склад зернового вороху.....	69
4.1.2. Визначення вологості зерна.....	69
4.2. Визначення впливу діаметру поздовжніх перетинок на просівання зерна ...	70
4.3. Визначення швидкості руху зерна по решітній поверхні під дією багат шарової взаємодії часток зернового вороху	72
4.4. Визначення робочої довжини решета	73
4.5. Вплив фізико–механічних властивостей оброблюваного матеріалу на ефективність роботи транспортера–сепаратора	76
4.6. Визначення впливу основних параметрів та режиму роботи досліджуваного робочого органу на технологічну ефективність сепарації	77
4.7. Визначення кроку ковшів транспортера–сепаратора.....	86
4.8. Визначення енергоємності роботи транспортера-сепаратора	86
4.9. Висновки по розділу.....	89
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	
5.1. Практична реалізація результатів досліджень.....	91
5.2. Методика розрахунку параметрів транспортера–сепаратора.....	92
5.3. Економічна ефективність від впровадження результатів досліджень у виробництво	94
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	95
Список використаних джерел.....	97

ВСТУП

Виробництво зерна – одна з ключових задач сільського господарства, успішне вирішення якої неможливе без наявності відповідної сучасної техніки для його післязбирального очищення і сортування.

Підвищення показників технологічної ефективності – якості і продуктивності зерноочисних машин (ЗОМ) загального призначення можна досягти багатьма способами: інтенсифікацією процесу сепарації завдяки використанню інерційних сил, вібрацій, конструктивних елементів тощо. Цим напрямом удосконалення техніки приділено основну увагу дослідників і виробників протягом останніх десятиліть. Іншим шляхом підвищення ефективності розділення зернових матеріалів є забезпечення раціональної послідовності виконання технологічних операцій, коли більш продуктивна виконується першою, а за нею – менш продуктивні.

Сучасні ворохоочисники забезпечують послідовне очищення від легких, крупних і дрібних домішок. Тобто, більш продуктивна і проста операція – виділення крупних домішок виконується після, достатньо складного і низькопродуктивного, повітряного очищення.

Не дивлячись на зазначене вище, за останні десятиліття в Україні та світі не створено жодної принципово нової конструкції зерноочисної машини загального призначення, яка б відступила від загальноприйнятої послідовності виконання технологічних операцій. Існуюча компромісна послідовність забезпечує вдале компактне конструктивне компонування робочих органів, однак не дозволяє повною мірою реалізувати потенційні можливості систем повітряного та решітного очищення, оскільки наявність крупних домішок у аспіраційному каналі погіршує ефективність пневмосепарації.

Таким чином, підвищення показників технологічної ефективності зерноочисних машин можна досягти шляхом забезпечення раціональної послідовності виконання технологічних операцій на основі використання багатофункціональних робочих органів. Одним із таких комбінованих робочих органів є розроблений на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету транспортер-сепаратор, призначений для видалення крупних домішок під час завантаження зернового вороху до машини. Це дозволяє знизити навантаження на аспірацію, відмовитись від використання класичних колосових решіт.

Конструкція транспортера-сепаратора є новою, а процес сепарації зернового вороху під час транспортування недостатньо вивчений, тому потребує проведення досліджень. Дана монографія присвячена обґрунтуванню конструктивно-технологічних параметрів транспортера-сепаратора зерна для реалізації принципу раціональної послідовності виконання технологічних операцій у нових зерноочисних машинах загального призначення.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСОБІВ МЕХАНІЗАЦІЇ
ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОГО ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Задачі і засоби післязбиральної обробки зерна

Зерновий ворох, що надходить на зернові токи після збирання складається із зерна основної культури, інших сільськогосподарських культур, насіння бур'янів, комах, рослинних решток, мінеральних та металевих включень.

Очищення зерна забезпечує підвищення його товарної цінності, покращує умови зберігання, а також зменшує втрати.

В залежності від подальшого призначення зерна проводять попереднє, первинне і основне (вторинне) очищення зернового вороху.

Попереднє очищення зернового вороху проводиться з метою видалення з його складу найбільш вологих домішок, щоб зменшити загальну вологість і підготувати до тимчасового зберігання до наступного – первинного очищення, а за високої внутрішньої вологості – до сушіння. Кількість домішок у зерновому воросі після попереднього очищення повинна зменшитись не менше ніж на 50% [96].

Первинне очищення проводять з метою подальшого підвищення його якості та отримання необхідних базисних кондицій продовольчого зерна і підготовки зернового матеріалу до тривалого зберігання.

Після первинного очищення у вихідному матеріалі повинно залишитись не більше 2% домішок [96].

Для попереднього та первинного очищення зернового вороху використовують зерноочисні машини (ЗОМ) загального призначення з повітряними та повітряно-решітними сепаруючими органами (ОВП-20, ОВС-25, А1-БЦС-25(50), Р8-БЦС-50, Р8-БЦСМ-50, МПО-50, МЗП-50, К-527А, ЗГ-5, СЗГ-25) та зерноочисні комплекси (ЗАВ-20, ЗАВ-40, ЗАВ-50 та ЗАВ-100), які забезпечують відокремлення легких, крупних та дрібних домішок [12, 23, 25, 27-28, 35, 49-54, 68, 71-73, 93, 95-96, 98, 112, 135, 140, 144-145].

Машини вторинного очищення призначені для отримання посівного матеріалу та продовольчого зерна. Відрізняються від означених, насамперед, наявністю додаткових трієрних робочих органів для відокремлення довгих і коротких домішок. Представниками таких є машини

СМ–4, МС–4,5, "Petkus Super Gigant" та інші, які використовують в зерноочисних комплексах ЗАВ–25, ЗАВ–40, ЗАВ–50 та ЗАВ–100 [50, 52–53].

На сьогоднішній день в Україні на більшості сільськогосподарських підприємствах післязбиральне очищення зерна здійснюється, як правило, на базі вже фізично зношених та морально застарілих зерноочисних машинах, які не забезпечують ефективне вирішення цієї задачі в стислі агротехнічні терміни. В таких умовах зерно втрачає товарну цінність, а також значно зростають його втрати. Дорога імпортна техніка не в змозі задовольнити потреби селян, особливо в умовах фінансової кризи.

Для зменшення втрат зерна, підвищення продуктивності та якості післязбирального обробітку необхідно, насамперед, вирішити задачу створення нових вітчизняних високоефективних і дешевих зерноочисних машин, збільшити їх номенклатуру за продуктивністю відповідно до потреб всіх зерновиробників. Вирішення такої задачі повинно базуватися на найбільш перспективних сучасних досягненнях науки та техніки в даній галузі.

1.2. Аналіз функціональних схем зерноочисних машин

Найбільшого поширення в зерноочисних машинах загального призначення, що випускались в колишньому СРСР та інших країнах світу, набула схема послідовності виконання технологічних операцій, яка запропонована І.Є. Кожуховським та Г.П. Павловським [69–72, 98, 105–106], рис. 1.1–1.2.а. Вона і по сьогоднішній день використовується в більшості конструкцій, зокрема в ОВП–20, ОВС–25, а також в насіннеочисних машинах СМ–4, МС–4,5 та інших [50–53, 68, 71–73, 90, 95–96, 98, 106, 112, 140, 144–145].

До переваг такої схеми слід віднести компактність конструкції ЗОМ, оскільки обидва решета для виділення крупних та дрібних домішок встановлено на одному решітному стані і мають один загальний привод, а розподіл потоку зернового вороху на дві рівні частини дає можливість використати додатково, замість балансуєчого пристрою, ще один решітний стан, що дозволяє підняти вдвічі її продуктивність та зрівноважити інерційні сили решітних станів.

Суттєвим недоліком цієї схеми є наявність крупних домішок в аспіраційному каналі, що призводить до погіршення сепарації, внаслідок зменшення рівномірності завантаження повітряного каналу, та його

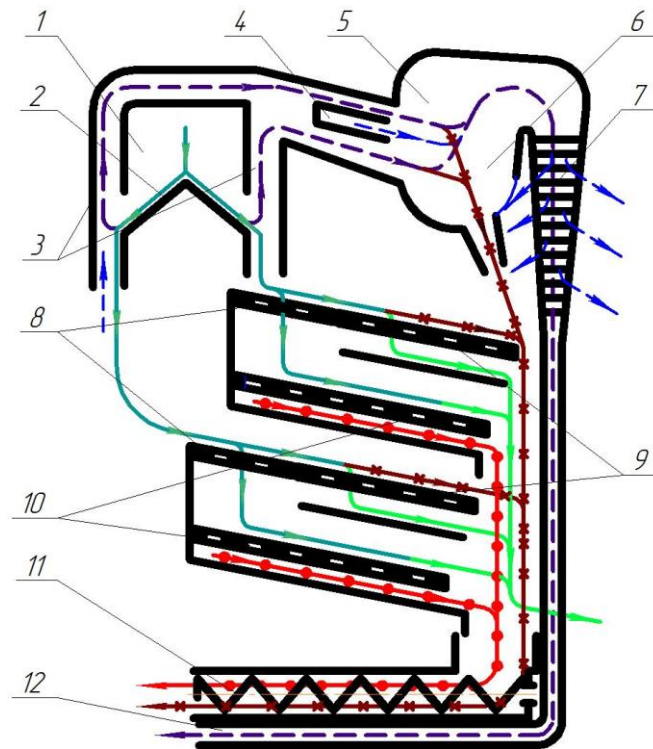


Рис. 1.1. Найбільш розповсюджена функціональна схема роботи ЗОМ загального призначення ОВП–20 та ОВС–25:

← зерновий ворох; ← повітря; ← легкі домішки;
 ← крупні домішки; ← дрібні домішки;
 ← очищене зерно; 1 – приймальна камера; 2 – ділильник;
 3 – аспіраційні канали; 4 – вікно; 5 – вентилятор; 6 – осадова камера;
 7 – пиловідокремлювач; 8 – розподільче решето; 9 – колосове решето;
 10 – підсівне решето; 11 – вивантажувальний шнек; 12 – патрубок виводу
 легких домішок

перенавантаженню. Це знижує якість і чіткість повітряного сепарування зерна, збільшує його втрати у відходи.

За переконанням авторів [89, 132, 143, 145], найбільш сприятливою умовою для аспіраційної очистки є відсутність у зерновому матеріалі крупних домішок. Це пов'язане, по-перше, з умовами забезпечення рівномірної подачі вороху до повітряного каналу (крупні частки створюють його порційне надходження до аспірації), при якому більш щільний шар вороху утворює більший опір. По-друге, крупні частки, особливо рештки соломи, схильні утворювати в аспіраційному каналі перешкоди, на яких утримуються зерно і легкі домішки. В обох випадках питоме навантаження на одиницю площі поперечного перерізу каналу сягає найбільшого значення [21], що погіршує якість пневмосепарування зерна.

Для зменшення негативного впливу вказаних недоліків, збільшують розміри пневмосепаруючих каналів, що призводить до підвищення енерговитрат, а також до погіршення чіткості пневмосепарування і збільшення втрат повноцінного зерна.

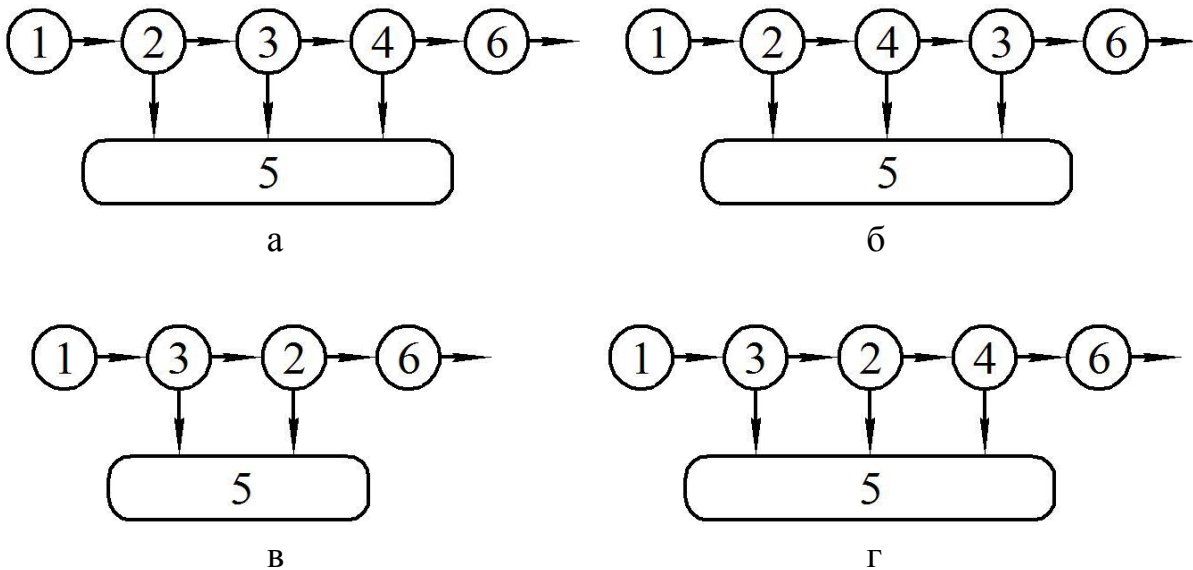


Рис. 1.2. Структурні схеми послідовностей технологічних операцій ЗОМ загального призначення:

а – ОВП–20 та ОВС–25 (найбільш розповсюджена); б – Р8–БЦСМ–25, Р8–БЦС–50, А1–БЦС–100 та СВУ–15; в – МПО–50 та СПО–50; г – раціональна послідовність

1 – завантаження зернового вороху в приймальну камеру; 2 – виділення із зернового вороху легких домішок; 3 – виділення крупних домішок; 4 – виділення дрібних домішок; 5 – виведення із машини всіх виділених домішок та фуражного зерна; 6 – відвантаження очищеного зерна із машини

Таким чином, аналіз роботи найбільш розповсюдженої схеми послідовності технологічних операцій ЗОМ загального призначення показує, що як з позиції досягнення найвищої загальної технологічної ефективності, так і енергоємності очищення зерна означена схема не є оптимальною. Вона створює несприятливі умови функціонування повітряної сепарації, збільшує витрати енергії, погіршує якість та чіткість виділення домішок.

Також нераціонально, з позиції забезпечення максимальної технологічної ефективності, побудовані функціональні схеми зерноочисних машин МЗП–50, Р8–БЦС–50, Р8–БЦСМ–25(50) та А1–БЦС–100 (рис. 1.3) [12, 24, 27–28, 49, 51, 73], в яких найбільш продуктивна

операція відокремлення крупних домішок здійснюється останньою (рис. 1.2.б.), після здійснення більш складних і менш продуктивних операцій відокремлення легких та дрібних домішок. В такій послідовності, порівняно з попередньою, мають місце найбільш несприятливі умови функціонування як повітряної сепарації, так і найбільш складної решітної, по виділенню дрібних домішок.

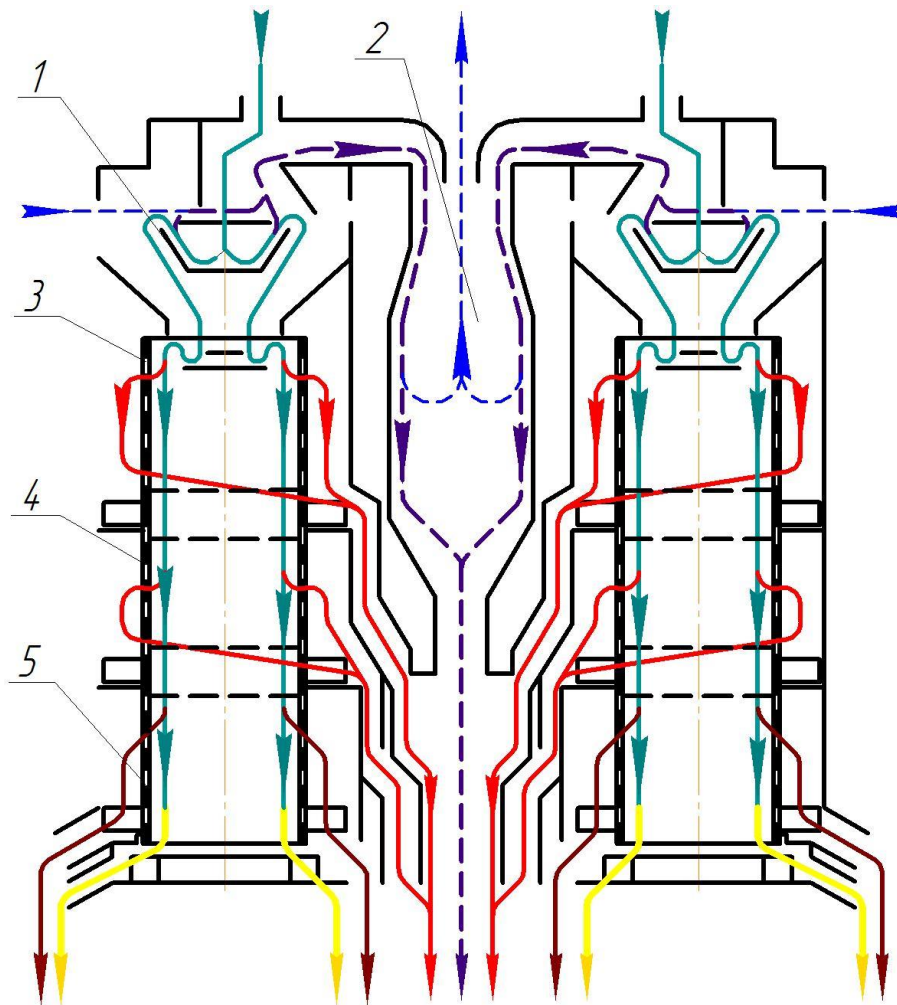


Рис. 1.3. Функціональна схема сепараторів Р8-БЦС-50 та А1-БЦС-100:
 ← зерновий ворох; ← повітря; ← легкі домішки;
 ← крупні домішки; ← дрібні домішки; ← очищене зерно
 1 – розподільник; 2 – осадова камера; 3 – підсівне решето; 4 – решето для виділення зерна другого сорту; 5 – колосове решето

Таким чином, представлена на рис. 1.2.б схема послідовності операцій, яка використовується головним чином в ЗОМ загального призначення вітчизняного виробництва, поряд з компактністю, має ряд суттєвих недоліків.

В сепараторах фірми "Petkus Wutha" (ФРН) для попереднього очищення зерна, зокрема К-527А [12, 48, 73] застосована схема, яка включає дворазову повітряну очистку зерна – до і після решітної сепарації (рис. 1.4). Основна очистка зерна від легких домішок проводиться в головному пневмосепараторі після виділення крупних домішок на колосовому решеті.

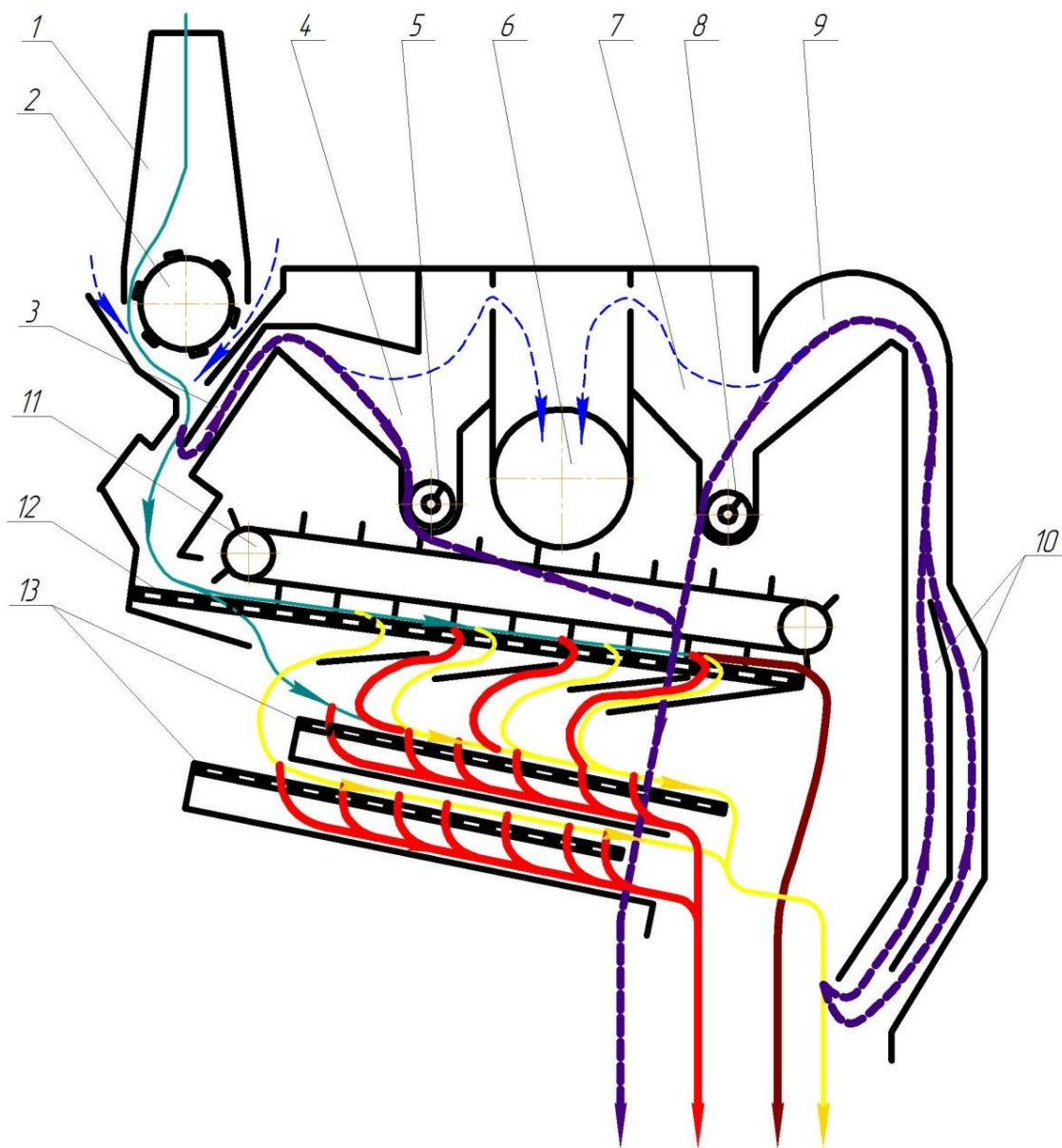


Рис. 1.4. Схема роботи сепаратора К-527А:

← зерновий ворох; ← повітря; ← легкі домішки;
 ← крупні домішки; ← дрібні домішки;
 ← очищене зерно; 1 – приймальна камера; 2 – розподільчий пристрій; 3 – повітропровід; 4, 7, 9 – осадова камера; 5, 8 – шнек легких домішок; 6 – вентилятор; 10 – аспірація; 11 – транспортер; 12 – колосове решето; 13 – підсівне решето

Така схема роботи аспіраційної системи ЗОМ набула поширення та використовується в ЗОМ ПРМ, МЗС–10 та МЗС–25 [52]. Застосування подвійної аспіраційної очистки суттєво покращує якість виділення легких домішок, що сприяє забезпеченню високого загального технологічного ефекту сепарації, порівняно з попередніми схемами, однак збільшує матеріалоємність та енергоємність машини.

Наближеною до оптимальної можна вважати послідовність виконання технологічних операцій в машинах для попереднього очищення зерна МПО–50 та СПО–50 (рис. 1.5), в яких після подачі зернового вороху до машини (операція 1, рис. 1.2.в) проводиться його очистка спочатку від крупних домішок (операція 3), а потім виділяються легкі домішки (операція 2) [24, 54, 73]. Це дозволяє забезпечити більшу рівномірність його введення та зменшити питоме навантаження на аспірацію, що позитивно впливає на якісні показники машини в цілому та підвищує її продуктивність.

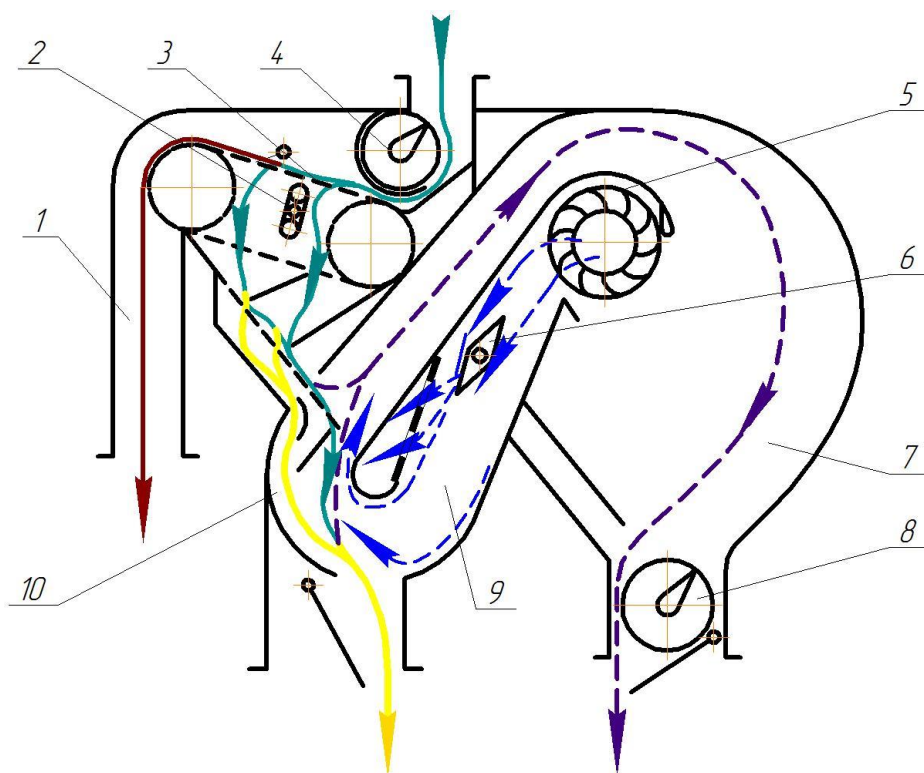


Рис. 1.5. Функціональна схема ЗОМ МПО–50 та СПО–50:

- ← — зерновий ворох; ← — повітря; ← — легкі домішки;
- ← — крупні домішки; ← — дрібні домішки;
- ← — очищене зерно 1, 9 та 10 — повітряні канали; 2 — активатор;
- 3 — сітчастий транспортер; 4 та 8 — шнеки; 5 — вентилятор; 6 — заслінка;
- 7 — осадова камера

До недоліків вказаних ЗОМ слід віднести відсутність се парувальних органів для видалення з оброблюваного матеріалу дрібних домішок. Так в роботі [80] Б.І. Котов та М.І. Волошин відзначають, що "...своєчасне видалення дрібних домішок дозволить більш ефективно проводити сушіння та тимчасове зберігання зерна, так як саме дрібні домішки значно зменшують стійкість зберігання зернових матеріалів".

З позиції одержання максимальної технологічної ефективності для попереднього, первинного і основного очищення зерна найбільш раціональною є схема послідовності технологічних операцій (рис. 1.2.г), яка передбачає відокремлення спочатку крупних, потім легких і насамкінець дрібних домішок.

Але практична реалізація такої схеми, як правило, ускладнює будову ЗОМ, в наслідок чого збільшується її матеріалоємність та собівартість, що зменшує її економічну ефективність. Тобто, впровадження раціональної послідовності технологічних операцій при вдосконаленні ЗОМ на основі використання традиційних конструктивних рішень їх робочих органів, як правило, не забезпечує підвищення їх економічної ефективності.

Ефективне вирішення такої задачі можливе на основі використання в ЗОМ багатofункціональних робочих органів, які здійснюють одночасне виконання двох та більше технологічних операцій. В нашому випадку необхідно об'єднати виконання двох операцій: завантаження зернового вороху в машину та відокремлення крупних домішок в одну – завантажувально–сепаруючу, яка здійснюється під час його транспортування до наступної операції комбінованим завантажувально–сепаруючим органом.

Подібне технічне рішення реалізоване в відомому сепараторі К–527А виробництва Німеччини (рис. 1.4), в якому для переміщення (транспортування) зернового вороху по колосовому решету використовується скребковий транспортер, який здійснює одночасно і очищення його робочих отворів.

Використання такого робочого органу дозволяє значно спростити її конструкцію та зменшити матеріалоємність і енергоємність машини, а також підвищити технологічну ефективність. Таке вдосконалення дозволяє реалізувати найбільш раціональну послідовність технологічних операцій і на її основі створити нову більш ефективну і конкурентоздатну зерноочисну машину.

1.3 Огляд конструкцій технічних засобів для одночасного транспортування та сепарування зернового матеріалу за розмірами

Найбільш розповсюдженим пристроєм, де здійснюється суміщення операцій транспортування та сепарації, є похила камера зернозбирального комбайна.

Відома конструкція похилої камери зернозбирального комбайна, в якій встановлено транспортер–сепаратор [3] (рис. 1.6). Таким пристроєм виділяється з вороху до 25–30% вільного зерна [15]. Подібна за конструкцією похила камера комбайна [4]. Дослідження аналогічного планчастого транспортера–сепаратора розробленого НВО "Ефірмасло" для збирання коріандру показали, що його використання дозволяє виділити з зернового вороху та направити безпосередньо до органів очистки комбайна понад 20% вільного зерна, що зменшує його травмування на 1,2% [101].

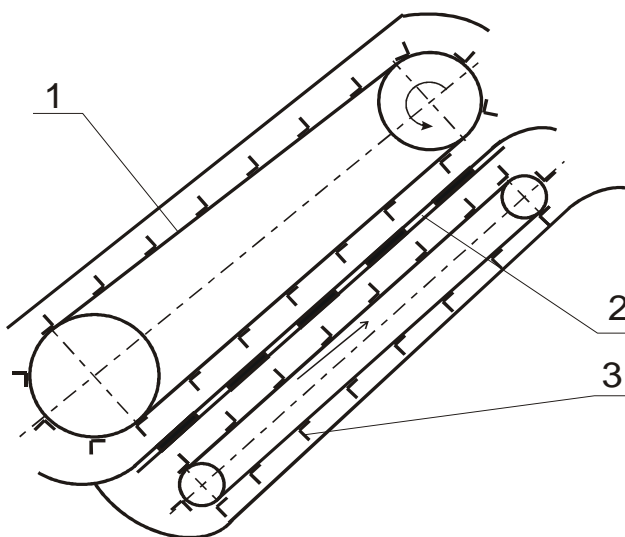


Рис. 1.6 Транспортер–сепаратор похилої камери зернозбирального комбайна а.с. № 203350 СРСР:

1 – верхній транспортер; 2 – решітчаста дека; 3 – нижній транспортер

Використання прутково–планчастої деки з великими отворами прискорює вимолот з колосків зерна, внаслідок удару колосків по планках, дозволяє йому вільно надходити до нижнього транспортера, однак можливість просіюватися має переважно те зерно, яке знаходиться в нижніх шарах хлібної маси.

До недоліків вказаних транспортерів–сепараторів слід віднести використання в якості робочої поверхні сепарації прутково–планчастого

решета з великими розмірами отворів, що сприяє просіванню крізь них значної кількості крупних часток (колоски, їх рештки, насіння бур'янів, тощо). Тому такі робочі органи придатні лише для попереднього (грубого) виділення крупних домішок.

Відома конструкція транспортера–сепаратора (рис. 1.7) [16], розроблена

в СГІ м. Саратова, яка дозволяє прискорити процес виділення вільного зерна, внаслідок використання активних решітно–планчатих бітерів. Ці робочі органи розпушують хлібну масу і одночасно вимолочують зерно з колосків. Різка зміна швидкості та напрямку руху оброблюваного матеріалу на вході до планчастого транспортера–сепаратора дозволяє зерну проходити крізь солому на поверхню решета, просіваючись крізь нього.

Недоліком даного сепаруючого органу є значна складність конструкції, високі матеріалоемність і енергоємність та низька надійність технологічного процесу. Так, окрім виділеного вільного зерна решітно–планчастими бітерами, до стрічково–планчастого транспортеру можуть надходити подрібнені частки соломи та колосків чи важкі домішки. Конструкція бітерів допускає попадання та знаходження в середині них різних часток, в тому числі й вільного зерна, яке після подрібнення надійде до стрічково–планчастого транспортера.

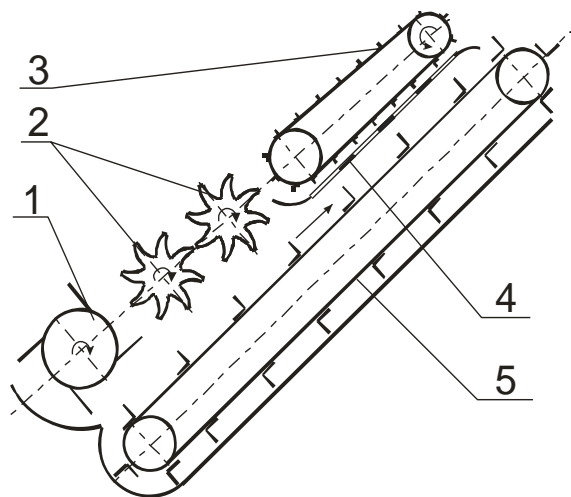


Рис. 1.7 Транспортер–сепаратор похилої камери конструкції Саратовського СГІ:

1 – штифтовий барабан; 2 – решітно–планчасті бітери; 3 – скребковий транспортер; 4 – решітне днище; 5 – стрічково–планчастий транспортер

В Татарському НДІСГ розроблена оригінальна конструкція транспортера–сепаратора (рис. 1.8), в основу якої покладено використання високопродуктивних пальцевих бітерів та розміщених під ними нерухомих пруткових решіт, в яких відсутні поперечні перетинки, що дозволяє знизити травмування зерна, внаслідок відсутності удару по ним [5].

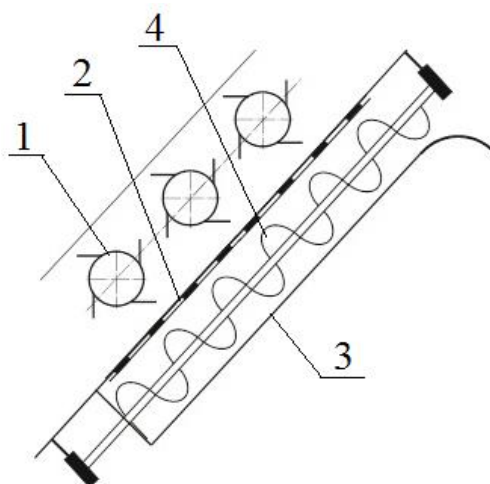


Рис. 1.8 Транспортер–сепаратор Татарського НДІСГ:
1 – пальцевий бітер; 2 – решітка; 3 – днище; 4 – шнек

Недоліками цієї конструкції є її високі матеріало– та енергоємність, складність приводу робочих органів, та ненадійна робота бітерів внаслідок забивання простору між пальцями соломистою масою та наявність залишків зерна в жолобі шнека.

Для виділення вільного зерна із вороху, після обчісування колосків зернових культур обчісуючим пристроєм, М.П. Шабановим розроблена конструкція транспортера–сепаратора [141] (рис. 1.9). До переваг даної конструкції слід віднести те, що за рахунок різкої зміни напрямку та швидкості руху оброблюваний матеріал розпушується, в наслідок чого здійснюється виділення вільного зерна із шару вороха. Недоліки конструкції аналогічні розглянутим вище транспортерам–сепараторам [3, 4, 101].

В Московському ПСП розроблена конструкція транспортера–сепаратора похилої камери зернозбирального комбайна [7] рис. 1.10.

Переваги конструкції полягають у використанні пруткової решітки з отворами нескінченної довжини. Це дозволяє уникнути травмування зерна через відсутність поперечних перетинок та збільшує просівну здатність решета. При цьому опуклий переріз поздовжніх перетинок покращує орієнтацію зернових часток відносно отворів решітки та збільшує ймовірність

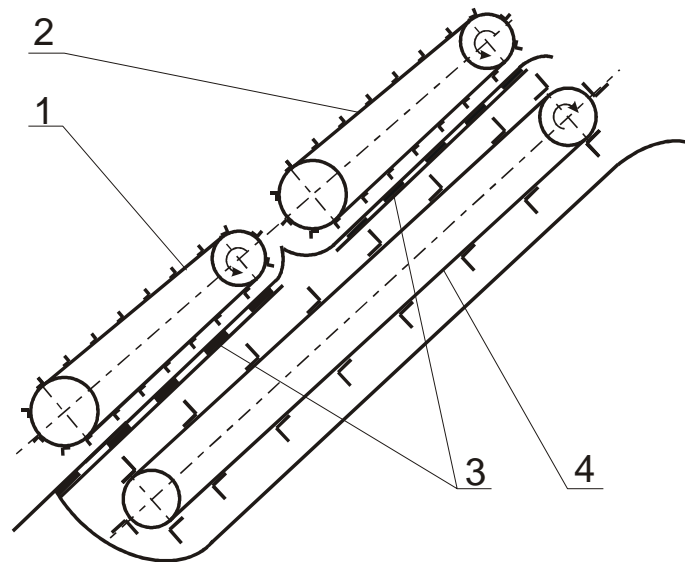


Рис. 1.9. Транспортер–сепаратор конструкції М.П. Шабанова:
 1 – передній транспортер; 2 – задній транспортер; 3 – прутково–планчасте решето; 4 – нижній транспортер

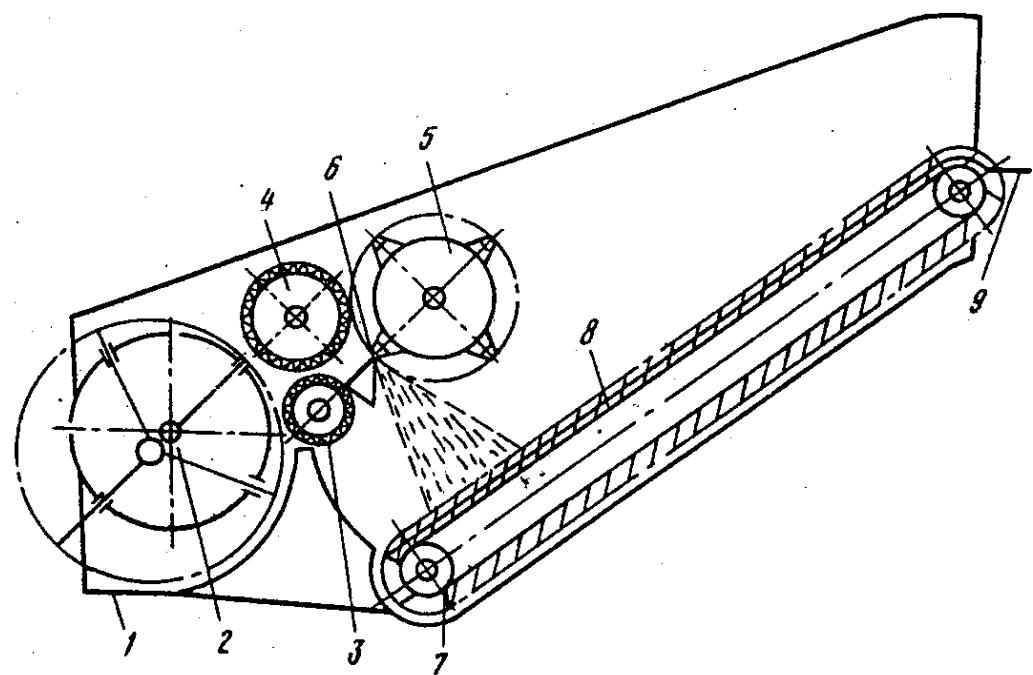


Рис. 1.10. Похила камера зернозбирального комбайна конструкції МІСП:

1 – корпус; 2 – бітер; 3, 4 – вальці; 5 – молотильний барабан;
 6 – дека; 7 – стрічково–планчастий транспортер з граблинами; 8 – решітка;
 9 – відсікач вороху

проходження зернин крізь сепаруючу поверхню. Цьому також сприяють граблини стрічково–планчастого транспортера. Вони проходять крізь шар матеріалу, що надходить на поверхню решета, примушують частки, довжина яких менше відстані між двома сусідніми прутками граблини,

розвертатися довгою стороною здовж отворів решета. У випадку, якщо товщина часток менша за ширину отвору, то вони, проходячи крізь решето, надходять на поверхню стрічково–планчастого транспортера, який транспортує їх до місця скидання. Частки матеріалу, розміри яких більші відстані між двома сусідніми прутками граблини, розвертатися довгою стороною впоперек отворів решета і транспортуються граблинами до приймача крупних домішок.

Недоліками цього транспортера–сепаратора є те, що граблини стрічково–планчастого транспортера здійснюють незадовільне розпушення шару зернового вороху, який надходить на поверхню решітки, тому обмежується самосепарація його часток. Внаслідок цього, частина вороху, що сходить з поверхні пруткового решета, містить в собі вільне зерно.

Розглянуті конструкції транспортерів–сепараторів дозволяють виконувати одночасно дві операції – транспортування та сепарацію.

Необхідно зазначити, що в розглянутих конструкціях (рис. 1.6, 1.7 та 1.9) використовуються планчасті (скребкові) транспортери з робочою нижньою гілкою. При транспортуванні матеріалу знизу до гори по похилій площині скребки сприяють поперечній орієнтації часток, що знижує ймовірність просіювання їх крізь поздовжні отвори решета. Крім того наявність поперечних перетинок останніх призводить до травмування зерна [113, 118, 128].

В той же час транспортер–сепаратор (рис. 1.10) з верхньою робочою гілкою транспортера не має втрат через перекочування до низу часток оброблюваного матеріалу, чому сприяють планки на його поверхні. Його недоліком можна вважати потребу у використанні додаткового робочого органу чи пристрою для подачі зернової суміші на його робочу поверхню.

Аналізуючи переваги та недоліки вказаних вище схем транспортерів–сепараторів зазначимо наступне:

– більшу ефективність розділення зернової маси забезпечують пруткові решета за рахунок збільшеної площі живого перерізу та сприятливого для орієнтації частинок профілю. Такі решета є і більш безпечними з позиції можливого травмування зерна, оскільки вони утворені набором повздовжніх прутків, що не мають поперечних перетинок;

– рух матеріалу по решету вгору при взаємодії з "штовхаючою" поверхнею (скребком, лопаткою, тощо) супроводжується "накладанням" частини зерна на останню, що призводить до поперечної орієнтації і погіршенням умов необхідних для розділення. Крім того, примусовий рух

зернової маси деактивує процес внутрішньосферового переміщення часток, не даючи можливості частинкам верхнього шару опуститись до решітної поверхні і просіятись;

– активізації внутрішньосферового переміщення часток можна досягти шляхом забезпечення вільного руху зерна по похилій поверхні згори донизу, що також сприяє вирішенню задачі уникнення поперечної орієнтації часток при взаємодії зі штовхаючою поверхнею (скребком).

Таким чином, на основі викладеного можна сформувати концепцію підвищення ефективності роботи транспортера–сепаратора, яка полягає у досягненні поставленої задачі шляхом оснащення решіткою без поперечних перетинок та забезпечення вільного руху зернової маси по її поверхні.

Вирішуючи задачу підвищення ефективності сепарації зернових матеріалів на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету було запропоновано нову принципову схему завантажувача–сепаратора зерна [20–21, 113], (рис. 1.11), використання якого в комплексі з оригінальним повітряно-решітним модулем дозволяє забезпечити реалізацію раціональної послідовності технологічних операцій.

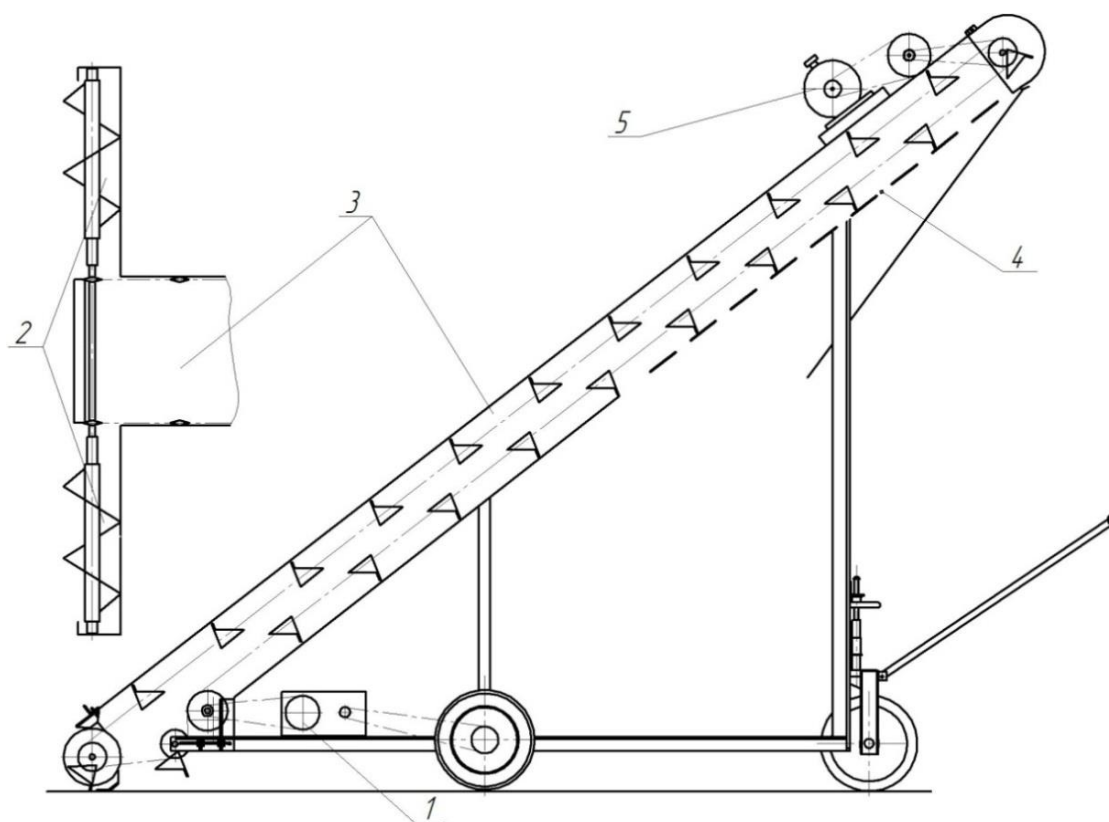


Рис. 1.11. Схема запропонованого завантажувача–сепаратора:

- 1 – рама; 2 – живильник; 3 – похилий транспортер; 4 – пруткове решето;
- 5 – привід транспортера

Запропонований завантажувач–сепаратор (рис. 1.11) включає раму 1 з механізмом самопересування, на якій розміщено живильники 2, похилий транспортер 3 з решетою 4 та механізм приводу 5. Його робота полягає в наступному. Живильники 2 захоплюють зерновий ворох з бурту і переміщують до похилого ковшового транспортера 3, який піднімає матеріал догори і вивантажує на решето 4. Матеріал, що просіявся спрямовується до повітряно-решітного модуля. Непрохідна частина – крупні домішки, переміщуються сходом з решета і виводяться з машини.

Даний завантажувач-сепаратор може працювати і як самостійна машина – завантажувач, перевантажувач, перелопачувач зернового вороху в буртах, з додатковою функцією – очищення від крупних домішок або без такої.

Використання розробленого робочого органу замість звичайних завантажувачів, в існуючих класичних схемах зерноочисних машин, дозволить видалити крупні домішки перед повітряним очищенням, розвантажити аспірацію і решітну частину, що підвищить показники технологічної ефективності їх роботи.

Дослідження даної роботи присвячені обґрунтуванню раціональних параметрів решітної частини завантажувача–сепаратора.

1.4. Аналіз основних результатів досліджень сепарації зерна на решетах

Дослідженню процесу решітної сепарації зернового матеріалу присвячені роботи багатьох вчених: В.П. Горячкіна [35], М.Г. Гладкова [25], М.М. Летошнієва [93], Г.Д. Терськова [121–125], В.А. Кубишева [83–89], І.Є. Кожуховського [69–72], В.В. Гортинського [29–34], В.М. Цециновського [9, 133–140], Г.Т. Павловського [105–106], Ю.В. Терентьєва [119–120], М.О. Авдєєва [1–2, 89], Є.С. Гончарова [26–28], Б.І. Котова [80–82], М.В. Бакума [13–14, 104], Л.М. Тіщенко [126–127] та інших [57–59, 91, 94, 114]. Результати цих досліджень послужили основою створення і вдосконалення процесів сепарації сипких матеріалів і визначення шляху їх подальшого розвитку.

В.П. Горячкін вперше теоретично розглянув процес сепарації зернового матеріалу на решеті і визначив необхідні умови забезпечення відносного руху, зв'язавши величину граничної відносної швидкості з геометричними розмірами зерна і отвору.

М.М. Летошнєв розвинув теорію сепарації зерна на решеті, розглянувши процес розділення зернової суміші на плоскому решеті як випадковий.

Дослідження Г.Д. Терськова та інших вчених присвячені вивченню впливу основних конструктивних, кінематичних і технологічних чинників на кількісні і якісні показники процесу сепарації. Ці дослідження дозволили визначити залежність продуктивності і якості решітної сепарації, які є основними показниками ефективності роботи решіт, від багатьох чинників, що впливають на цей процес.

Дослідження, проведені Г.Д. Терськовим [121–125], І.Є. Кожуховським [69–71], Є.С. Гончаровим [26–28], вказують, що збільшення питомого навантаження різко погіршує якість роботи решіт. За даними І.Є. Кожуховського, збільшення навантаження з 20 кг/(год×дм²) до 60 кг/(год×дм²) при розділенні насіння пшениці зменшує повноту виділення з 0,9 до 0,5 [69–71].

Численні дослідження встановили взаємозв'язок якісних характеристик роботи решіт із станом зернової маси. Дослідження І.Є. Кожуховського [69–71], В.А. Кубишева [83, 85] та інших [94, 85, 101, 143] показали, що залежність фактичної продуктивності решітних сепараторів зерноочисних машин від вологості і засміченості зернової маси має нелінійний характер.

Характер протікання процесу сепарації зернового матеріалу, розташованого на решеті, в значній мірі визначається величиною питомого навантаження і його кінематичним режимом. Для отримання максимальної ефективності процесу сепарації зернової суміші необхідно забезпечити оптимальні параметри робочого органу залежно від типу решітних пристроїв і технологічних властивостей зернового матеріалу.

Одним з перспективних напрямів інтенсифікації процесу просівання на решетах є створення сприятливих умов для проходження зерна в робочі отвори за рахунок оптимізації його конструктивних і кінематичних параметрів. Плоске решето, як розділяючий робочий орган, характеризується такими параметрами: шириною та довжиною решета, формою, розмірами, частотою і характером розташування робочих отворів. Для визначення шляхів підвищення продуктивності і якості роботи плоских решіт необхідно виявити вплив кожного параметра. Збільшення габаритних розмірів – довжини і ширини решета підвищує продуктивність зерноочисної машини, але супроводжується збільшенням габаритів і

металоємності машини, ускладнює очищення решіт і вирівнювання (по ширині) поля швидкостей матеріалу, знижуються його економічні показники [119–121].

Встановлено, що ефективність сепарації зерна на решетах залежить від його відносної швидкості руху по робочій поверхні.

В більшості сучасних зерноочисних машинах швидкість переміщення зерна по решету складає 0,1–0,4 м/с. Критичне значення швидкості руху визначається з умови, що при певному кінематичному режимі роботи решета, зерно повинне встигнути пройти в його робочі отвори [56, 62–64].

Дослідженнями Г.Д. Терськова [121–123, 125], В.В. Гортинського [29–34] та ін. [1–2, 19, 60, 86, 117, 120] визначено, що найбільша інтенсивність просівання спостерігається за оптимальної швидкості руху зернового матеріалу.

Проведені О.І. Таран теоретичні дослідження [117] дозволили визначити кінематичний режим роботи решета з умови проходження зерна в отвори. Визначальним чинником, що характеризує їх проходження в отвір обмеженої довжини, є відносна швидкість переміщення по решету. Отже, для подальшого збільшення відносної швидкості переміщення зерна по решету з метою підвищення продуктивності необхідне збільшення довжини робочих отворів. Проте, поперечні перетинки заважатимуть проходу зерна в отвори. Це витікає з отриманого Г.Д. Терськовим [122] виразу для визначення граничної швидкості руху зерна по решету:

$$v_{zp} = \left(a - \frac{b}{2} \pm \frac{\Delta}{2} \operatorname{tg} \beta \right) \sqrt{\frac{g \cos \beta}{\Delta}}, \quad (1.1)$$

де a – довжина отвору решета;

β – кут нахилу решета до горизонту;

Δ – товщина зернівки;

b – довжина зернівки;

g – прискорення вільного падіння.

Знак "+" відноситься до ковзання зерна догори, "-" – до ковзання зерна донизу. З виразу (1.1) виходить, що збільшення граничної відносної швидкості можливе за незмінних розмірах зерна тільки зі збільшенням довжини отвору. Ліквідація поперечних перетинок дозволяє значно збільшити відносну швидкість руху і продуктивність решіт. Збільшення

швидкості руху зерна на плоских решетах гальмується тим, що ці решета працюють тільки в полі гравітаційних сил.

Дослідження М.М. Летошнева [93] показують, що вірогідність просівання зерна через решето збільшується із збільшенням загальної кількості отворів на одиницю площі, тобто вона пропорційна відносній "живій площі" решета. Показником, що характеризує "живу площу" решета, є коефіцієнт його "живого перетину":

$$\mu = \frac{F_{om}}{F}, \quad (1.2)$$

де F_{om} – площа всіх отворів решета;
 F – загальна площа решета.

Найбільший вплив на величину відносної площі живого перетину, за даними М.І. Ленівцева [92], надають поперечні перетинки. Ліквідація поперечних перетинок і зменшення ширини подовжніх дозволяє збільшити μ на 18–46%. Але збільшення площі "живого перетину" за рахунок зменшення ширини перетинок спричиняє за собою зниження міцності решітного полотна.

При ліквідації поперечних перетинок усувається їх шкідливий вплив пов'язаний з ударом зернових частинок в перетинку, який негативно впливає як на процес проходження частинок в отвір, так на травмування зерна [60, 62, 74].

Дослідження проведені В.М. Цециновським, В.А. Кубишевим, Ю.В. Терентьєвим, М.А. Тулькибаєвим, М.Ф. Конченком, О.І. Климком та іншими вченими [9, 43–48, 60–67, 74–77, 85, 87–88, 91, 119, 128–129] решіт, виготовлених з паралельно натягнутих тросів (струн) круглого перетину, свідчать про можливість подальшої інтенсифікації процесу решітної сепарації зерна.

Калібруючі (робочі) перетинки даного решета виготовлялися із сталевого троса $\varnothing 0,8$ – $1,0$ мм. Стабільність робочого розміру отвору решета забезпечувалися за рахунок попереднього натягу кожного троса окремо.

Результати порівняльних випробувань струнного і плоского пробивного решета показали, що струнне решето, завдяки більшій площі "живого" перетину і раціональній геометрії перетинок дозволяє збільшити питому продуктивність сепарації для насіння пшениці на 85%, а для насіння сої – на 100% в порівнянні з існуючими плоскими пробивними

решетами. Сумарна площа отворів струнного решета з робочим розміром отворів 2 мм складає 63–70% від всієї площі сепаруючої поверхні, тоді як у плоско-пробивного решета з такими ж отворами – 43%, тобто підвищується в 1,6 рази [60–62, 85, 128–129].

Удосконалення струнних решіт, запропоноване О.І. Климком [62, 65], дозволили збільшити коефіцієнт "живого" перетину площі більше одиниці ($\mu > 1$) за рахунок розташування струн в два ряди. Застосування такого решета дозволило додатково збільшити продуктивність сепаруючої поверхні на 65% в порівнянні із звичайним струнним решетом з однорядним розташуванням струн.

Таким чином, збільшення площі "живого" перетину решета, яке підвищує вірогідність попадання зерна в робочі отвори, дозволяє значно інтенсифікувати процес сепарації.

Важливою умовою, обов'язковою для проходження зерна через решето, є орієнтація частинки щодо його отворів. Для проходження частинки в отвір вона повинна зайняти певне положення.

В.М. Цециновський та Е. Асадула [11, 133, 136–137] запропонували поздовжні перетинки виконувати не плоскими, а у вигляді трикутника. Профільована поверхня забезпечує направлений рух і орієнтацію зерна, що збільшує вірогідність попадання його в отвори.

Так, за даними В.М. Цециновського [133] ефективність просівання у профільованих решіт з довгастими отворами шириною 5 мм на 30% вище, ніж на звичайних площинних решетах з такими ж отворами.

Дослідження В.А. Кубишева, Ю.В. Терентьєва, М.А. Тулькибаєва [84, 119, 128] показали, що для збільшення вірогідності орієнтації частинок щодо отвору необхідно, щоб положення частинок на перетинках було нестійким, що можливе при застосуванні перетинок опуклої форми.

Дослідження решіт з поздовжніми перетинками трикутної форми, проведені Ю.І. Єрмольєвим, показали, що решета такого типу можуть застосовуватися при обробці насіння різних культур, зокрема, пшениці, ячменю, жита та вівса [39–42]. Проте вони мають меншу площу "живого" перетину $\mu = 0,26–0,34$. Крім того, перетинки з трикутним перерізом добре забезпечують орієнтацію в подовжньому напрямі, погіршуючи одночасно умови орієнтації частинок в поперечному напрямі.

Дослідження, проведені Ю.В. Терентьєвим [122] на решетах з перетинками круглої форми, показали високу ефективність і надійність їх роботи та технологічність виготовлення.

В роботах В.А. Кубишева, Є.С. Коренченко, М.А. Тулькибаєва, О.І. Климка [65, 84, 89, 129] дано математичний опис процесу "мимовільної орієнтації" частинок щодо отвору під дією сили тяжіння частинок. Визначені умови "мимовільної орієнтації" частинок на поздовжніх перетинках, що мають різну конфігурацію. Головною є умова, за якої кут між дотичними в точці контакту частинок з перетинкою повинен бути менше кута тертя.

О.І. Климком [62, 65–67] були проведені дослідження по впливу профілю поздовжніх перетинок решета на час орієнтації прохідної частки відносно його отвору. В результаті яких було встановлено, що найменший час 4,5 с потрібен на зміну її орієнтації у разі використання перетинок з трикутним поперечним перерізом, 5,2 с для круглих та 10,3 с – для плоско пробивних решіт [65, 67].

Таким чином, беручи до уваги незначну різницю в часі орієнтації прохідної частки на перетинках з трикутним та круглим профілем поперечного перерізу, та здатність трикутних перетинок втрачати задане початкове положення по їх довжині під впливом ваги оброблюваного матеріалу, доцільно використовувати пруткові решета з круглими перетинками.

Проведений аналіз впливу технологічних, кінематичних і конструктивних параметрів на ефективність процесу решітної сепарації зерна свідчить про необхідність і важливість його орієнтації відносно робочих отворів. Саме такою орієнтуючою здатністю володіють решета із прутковою та струнною сепаруючою поверхнею, проте їх робота вивчена недостатньо. Для їх широкого застосування і ефективного використання в ЗОМ їх дослідження необхідно продовжити.

1.5. Висновки та задачі дослідження

Із проведеного огляду і аналізу сучасного стану післязбирального очищення зерна можна зробити наступні основні висновки:

- присутність крупних домішок в повітряному каналі заважає виділенню в ньому легких домішок та потребує збільшення витрат енергії для забезпечення стабільної роботи аспіраційної системи, тому існуюча послідовність виконання технологічних операцій зерноочисними машинами, в якій спочатку виділяються легкі домішки, а потім інші, не є раціональною;

- підвищення ефективності очищення зерна зерноочисними машинами можливе за рахунок використання більш раціональної послідовності технологічних операцій, вдосконалення конструкції їх робочих органів, в тому числі на основі об'єднання двох і більше технологічних операцій в одному робочому органі, а також обґрунтування їх параметрів і режимів роботи;
- перспективним напрямком підвищення ефективності решітної сепарації зерна є використання решіт з робочими отворами (каналами) "нескінченої" довжини з опуклим поперечним перерізом калібруючих перетинок, які забезпечують самоорієнтацію частинок зернового матеріалу відносно робочих отворів і підвищують інтенсивність виділення підсіву;
- використання решіт з робочими отворами (каналами) "нескінченої" довжини дозволяє збільшити відносну швидкість переміщення зерна по решету для підвищення його продуктивності роботи;
- процес руху зернового вороху товстим шаром, що відбувається на робочих органах зерноочисних машин є недостатньо вивченим і вимагає проведення подальших досліджень, особливо з урахуванням між шарової взаємодії часток, оскільки вказане явище суттєво впливає на динаміку розгону маси;
- в проведених дослідженнях багатьох авторів не у повній мірі розкрито вплив конструктивних параметрів решета з опуклим поперечним перерізом калібруючих перетинок на його технологічні показники.

У відповідності з проведеним аналізом і означеною метою поставлені наступні задачі досліджень:

- обґрунтувати раціональну схему ЗОМ загального призначення та конструкцію її завантажувального транспортера-сепаратора;
- дослідити вплив основних параметрів транспортера-сепаратора на ефективність його роботи і встановити їх раціональні значення;
- визначити вплив властивостей зернового вороху на ефективність решітної сепарації;
- встановити енергоємність технологічного процесу роботи транспортера-сепаратора;
- розробити методику інженерного розрахунку запропонованого робочого органу та провести оцінку техніко-економічної ефективності використання результатів дослідження.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПАРАМЕТРІВ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНО–СЕПАРУЮЧОГО ОРГАНУ ЗЕРНООЧИСНОЇ МАШИНИ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

2.1. Аналіз багат шарового руху зерна

Технологічний процес роботи запропонованого завантажувача–сепаратора складається із кількох фаз:

- забір вороху з бурта;
- транспортування матеріалу до місця розвантаження транспортера;
- розвантаження транспортера;
- рух зернового вороху по решітній поверхні та його сепарація.

Перші три фази достатньо вивчені та висвітлені в науково–технічній літературі [78]. Найбільшу зацікавленість для нас має остання фаза. Під час якої відбувається ділення часток зернового вороху на робочій поверхні решітного сепаратора за товщиною.

Частки зернового вороху, що надходять на поверхню сепарації, по його висоті, в залежності від подачі, можуть розташовуватися в один чи кілька шарів. В більшості теоретичних досліджень, в яких вивчався рух зернової частки по поверхні решета, не розглядався вплив верхніх шарів на частку, що рухається по ній [18–19, 35, 39, 43–48, 55, 65–66, 69–72, 74–77, 84, 89, 94, 99–100, 105, 114, 117, 119, 122–127, 133], а використовувався найбільш поширений і спрощений підхід у його вивченні, а саме рух ізольованої матеріальної частки.

Розглянемо багат шаровий рух зернових часток по похилій поверхні решета, для чого приймемо наступні припущення (рис. 2.1):

- в різних по висоті шарах зернового вороху містяться частки з однаковою масою;
- розміри часток не враховуємо – приймаємо частки за матеріальні точки;
- коефіцієнти тертя часток по похилій площині f_1 та внутрішнього тертя f_2 не залежать від швидкості руху і навантаження, тобто $f_1 = \varphi(v, Q) = const, f_2 = \varphi(v, Q) = const$;
- дія сил сусідніх часток, які знаходяться ліворуч, праворуч, попереду та позаду відносно тієї, що розглядається, взаємно врівноважуються, а їх сума рівна нулю.

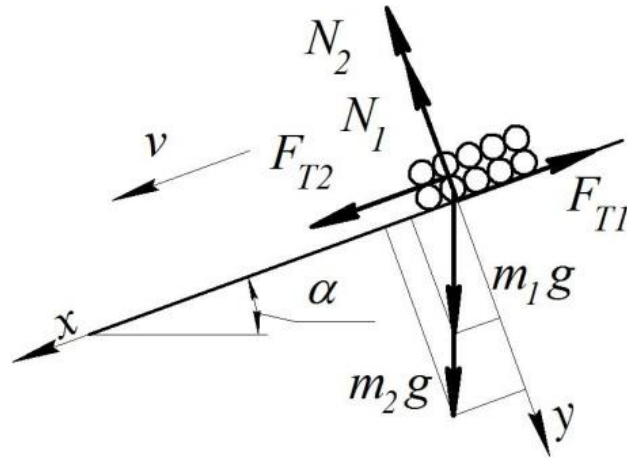


Рис. 2.1. Схема сил, що діють на зернову частку при її русі по похилій шорсткій поверхні

В системі діють:

- сила тяжіння m_1g ;
- сила тяжіння верхнього шару m_2g ;
- нормальна реакція часток верхнього шару N_2 ;
- сила внутрішнього тертя між частками нижнього та верхнього шарів F_2 ;
- нормальна реакція поверхні N_1 ;
- сила тертя частки по робочій поверхні F_1 .

Запишемо вирази для визначення відомих сил:

$$N_2 = m_2g \cos \alpha; \quad F_2 = f_2 N_2 = f_2 m_2g \cos \alpha,$$

де g – прискорення вільного падіння

α – кут нахилу поверхні;

f_2 – коефіцієнт внутрішнього тертя зернових часток.

Знайдемо невідомі сили:

$$N_1 = f_1(m_1 + m_2) \cos \alpha; \quad F_1 = f_1 N_1 = f_1(m_1 + m_2) \cos \alpha,$$

де f_1 – коефіцієнт тертя зернових часток по похилій шорсткій поверхні.

Рівняння руху частки нижнього шару під дією зовнішніх сил відносно осі X має вигляд:

$$m_1g \sin \alpha + m_2g \sin \alpha + f_2 m_2g \cos \alpha - f_1(m_1 + m_2)g \cos \alpha - m_1 \frac{dv_1}{dt} = 0. \quad (2.1)$$

З виразу (2.1) виведемо рівняння руху зернової частки нижнього ряду під дією зовнішніх сил:

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = m_1 g \sin \alpha + m_2 g \sin \alpha + f_2 m_2 g \cos \alpha - f_1 (m_1 + m_2) g \cos \alpha. \quad (2.2)$$

Спростивши праву частину виразу отримаємо:

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = \left((m_1 + m_2) \sin \alpha - \left((m_1 + m_2) f_1 - m_2 f_2 \right) \cos \alpha \right) \cdot g.$$

Розділимо тепер обидві частини на масу частки нижнього шару:

$$dv_1 = g \left(\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \sin \alpha - \left(\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) f_1 - \frac{m_2}{m_1} f_2 \right) \cos \alpha \right) dt. \quad (2.3)$$

Проінтегрувавши отриманий вираз за часом та визначивши постійну інтегрування за умови, що $v_0 \neq 0$, отримаємо рівняння швидкості руху частки нижнього шару з урахуванням впливу на неї частки верхнього шару

$$v_1 = v_0 + gt \left(\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \sin \alpha - \left(\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) f_1 - \frac{m_2}{m_1} f_2 \right) \cos \alpha \right). \quad (2.4)$$

Розглянемо залежності руху частки під впливом верхніх шарів.

Якщо зерновий матеріал рухається тонким шаром товщиною в одне зерно, тобто $m_2=0$ (число рядів $n=1$)

$$v_{1(1)} = v_0 + gt (\sin \alpha - f_1 \cos \alpha). \quad (2.5)$$

Це рівняння відповідає відомому рівнянню руху матеріальної точки по шорсткій похилій поверхні під дією сили ваги [19].

Якщо зерновий матеріал рухається шаром товщиною в два зерна, а також згідно прийнятих припущень $m_2=m_1$ ($n=2$) в залежності від значень коефіцієнтів тертя по шорсткій похилій поверхні часток нижнього ряду та внутрішнього тертя між частками нижнього та верхніх шарів вираз (2.4) матиме вигляд:

– якщо коефіцієнти тертя різні за значенням, тобто $f_1 \neq f_2$

$$v_{1(1)} = v_0 + gt(2\sin\alpha - (2f_1 - f_2)\cos\alpha), \quad (2.6)$$

– якщо коефіцієнти тертя рівні за значенням, тобто $f_1 = f_2$

$$v_{1(2)}' = v_0 + gt(2\sin\alpha - f_1\cos\alpha). \quad (2.7)$$

У випадку коли зернові частки розташовуються на поверхні товщиною в три ряди ($n=3, m_2=2m_1$) вирази (2.6) та (2.7) набудуть наступного вигляду:

– при $f_1 \neq f_2$

$$v_{1(3)} = v_0 + gt(3\sin\alpha - (3f_1 - 2f_2)\cos\alpha), \quad (2.8)$$

– при $f_1 = f_2$

$$v_{1(3)}' = v_0 + gt(3\sin\alpha - f_1\cos\alpha). \quad (2.9)$$

З урахуванням виразів (2.5)–(2.9), рівняння (2.4) можна записати як:

– при $f_1 \neq f_2$

$$v_{1(n)} = v_0 + gt(n\sin\alpha - (nf_1 - (n-1)f_2)\cos\alpha); \quad (2.10)$$

– при $f_1 = f_2$

$$v_{1(n)}' = v_0 + gt(n\sin\alpha - f_1\cos\alpha). \quad (2.11)$$

Аналіз отриманих рівнянь (2.10) та (2.11) свідчить, що при багат шаровому русі сипкого матеріалу на швидкість часток нижнього шару впливають, як величина кута нахилу робочої поверхні α та коефіцієнта зовнішнього тертя f_1 , так і кількість верхніх шарів та величина співвідношень між коефіцієнтами зовнішнього f_1 та внутрішнього f_2 тертя.

Більш інформативною є залежність швидкості руху частки від шляху, який вона пройшла. Для цього виразимо з (2.10) значення часу

$$t = \frac{v_{1(n)} - v_0}{g(n \sin \alpha - (nf_1 - (n-1)f_2) \cos \alpha)}. \quad (2.12)$$

Проінтегрувавши (2.10) за часом та підставивши (2.12), після перетворень отримаємо наступний вираз:

$$v_{1(n)} = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g \cdot S (n \sin \alpha - (nf_1 - (n-1)f_2) \cos \alpha)}. \quad (2.13)$$

Залежності швидкості руху частки по похилій поверхні від пройденого нею шляху наведено на рис. 2.2–2.3.

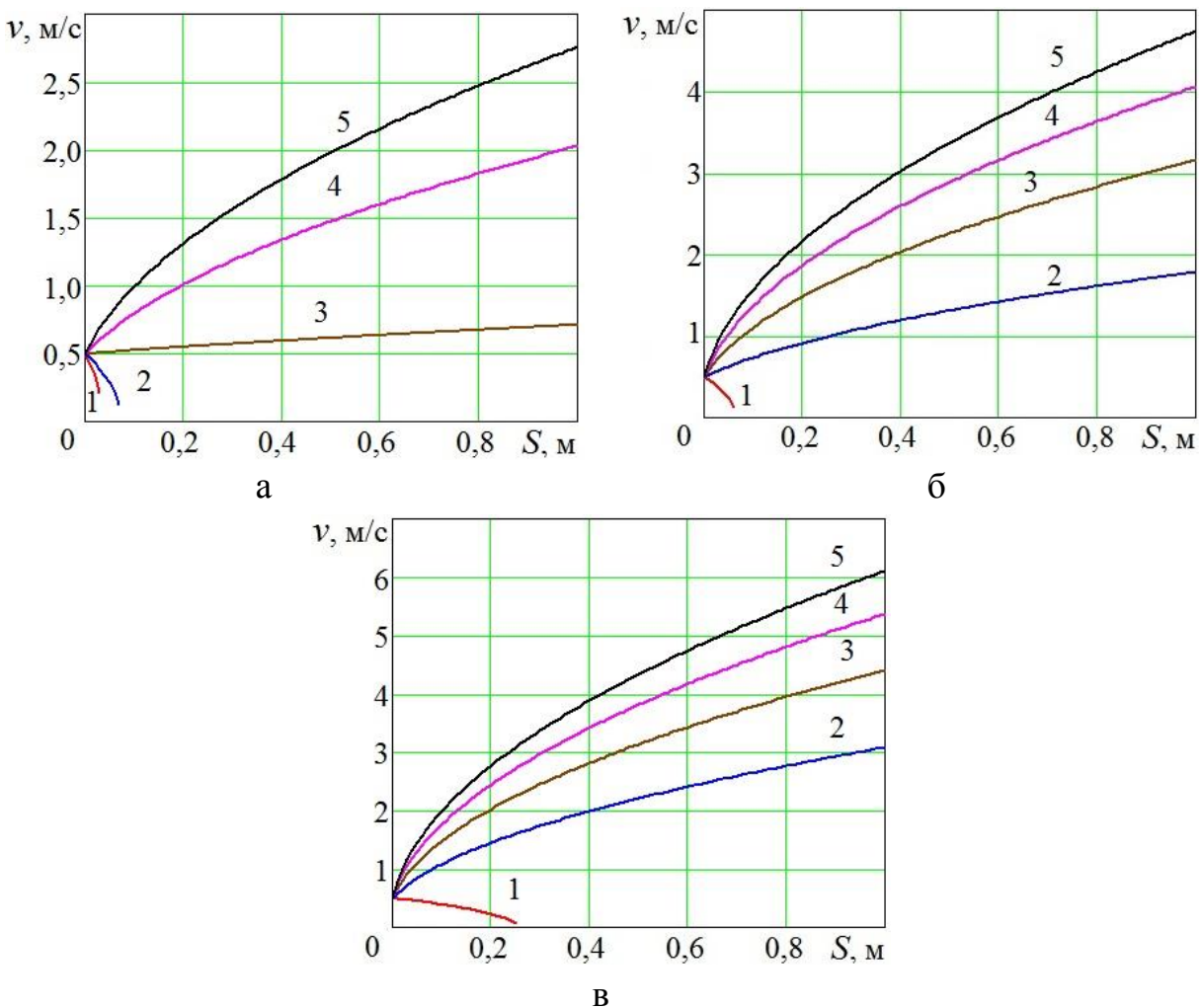


Рис. 2.2. Залежності швидкості руху частки нижнього шару по похилій поверхні від пройденого шляху:

а, б, в, – відповідно за умов коли частки розташовуються під час руху по похилій поверхні в один шар ($n=1$), в два шари ($n=2$) та три шари ($n=3$); 1, 2, 3, 4, 5 – відповідно при кутах нахилу поверхні відносно горизонту $0, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ та 40°

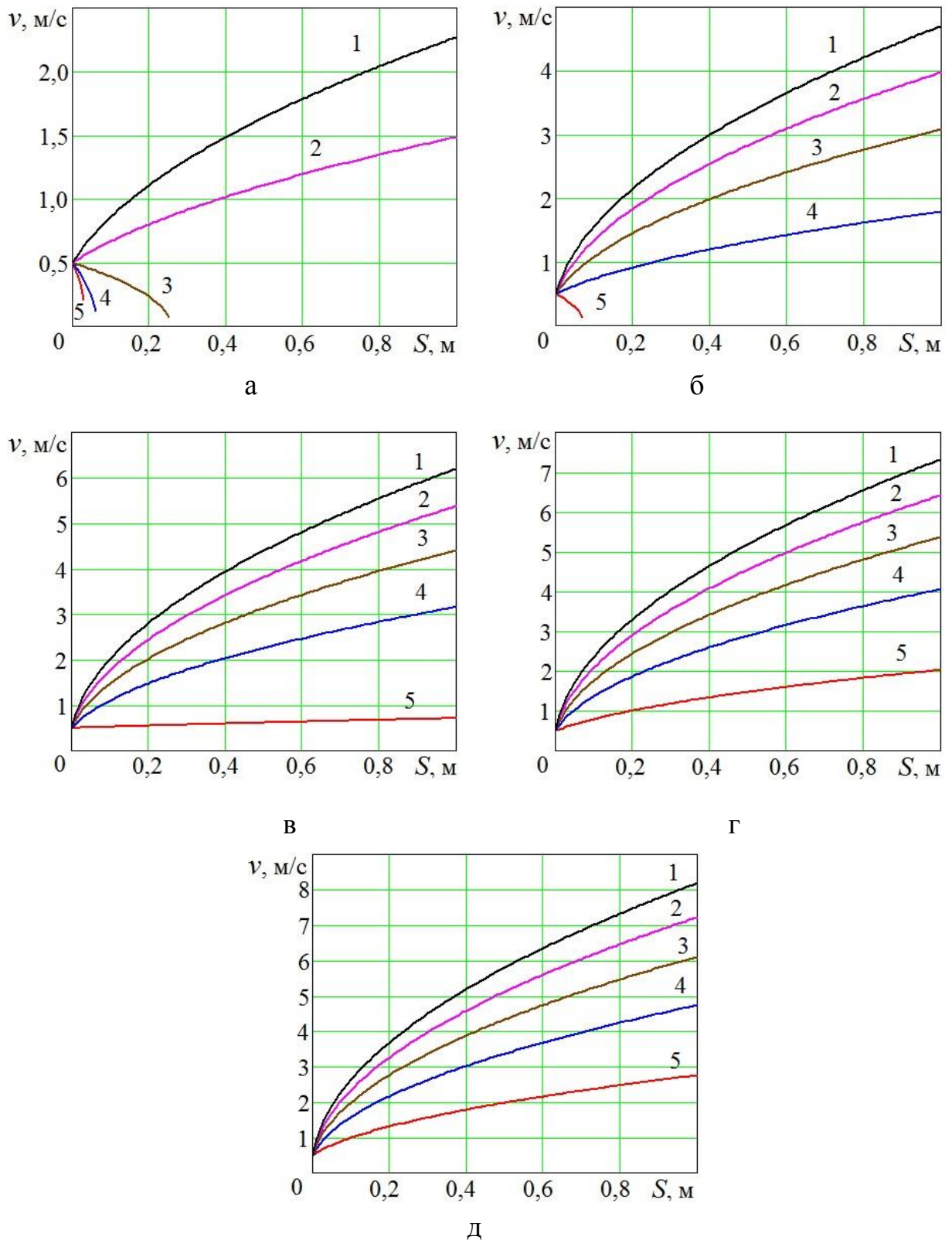


Рис. 2.3. Залежності зміни швидкості часток при багат шаровому русі:

а, б, в, г, д – відповідно, при кутах нахилу поверхні відносно горизонту $0, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ та 40° ; 1, 2, 3, 4, 5 – для руху матеріалу в п'ять шарів, відповідно, часток нижнього шару ($n=4$), другого шару ($n=3$), третього шару ($n=2$), четвертого шару ($n=1$) та п'ятого шару ($n=0$)

Таким чином, аналіз отриманих закономірностей дозволяє відзначити, що збільшення кількості шарів в сипкому зерновому матеріалі сприяє підвищенню швидкості часток що рухаються в нижньому шару. Але величина збільшення їх швидкості при однаковій кількості шарів залежить від співвідношення коефіцієнтів зовнішнього та внутрішнього тертя f_1/f_2 .

2.2. Моделювання руху прохідної частки по перетинці пруткового решета

Аналіз наукової літератури показав, що умови орієнтації прохідної частки на пруткових решетах достатньо вивчені та визначені в ході теоретичних та експериментальних досліджень. В той же час не вивчався її рух по поверхні самої перетинки після зміни орієнтації з непрохідної на прохідну.

Якість решітного розділення залежить від швидкості руху матеріалу по поверхні решета, кута його нахилу до горизонту, діаметра прутків решета, робочої ширини його каналів та довжини сепаруючої поверхні.

Під час сепарації зернового вороху на решеті практично кожна частка деякий час рухається по поверхні самої перетинки. Траєкторія її руху складається з переміщення уздовж вісі перетинки і одночасно навколо її циліндричної поверхні (рис. 2.4).

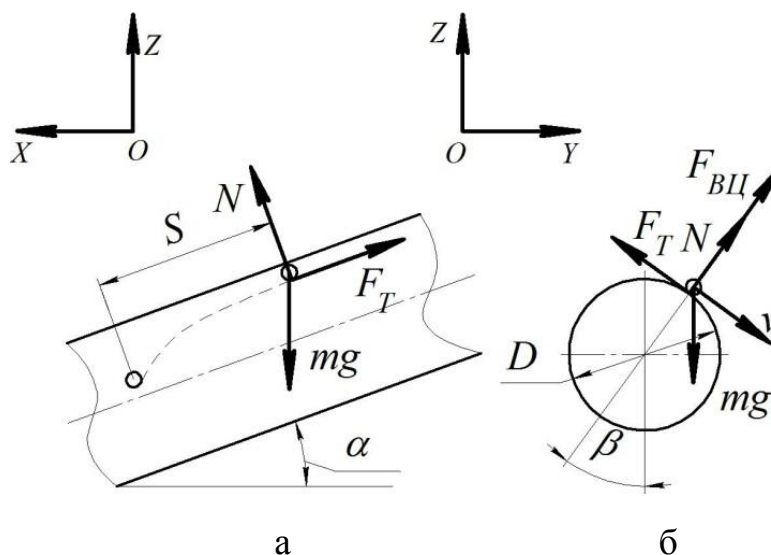


Рис. 2.4. Схеми руху зернини по поверхні перетинки решета та діючих сил:

а – рух уздовж каналів решета; б – рух навколо циліндричної поверхні перетинки решета

При розгляді даного питання зробимо наступні припущення:

- розміри частки не враховуємо – приймаємо її за матеріальну точку;
- дія сил інших часток, які знаходяться ліворуч, праворуч, попереду, позаду та поверх тієї, що розглядається не враховується;

– за незначних швидкостей руху частки опором повітря нехтуємо.

Рівняння руху частинки по циліндричній поверхні запишеться як

$$m\bar{V}' = \bar{P} + \bar{N} + \bar{F}_T, \quad (2.14)$$

де \bar{V} – швидкість руху;
 \bar{P} – сила тяжіння;
 \bar{N} – сила реакції поверхні;
 $|\bar{F}_T| = f \cdot (|\bar{N}| - |\bar{F}_{BC}|)$ – сила тертя;
 \bar{F}_{BC} – відцентрова сила;
 f – коефіцієнт тертя.

Розглянемо дві декартові системи координат: перша $OXYZ$ – осі OX та OY задають горизонтальну площину, вісь OZ – направлена вгору; друга $OX'Y'Z'$ – отримується в результаті повороту системи $OXYZ$ на кут α відносно осі OY , вісь OX' направлена в бік руху частки.

Площина, в якій відбувається рух частки, є дотичною площиною до поверхні перетинки в точці, яка задається положенням матеріальної точки, і визначається двома кутами: кутом нахилу осі перетинки до горизонтальної площини (кут α) та кутовим виміром положення матеріальної точки відносно вісі z в поперечному перерізі перетинки (кут β). Таким чином, вказана площина отримується в результаті двох поворотів площини OXY : перший – поворот площини OXY навколо осі OY на кут α , другий – поворот отриманої площини навколо осі перетинки (вісь OX) на кут β .

Вектори нормалі \bar{n} , \bar{n}_1 , \bar{n}_2 площини OXY та двох останніх площин в системі координат $OXYZ$ мають вигляд

$$\bar{n}(0,0,1), \quad \bar{n}_1(\sin \alpha, 0, \cos \alpha), \quad \bar{n}_2(\sin \alpha \cos \beta, \sin \beta, \cos \alpha \cos \beta). \quad (2.15)$$

Запишемо рівняння (2.14) в проекціях на осі декартової системи координат $OX'Y'Z'$:

$$\begin{cases} m\bar{V}'_{X'} = \bar{P}_{X'} + \bar{F}_{TX'} \\ m\bar{V}'_{Y'} = \bar{P}_{Y'} + \bar{F}_{TY'} \\ m\bar{V}'_{Z'} = \bar{P}_{Z'} + \bar{F}_{TZ'} \end{cases} \quad (2.16)$$

Для визначення проекцій $\bar{P}_{X'}$, $\bar{P}_{Y'}$, $\bar{P}_{Z'}$ розкладемо силу тяжіння \bar{P} на складові: в миттєвій площині руху та перпендикулярно до неї:

$$|\bar{P}_\tau| = mg \cdot \sin \gamma, \quad |\bar{P}_N| = mg \cdot \cos \gamma, \quad (2.17)$$

де

$$\cos \gamma = \cos \alpha \cos \beta, \quad \sin \gamma = \sqrt{1 - \cos^2 \gamma}. \quad (2.18)$$

Вектор \bar{S}_{P_τ} , який задає напрям вектора \bar{P}_τ , визначається як:

$$\bar{S}_{P_\tau} = \left[\left[\bar{n} \times \bar{n}_2 \right] \times \bar{n}_2 \right]. \quad (2.19)$$

Підставивши (2.15) в (2.19) отримаємо:

$$\bar{S}_{P_\tau} = \sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \beta \bar{i} + \sin \beta \cos \beta \cos \alpha \bar{j} - (\sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta) \bar{k}.$$

Знайдемо косинуси кутів, які утворює вектор \bar{S}_{P_τ} з осями координат системи $OX'Y'Z'$, де $\bar{i}' = \cos \alpha \bar{i} - \sin \alpha \bar{k}$, $\bar{j}' = \bar{j}$, $\bar{k}' = \sin \alpha \bar{i} + \cos \alpha \bar{k}$:

$$\text{а) } \cos(\bar{S}_{P_\tau}, \bar{i}') = \frac{(\bar{S}_{P_\tau} \cdot \bar{i}')}{|\bar{S}_{P_\tau}| \cdot |\bar{i}'|} = \frac{\sin \alpha}{|\bar{S}_{P_\tau}|};$$

$$\text{б) } \cos(\bar{S}_{P_\tau}, \bar{j}') = \frac{(\bar{S}_{P_\tau} \cdot \bar{j}')}{|\bar{S}_{P_\tau}| \cdot |\bar{j}'|} = \frac{\sin \beta \cos \beta \cos \alpha}{|\bar{S}_{P_\tau}|};$$

$$\text{в) } \cos(\bar{S}_{P_\tau}, \bar{k}') = \frac{(\bar{S}_{P_\tau} \cdot \bar{k}')}{|\bar{S}_{P_\tau}| \cdot |\bar{k}'|} = \frac{-\sin^2 \beta \cos \alpha}{|\bar{S}_{P_\tau}|},$$

тут

$$|\overline{S}_{P_\tau}| = \sqrt{\sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta}. \quad (2.20)$$

Таким чином сили, що діють на частку відносно осей координат

$$\left. \begin{aligned} P_{x'} &= |\overline{P}_\tau| \cos \alpha_{x'} = \frac{mg}{|\overline{S}_{P_\tau}|} \sin \gamma \sin \alpha \\ P_{y'} &= |\overline{P}_\tau| \cos \alpha_{y'} = \frac{mg}{|\overline{S}_{P_\tau}|} \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \cos \beta \\ P_{z'} &= |\overline{P}_\tau| \cos \alpha_{z'} = \frac{mg}{|\overline{S}_{P_\tau}|} \sin \gamma \sin^2 \beta \cos \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (2.21)$$

Визначимо силу тертя. Очевидно, що

$$\overline{F}_T = f \cdot \left(mg \cos \gamma - \frac{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}{R} m \right) \cdot \overline{S}_{мер}, \quad (2.22)$$

де $\overline{S}_{мер} = -\frac{V_{x'}}{|V|} \overline{i}' - \frac{V_{y'}}{|V|} \overline{j}' - \frac{V_{z'}}{|V|} \overline{k}'$, значення $\cos \gamma$ визначене в (2.18);

$V_{x'}$, $V_{y'}$, $V_{z'}$ – проєкції вектора швидкості \overline{V} на відповідні осі системи координат $OX'Y'Z'$.

Зміна кута β визначається диференціальним рівнянням

$$\overline{\beta}' = \frac{\sqrt{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}}{R}. \quad (2.23)$$

Частка буде рухатись по циліндричній поверхні при виконанні умови

$$g \cos \gamma - \frac{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}{R} \geq 0. \quad (2.24)$$

Якщо ж в деякий момент часу $t=t_{cx}$ умова (2.23) порушується, тобто має місце нерівність

$$g \cos \gamma - \frac{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}{R} < 0,$$

то частинка відривається або сходить з циліндричної поверхні і переходить в стан вільного падіння.

Отже, з (2.14)–(2.24) слідує, що задача знаходження траєкторії руху частинки при русі по циліндричній поверхні зводиться до розв'язування системи диференціальних рівнянь:

а) до сходу з перетинки $t \leq t_{cx}$:

$$\begin{cases} \overline{V}'_{x'} = g \cdot \frac{\sin \gamma \sin \alpha}{\sqrt{\sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta}} - f \cdot \left(g \cos \gamma - \frac{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}{R} \right) \cdot \frac{V_{x'}}{|V|}, \\ \overline{V}'_{y'} = g \cdot \frac{\sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \cos \beta}{\sqrt{\sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta}} - f \cdot \left(g \cos \gamma - \frac{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}{R} \right) \cdot \frac{V_{y'}}{|V|}, \\ \overline{V}'_{z'} = -g \cdot \frac{\sin \gamma \sin^2 \beta \cos \alpha}{\sqrt{\sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta}} - f \cdot \left(g \cos \gamma - \frac{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}{R} \right) \cdot \frac{V_{z'}}{|V|}, \\ \overline{\beta}' = \frac{\sqrt{V_{y'}^2 + V_{z'}^2}}{R}. \end{cases}, \quad (2.25)$$

$$V_{x'}=V_{ox}, \quad V_{y'}=V_{z'}=0, \quad \beta=\beta_0 \quad \text{при } t=0, \quad (2.26)$$

б) після сходу з перетинки ($t > t_{cx}$):

$$\begin{cases} \overline{V}'_{x'} = g \sin \alpha, \\ \overline{V}'_{y'} = 0, \\ \overline{V}'_{z'} = g \cos \alpha \end{cases}, \quad (2.27)$$

$$V_{x'}=V_{x'cx}, \quad V_{y'}=V_{y'cx}, \quad V_{z'}=V_{z'cx}, \quad \text{при } t=t_{cx}. \quad (2.28)$$

Систему рівнянь (2.25) розв'язати аналітично складно. На рис. 2.5–2.7 наведені результати розв'язування даної системи з використанням програми MathCAD [110] при $f=0,35$.

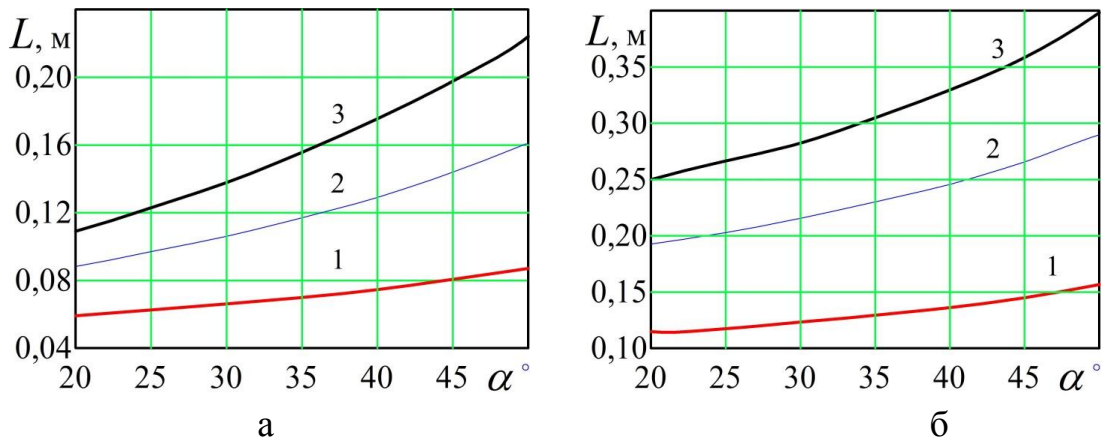


Рис. 2.5. Залежність довжини ділянки сходження частки з поверхні перетинки решета від кута нахилу:

а, б – відповідно, за початкової швидкості руху 0,5 м/с та 1,5 м/с;

1 – $R=0,5$ мм; 2 – $R=1,5$ мм; 3 – $R=2,5$ мм

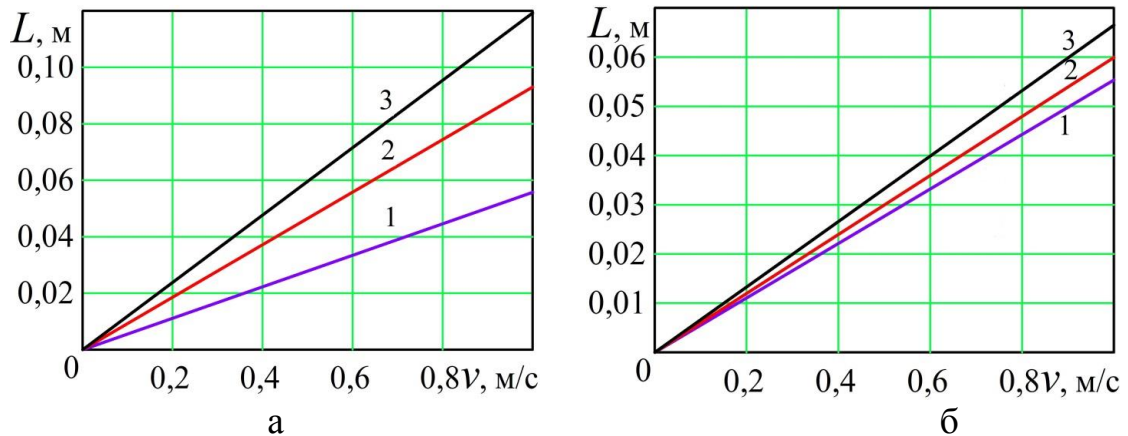


Рис. 2.6. Залежність довжини ділянки сходження частки з поверхні перетинки решета від початкової швидкості частки

а – при куті $\alpha=20^\circ$; 1 – $R=0,5$ мм; 2 – $R=1,5$ мм; 3 – $R=2,5$ мм; б – при радіусі $R=0,5$ мм; 1 – $\alpha=20^\circ$; 2 – $\alpha=30^\circ$; 3 – $\alpha=40^\circ$

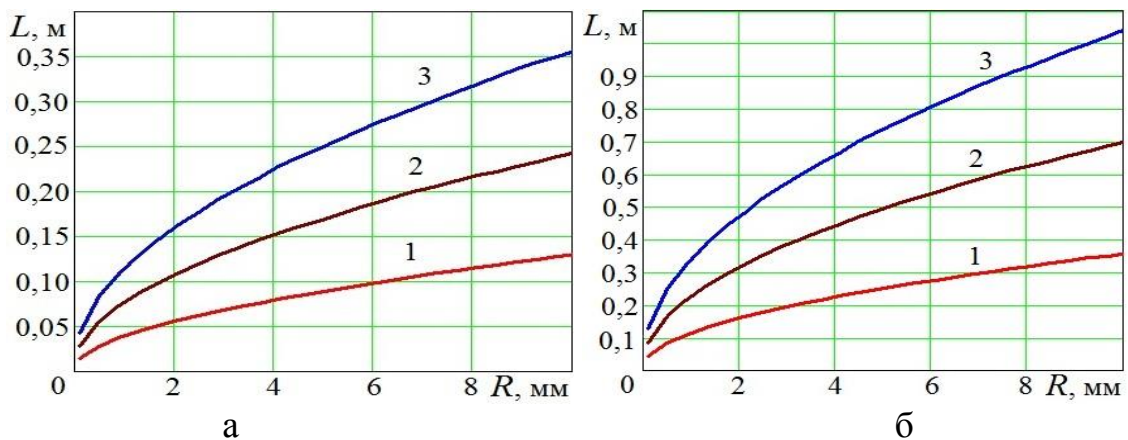


Рис. 2.7. Залежність довжини ділянки сходження частки з поверхні перетинки решета від радіуса прутка

а, б – відповідно, за початкової швидкості руху 0,5 м/с та 1,5 м/с; 1, 2, 3 – кути нахилу перетинки щодо горизонту 20° , 30° та 40° відповідно

Аналізуючи отримані залежності потрібно зазначити, що на довжину ділянки сходу частки впливають кут нахилу до горизонту радіус перетинки та початкова швидкість руху самої частки. Причому зі всіх означених вище чинників частки збільшується шлях, що проходить частка по поверхні перетинки до точки сходу. При накладені застосованих припущень ця відстань є потрібною довжиною решітної поверхні.

2.3. Аналіз процесу сепарування зерна

Критеріями оцінки технологічної ефективності сепаратора є кількісний показник – продуктивність роботи та якісний – повнота виділення домішок.

Продуктивність решітного сепаратора визначається

$$Q = q_F \cdot B_p \cdot S = q_B \cdot B_p, \quad (2.29)$$

де q_F – питома продуктивність одиниці площі решета, кг/(м²·с);
 B_p – ширина сепаруючої поверхні, м;
 S – довжина сепаруючої поверхні, м;
 q_B – питома продуктивність одиниці ширини решета, кг/(м·с).
 Повноту виділення домішок представимо у вигляді

$$\varepsilon = \frac{p}{p_0}, \quad (2.30)$$

де p – кількість підсіву, що пройшов крізь отвори решета;
 p_0 – вміст підсіву у вихідному матеріалі.

Позначимо шлях руху матеріалу по поверхні решета (рис. 2.8) як S , а відносний вміст підсіву в ньому як ψ . Тоді, вважаючи що зміна кількості підсіву в оброблюваному матеріалі $d\psi$ на нескінченно малій довжині решета dS пропорційна кількості підсіву, що поступив на даний відрізок, а також, що відношення швидкості зміни функції $\frac{d\psi}{dS}$ на одиницю величини функції є величиною постійною, рівною коефіцієнту сепарації μ [96], то з урахуванням зменшення ψ при збільшенні S , запишемо наступне диференціальне рівняння для процесу просіювання дрібних фракцій крізь канали решета

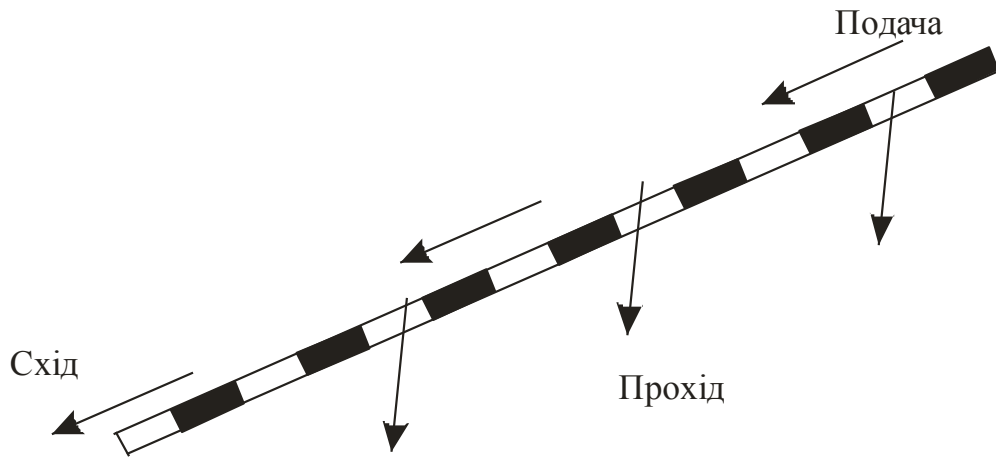


Рис. 2.8. Схема руху матеріалу по решету

$$-\frac{d\psi}{dS} = \mu \cdot \psi, \quad (2.31)$$

або

$$-\frac{d\psi}{\psi} = \mu \cdot dS. \quad (2.32)$$

Проінтегруємо рівняння (2.32) та отримаємо

$$\ln \psi = -\mu \cdot S + \ln c_1, \quad (2.33)$$

де $\ln c_1$ – постійна інтегрування.

Тоді

$$\ln \frac{\psi}{c_1} = -\mu \cdot S. \quad (2.34)$$

Звідки

$$\frac{\psi}{c_1} = e^{-\mu \cdot S}, \quad (2.35)$$

де e – основа натуральних логарифмів.

Підставимо в (2.35) початкові умови: $t=0, S=0$ та $\psi=\psi_0$, знайдемо

$$\psi = \psi_0 = c_1, \quad (2.36)$$

де ψ_0 – відносний вміст підсіву в оброблюваному матеріалі на початку сепарації.

Тоді, залишок підсіву на відстані S від місця подачі визначиться рівнянням

$$\psi_k = c_1 \cdot e^{-\mu S}. \quad (2.37)$$

Залишок підсіву на відстані S від місця подачі визначиться рівнянням

$$\psi_k = \psi_0 \cdot e^{-\mu S}. \quad (2.38)$$

Кількість підсіву, що пройшов крізь решето на довжині S

$$\psi_p = \psi_0 - \psi_k = \psi_0 (1 - e^{-\mu S}). \quad (2.39)$$

Якісний показник сепарації – повноту виділення (2.29) представимо у вигляді відношення відносних показників

$$\varepsilon = \frac{\psi_p}{\psi_0} = 1 - e^{-\mu S}. \quad (2.40)$$

Перетворивши його отримаємо

$$e^{-\mu S} = 1 - \varepsilon,$$

або

$$e^{\mu S} = \frac{1}{1 - \varepsilon}. \quad (2.41)$$

Прологарифмуємо це рівняння відносно μ

$$\mu = \frac{1}{S} \ln \frac{1}{1 - \varepsilon}. \quad (2.42)$$

З отриманого рівняння можна отримати значення експериментального коефіцієнта сепарації, задавши значення S та ε .

Довжину шляху S , пройденого матеріалом, знайдемо проінтегрувавши (2.10) двічі за часом

$$S = v_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2} \left(n \cdot \sin \alpha - (n \cdot f_1 - (n-1) f_2) \cdot \cos \alpha \right). \quad (2.43)$$

Підставивши з (2.12) час t в (2.43) і провівши перетворення отримаємо

$$S = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot g \left(n \cdot \sin \alpha - (n \cdot f_1 - (n-1) f_2) \cos \alpha \right)}. \quad (2.44)$$

Продуктивність решета

$$Q = v \cdot B_{жс} \cdot h \cdot \rho, \quad (2.45)$$

де $B_{жс}$ – ширина "живого" перерізу решета, м

$$B_{жс} = z \cdot c, \quad (2.46)$$

де z – кількість каналів решета, шт.

$$z = \frac{B_p - c}{c + D}, \quad (2.47)$$

де c – ширина каналу решета, м;

D – діаметр поперечного перерізу поздовжньої перетинки, м;

h – середня товщина шару вороху, м

$$h = n \cdot b_3, \quad (2.48)$$

де b_3 – середня товщина зерна, м;

ρ – щільність зернового вороху, кг/м^3 .

Таким чином, з урахуванням (2.46)–(2.48) рівняння (2.45) прийме наступний вигляд

$$Q = v \cdot \frac{B_p - c}{c + D} \cdot c \cdot n \cdot b_3 \cdot \rho. \quad (2.49)$$

Визначимо питому продуктивність одиниці ширини решета, для чого підставимо (2.48) в (2.29)

$$q_B = \frac{Q}{B_p} = \frac{B_p - c}{B_p \cdot (c + D)} \cdot v \cdot c \cdot n \cdot b_3 \cdot \rho. \quad (2.50)$$

Визначимо питому продуктивність одиниці площі решета з рівняння (2.29)

$$q_F = \frac{Q}{B_p \cdot S}, \quad (2.51)$$

Підставивши (2.44) та (2.50) у вираз (2.51) і отримаємо

$$q_F = \frac{2 \cdot g \left(n \cdot \sin \alpha - (n \cdot f_1 - (n-1) f_2) \cos \alpha \right) (B_p - c) \cdot v \cdot c \cdot n \cdot b_3 \cdot \rho}{B_p \cdot (c + D) \cdot (v^2 - v_0^2)}. \quad (2.52)$$

З урахуванням виразу (2.42) рівняння (2.52) прийме наступний вигляд

$$q_F = \frac{2 \cdot g \cdot \mu \left(n \cdot \sin \alpha - (n \cdot f_1 - (n-1) f_2) \cos \alpha \right) (B_p - c) \cdot v \cdot c \cdot n \cdot b_3 \cdot \rho}{B_p \cdot (c + D) \cdot (v^2 - v_0^2) \ln \frac{1}{1 - \varepsilon}}. \quad (2.53)$$

Таким чином, підставивши у (2.29) рівняння (2.44) та (2.53) визначимо продуктивність решета

$$Q = \frac{2 \cdot g \cdot S \cdot \mu \left(n \cdot \sin \alpha - (n \cdot f_1 - (n-1) f_2) \cos \alpha \right) (B_p - c) \cdot v \cdot c \cdot n \cdot b_3 \cdot \rho}{(c + D) \cdot (v^2 - v_0^2) \ln \frac{1}{1 - \varepsilon}}. \quad (2.54)$$

Теоретичне визначення коефіцієнта сепарації μ ускладнене, оскільки він є функцією великої кількості значущих факторів, тому величину його можна знайти експериментально.

2.4. Обґрунтування діаметру поздовжніх перетинок решета

При обґрунтуванні діаметру поздовжніх перетинок решета приймемо, що частки оброблюваного матеріалу мають форму кулі діаметром d (рис. 2.8), а їх попадання у будь-яку зону решітної поверхні рівновірогідне. Кожний сепаруючий канал решета утворюється двома сусідніми поздовжніми перетинками (прутками) коловидного перерізу діаметром D , центри яких розташовані на однаковій відстані T один від одного.

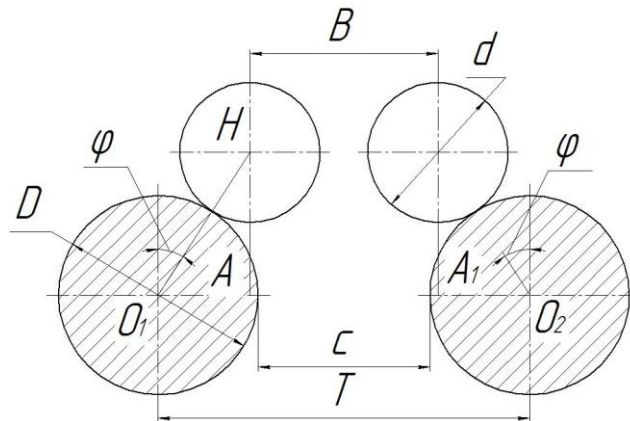


Рис. 2.8. Схема западання часток в робочі канали решітки

Очевидно, що для попадання часток матеріалу в канал шириною c необхідно щоб їх центр ваги знаходився в активній робочій зоні B , крайні точки якої визначаються кутом φ нахилу прямих, що з'єднують центри перерізу сусідніх прутків O_1, O_2 та центри ваги частинок матеріалу H і де величина кута φ відповідає куту тертя частки по робочій поверхні перетинок решета.

Для визначення раціонального діаметру D поперечного перерізу поздовжніх перетинок пруткового решета розглянемо умови їх взаємодії з частками оброблюваного матеріалу.

Ймовірність попадання часток в активну робочу зону B , яка характеризує орієнтуючу здатність робочої поверхні решета (рис. 2.8), визначиться відношенням

$$P = \frac{B}{T}, \quad (2.55)$$

де B – ширина активної зони сепаруючих каналів, яка становить

$$B = T - 2 \cdot O_1 A. \quad (2.56)$$

Як видно зі схеми, проекція відстані між центрами прутка та частки на горизонталь становить

$$O_1 H = \frac{D + d}{2}, \quad (2.57)$$

де d – діаметр частки оброблюваного матеріалу.
З урахуванням (2.57) вираз (2.56) матиме вигляд

$$B = T - (D + d) \cdot \sin \varphi, \quad (2.58)$$

де φ – кут тертя частки по поверхні поздовжньої перетинки решета, а відстань між центрами поздовжніх прутків становить

$$T = D + c, \quad (2.59)$$

де c – робоча ширина каналу.
Тоді ймовірність попадання часток в активну зону запишеться як

$$P = \frac{D + c - (D + d) \cdot \sin \varphi}{D + c}, \quad (2.60)$$

або

$$P = 1 - \frac{D + d}{D + c} \cdot \sin \varphi = 1 - \lambda \cdot \sin \varphi, \quad (2.61)$$

де $\frac{D + d}{D + c} = \lambda$ – коефіцієнт, який в залежності від співвідношення $\frac{d}{c}$, тобто від призначення решета може збільшуватися, чи зменшуватися зі збільшенням D .

Для підсівних та сортувальних решіт, у яких $d > c = d_c - (1 \div 2)\sigma$, (d_c – середній розмір (товщини) часток основного матеріалу, мм; σ – середньоквадратичне відхилення розмірів зерна, мм,) зі збільшенням D коефіцієнт λ зменшується, а вірогідність P – зростає. В колосових решетах,

в яких $d < c = d_c + 3\sigma$, зі збільшенням D – коефіцієнт λ збільшується, а вірогідність P – зменшується.

Графічне зображення рівняння (2.61) для означених умов представлено на рис. 2.9, відповідно для колосового решета (крива 2), сортувального (крива 3) і підсівного (крива 4).

Аналіз отриманих залежностей свідчить, що вплив діаметра калібруючих перетинок пруткового решета D на вірогідність попадання матеріалу P в активну зону B його робочих отворів (каналів) для колосових і підсівних та сортувальних решіт має різний характер. Збільшення P у перших досягається при зменшенні D , а у останніх – при збільшенні.

Таким чином, з одного боку збільшення діаметра перетинок D , в залежності від розмірів часток оброблюваного матеріалу, насамперед їх довжини, повинне покращувати орієнтуючу здатність робочої поверхні пруткового решета, що позитивно впливає на ефективність сепарування зерна. В той же час збільшення діаметра перетинок D зменшує "живий" переріз робочої поверхні пруткового решета, що негативно впливає на ефективність його роботи. Позитивний вплив збільшення діаметру перетинок D для підсівних та

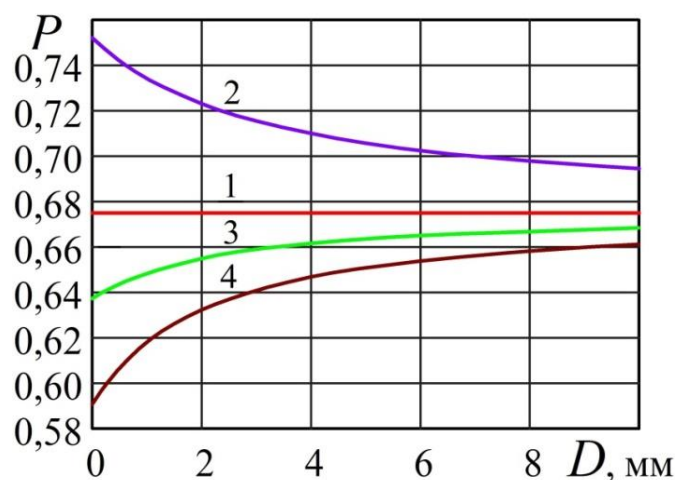


Рис. 2.9. Вплив діаметра калібруючих перетинок решета на ймовірність попадання прохідних часток в активну зону решета для умов:

$$1 - \frac{d}{c} = 1; \quad 2 - \frac{d}{c} = \frac{d}{d_c + 3 \cdot \sigma} < 1 \quad - \text{ колосове решето}; \quad 3 - \frac{d}{c} = \frac{d}{d_c - 2 \cdot \sigma} > 1 \quad - \text{ підсівне решето}; \quad 4 - \frac{d}{c} = \frac{d}{d_c - \sigma} > 1 \quad - \text{ сортувальне решето}$$

сортувальних решіт залежить від розмірів зерна. Раціональне значення для насіння різних культур має відповідну величину, яка забезпечує найвищу сепаруючу здатність. Подальше збільшення D суттєво не впливає на ефективність роботи цих решіт.

2.5. Визначення кроку між ковшами транспортера–сепаратора

Після вивантаження із ковша частки зернового вороху можуть рухатися:

- із уповільненням та нагромадженням перед корпусом ковша, з якого були висипані;
- рівномірно, з постійною швидкістю, розташовуючись при цьому між суміжними ковшами;
- з прискоренням, наздоганяючи попередній ківш, де при цьому накопичуватися на його задній стінці.

В першому випадку прохідні частки вороху, які зорієнтувалися відносно каналів решета, або положення яких на поверхнях перетинок дозволяє пройти крізь канали, будуть просіватися. Інші прохідні частки, положення чи розміри яких не дозволяє їм пройти крізь канали, будуть переміщуватися ковшем, з якого були висипані і переорієнтують своє положення так, що їх поздовжня вісь буде перпендикулярною до вісі каналів. Тоді просіятися зможуть тільки ті прохідні частки, які зможуть зайняти нестійке положення на перетинках решета. Даний випадок можливий при малому куті нахилу решета.

Другий випадок теоретично можливий при певних критичних значеннях кута нахилу решета і абсолютно ідентичних властивостях часток, що є практично малоімовірним

Розглянемо третій – найбільш ймовірний випадок руху зернового вороху по поверхні, де відбувається сепарація (рис. 2.10), прийнявши наступні припущення:

- ковші транспортера рухаються з постійною швидкістю v_0

$$v_0 = \frac{Q}{b \cdot h \cdot \gamma}, \quad (2.62)$$

де Q – продуктивність транспортера;
 h – висота скребка;

- b – ширина скребка;
- γ – об'ємна маса матеріалу;
- частка являє собою еліпсоїд з довжиною l товщиною та шириною a ;
- дією сусідніх та верхніх часток на частку, що розглядається, нехтуємо;
- частки зернового вороху розміщуються рівномірно між ковшами та по ширині решета з товщиною шару h .

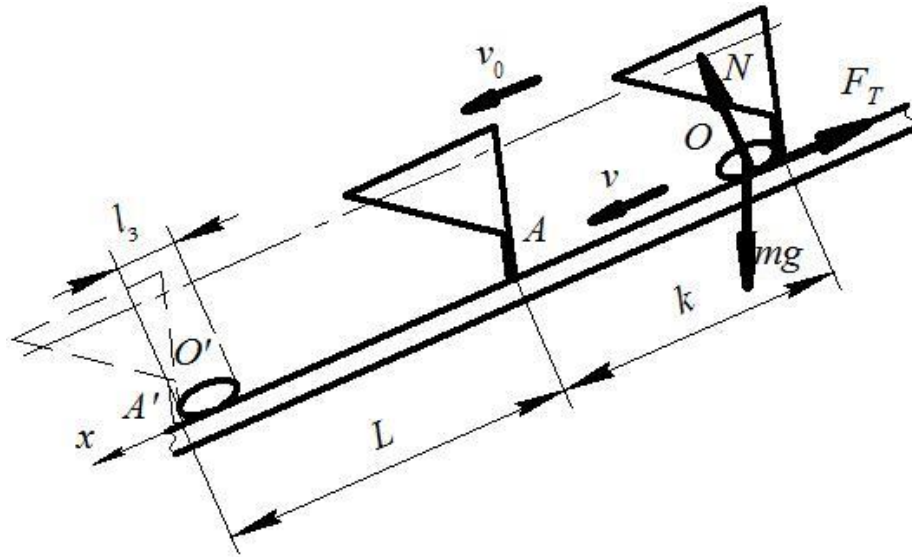


Рис. 2.10. Схема сил при русі зерна по нерухомому похилому решету

Час, за який передній ківш дійде до точки A можна визначити відношенням

$$t = \frac{L}{v_0}, \quad (2.63)$$

де L – шлях, що проходить попередній ківш з моменту відриву зернової частки від ковша, з якого вона вивантажується, м;

v_0 – швидкість транспортеру, м/с.

За цей час частка наздоганяє по передній ківш

$$t = \frac{S}{v}. \quad (2.64)$$

Шлях, що вона пройшла при цьому становитиме

$$S = L + k - l_3, \quad (2.65)$$

де k – крок ковшів транспортера, м.

Прирівнявши праву частину виразу (2.64) з правою частиною (2.65) та з врахуванням (2.62) отримаємо

$$\frac{L}{v_0} = \frac{S}{v} = \frac{L + k - l_3}{v}. \quad (2.66)$$

Швидкість, з якою частка наздоганяє попередній ківш становить

$$v = v_0 + g \cdot t (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (2.67)$$

а шлях, що пройшла частка

$$S = v_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2} (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (2.68)$$

або з врахуванням (2.65)

$$L + k - l_3 = v_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2} (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (2.69)$$

Виразимо з рівняння (2.67) час t , підставимо його у формулу (2.69) і знайдемо швидкість руху частки

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g (L + k - l_3) (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)}. \quad (2.70)$$

Підставимо отриманий вираз в (2.66) і виразимо крок ковшів

$$k = \frac{L^2 \cdot g \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) - v_0^2 (L - l_3) + \sqrt{v_0^4 L^2 + L^2 \cdot g^2 (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)^2}}{v_0^2}. \quad (2.71)$$

З іншого боку, прийmemo що об'єм ковша рівний об'єму матеріалу, який рівномірно за площею та товщиною розташовується між ковшами, тобто

$$V_{mk} = k \cdot b \cdot h, \quad (2.72)$$

де h – висота шару часток між ковшами, м

$$h = a \cdot n, \quad (2.73)$$

де a – ширина частки, м;

n – кількість шарів розташування часток по висоті між ковшами.

Таким чином

$$V \cdot \psi = k \cdot b \cdot a \cdot n. \quad (2.74)$$

Тоді (2.62) запишемо наступним чином

$$v_0 = \frac{Q}{b \cdot a \cdot n \cdot \gamma}. \quad (2.75)$$

З врахуванням отриманого рівняння, формула (2.71) прийме наступний вигляд

$$k = \frac{L^2 \cdot g \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) - \left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^2 (L - l_3)}{\left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^2} + \frac{\sqrt{\left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^4 L^2 + L^2 \cdot g^2 (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)^2}}{\left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^2}. \quad (2.76)$$

На основі проведеного теоретичного аналізу побудуємо залежності кроку ковшів від кута нахилу та ширини решета за наступних параметрів: продуктивність транспортеру – 25 т/год; ширина частки – 0,003 м; довжина частки – 0,008 м; об'ємна вага вороху – 780 кг/м³; довжина шляху, що проходить ківш до моменту, коли його наздоженуть зернові частки – 0,2 м; коефіцієнт тертя частки по похилій поверхні – 0,35, ширина решета – 0,4 м.

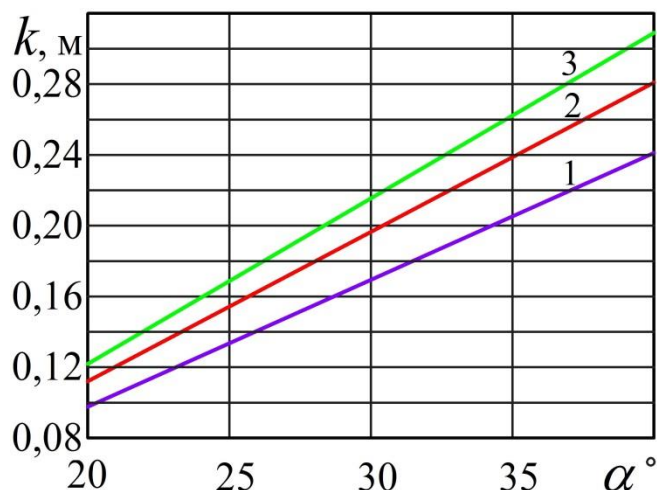


Рис. 2.11. Залежність кроку ковшів транспортера від кута нахилу решета

1, 2, 3 – питоме завантаження решета 1,3 6,9 та 12,5 кг/(м×с) відповідно

Аналіз графіку вказує, що при куті нахилу решета до 18° частка не зможе наздогнати ківш, який рухається попереду, внаслідок дії на неї сили тертя, і буде рухатися або між ковшами або примусово тим же ковшем, що транспортував її.

2.6. Висновки по розділу

На основі проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

- визначення показників технологічної ефективності запропонованого робочого органу вимагає проведення експериментальних досліджень для встановлення величини коефіцієнту сепарації;
- наявність верхніх шарів прискорює рух часток нижнього шару порівняно з одношаровим, при цьому чим більше шарів n , тим більша швидкість v пропорційно $(n \sin \alpha - (nf_1 - (n-1)f_2) \cos \alpha_1)$;
- ефективність роботи пруткових решіт залежить від діаметра калібруючих перетинок, який для колосових решіт повинен бути найменшим;
- ефективність роботи підсівних і сортувальних решіт зі збільшенням діаметру калібруючих перетинок в певних межах спочатку збільшується, а потім зменшується;

- раціональний діаметр поздовжніх перетинок підсівних і сортувальних пруткових решіт для сепарування зерна озимої пшениці, згідно досліджень, не повинен перевищувати 4–5 мм;
- на довжину шляху при русі зернової частки по циліндричній поверхні поздовжньої перетинки впливають кут нахилу, діаметр поздовжньої перетинки та швидкість самої частки, при чому зі збільшенням будь-якого з цих факторів збільшується і час сходу частки з прутка та необхідна довжина решета.

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Програмою експериментальних досліджень передбачається наступне:

1. Визначення фізико–механічних властивостей зернового вороху, що використовується у досліджах:
 - розмірної характеристики зернового вороху;
 - вологості;
 - об'ємної маси;
 - засміченості.
2. Перевірка адекватності теоретичних моделей.
3. Дослідження впливу параметрів та режимів роботи сепаруючої частини робочого органу на його технологічну ефективність.
4. Вивчення закономірностей просівання зерна крізь канали решета по його довжині в залежності від: величини питомого завантаження решета, вологості та засміченості оброблюваного матеріалу.
5. Визначення енергоємності процесу сепарації.

3.2. Методика визначення фізико–механічних властивостей зерна

3.2.1. Методика визначення фракційного складу оброблюваного матеріалу

Дослідження проводились на зерновому воросі озимої пшениці (Одеська 267) урожаїв 2006–2009 років, отриманому після збирання зернозбиральними комбайнами СК–5 "Нива", "Дон–1500" та "Лан".

Для визначення фракційного складу зернового вороху, вибірку масою 0,2 кг оброблювали на плоскому ручному класифікаторі з продовгуватими отворами (рис. 3.9) протягом 5 хвилин. Розміри решіт:

- першого – 2,0 x 20 мм;
- другого – 2,5 x 20 мм;

третього – 3,0 x 20 мм;
четвертого – 3,5 x 20 мм;
п'ятого – 4,0 x 20 мм.

Залишки зерна на решетах зважували. Результати заносили до таблиці 4.1.

Фракційний склад зернового вороху визначали за формулою [96]

$$\Phi = \frac{\sum P}{m} \cdot 100\% , \quad (3.1)$$

де $\sum P$ – загальна маса, що виділилась, кг;

m – маса оброблюваного матеріалу, кг.

Засміченість зернового вороху крупними домішками регулювали шляхом штучного збільшення чи зменшення їх маси у вихідному матеріалі.

3.2.2. Методика визначення об'ємної маси оброблюваного матеріалу

Вибірки вороху засипали у ємність об'ємом 1 дм³, масу якого визначали за допомогою електрорагів ВЛК–500. Об'ємну масу вибірки оброблюваного матеріалу визначали обчисленням відношення одержаної маси до об'єму ємності

$$\gamma = \frac{m}{W} , \quad (3.2)$$

де W – об'єм ємності, м³.

Об'ємну масу оброблюваного матеріалу визначали обчисленням середнього арифметичного значення відношень одержаних об'ємних мас вибірок

$$\gamma_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{n} , \quad (3.3)$$

де n – кількість вибірок.

3.2.3. Методика визначення вологості вороху

Вимірювання вологості зернового вороху здійснювалось методом прямого висушування згідно ГОСТ 12041–82.

Для отримання даних щодо кількісно–якісних показників роботи досліджуваного транспортера–сепаратора на матеріалі з різною вологістю, природний ворох штучно зволожували, і після витримки 48 годин, перевіряли вологість. Результати заносили до таблиці.

3.3 Методика визначення закономірностей просівання зерна крізь канали решета

3.3.1. Опис конструкції і роботи експериментальної установки

Для проведення дослідів розроблена та виготовлена експериментальна установка, схема та загальний вигляд якої приведені на рис. 3.1 та 3.2.

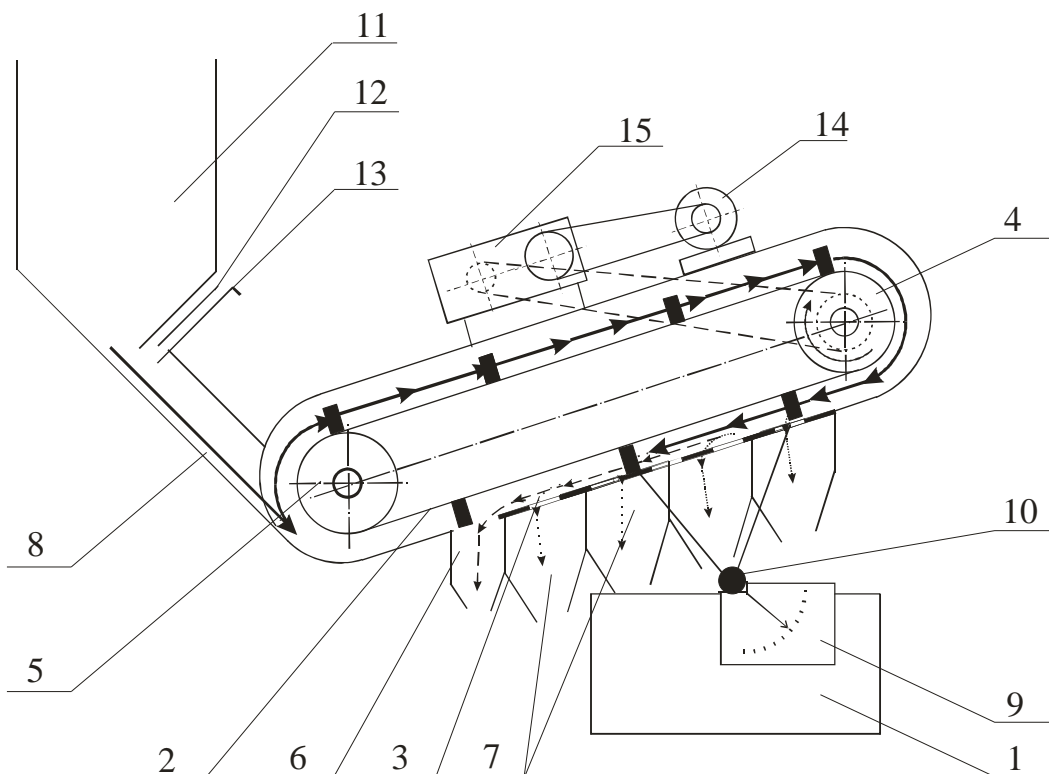


Рис. 3.1. Схема експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 3.1) складається із рами 1, до якої на шарнірі 11 закріплено корпус транспортера–сепаратора 2 з механізмом приводу. До боковин корпусу з внутрішньої сторони під транспортером–сепаратором 2 закріплено решето з круглими поздовжніми перетинками 3 (рис. 3.5 або 3.8) та на підшипникових сферичних опорах верхній (привідний барабан) 4 та нижній барабан 5. За барабаном 5 встановлено

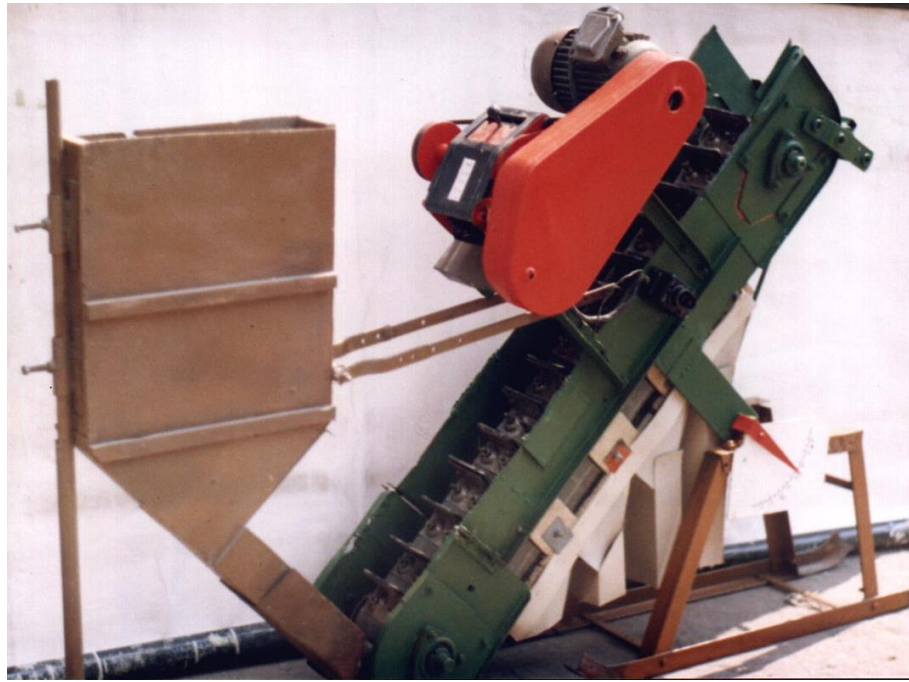


Рис. 3.2. Загальний вигляд експериментальної установки

бункер 11, в нижній частині якого знаходяться регулююча заслінка 12 та перекриваюча заслінка 13. Для визначення просівання прохідної фракції зернового матеріалу по довжині решета 3 під ним встановлено приймальник проходової фракції 7.

Ковшовий транспортер 2 приводиться в дію електричним двигуном 14, потужністю 1,5 кВт, за допомогою двох клинопасових передач та шестиступеневої зубчатої коробки зміни передач (КЗП) 15, яка забезпечує ступеневу зміну кількості обертів привідного барабану від 78 до 525 хв^{-1} , тобто швидкість руху ковшового транспортеру 2 змінюється від 0,5 до 2,83 м/с. Контроль та вимірювання швидкості руху ковшового транспортера 2 здійснювались механічним тахометром.

Зміна кута нахилу корпусу транспортера 2 відносно горизонту здійснювалась шляхом його повертання відносно шарніру 10 з фіксацією в необхідному положенні. Контроль та вимірювання кута нахилу транспортеру відносно горизонту здійснювались кутоміром 9.

Надходження оброблюваного матеріалу із бункера 11 до ковшового транспортеру 2 здійснюється самопливом по зернопроводу 8.

Подача оброблюваного матеріалу на решето регулюється зміною кількості ковшів транспортера.

При надходженні зернового матеріалу до нижньої частини корпусу транспортера 2 ковшовий транспортер захвачує його і транспортує до

верхньої частини корпусу, де проходить розвантаження ковшів і оброблюваний матеріал надходить до верхньої частини решета 3, на поверхні якого частки оброблюваного матеріалу змінюють свою орієнтацію відносно його каналів і ті, в яких товщина чи (та) ширина менші ніж робоча ширина каналу, проходять крізь поверхню сепарації та надходять до приймальників проходової фракції 7. Решта частини зернового вороху, яка не пройшла крізь решето 3 йде сходом та надходить до приймальника сходової фракції 6.

В якості поверхні сепарації використовували решето з круглими поздовжніми перетинками круглого профілю діаметрами 1, 2, 3, 4, 5 та 6 мм, загальний вид і схеми яких приведено на рис. 3.3–3.9.

Решето з круглими поздовжніми перетинками (діаметр поперечного перетину яких становить 3, 4, 5 та 6 мм) складається з кількох секцій, загальний вид однієї з них та її схему приведено, відповідно, на рис. 3.3 та 3.4. Секція цього решета (рис. 3.4) складається із стержнів опуклого перерізу 1, набраних на поперечну вісь 2, з проміжними калібруючими шайбами 3. Направляючі стержні 1 (рис. 3.4) виготовлені однаковими й мають опуклий переріз з однаковою товщиною по всій довжині, причому на одному (передньому) кінці виготовлені вушка для шарнірного кріплення до поперечної вісі. Для усунення утворення сходинок в місці стикання решіт, нижню поверхню прямих кінців попереднього решета оброблювали таким чином, щоб їхня верхня поверхня знаходилась на одному рівні із робочою поверхнею наступного решета.

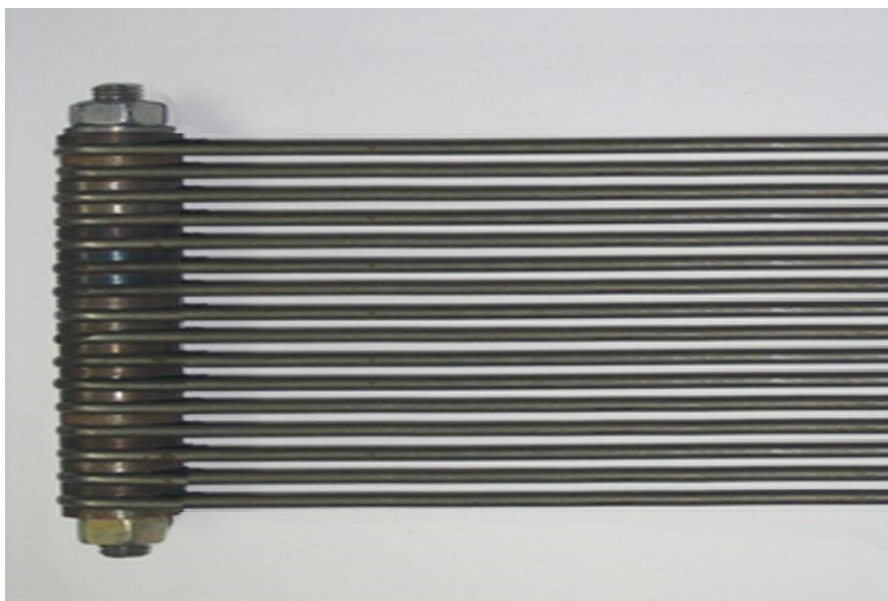


Рис. 3.3. Секція решета

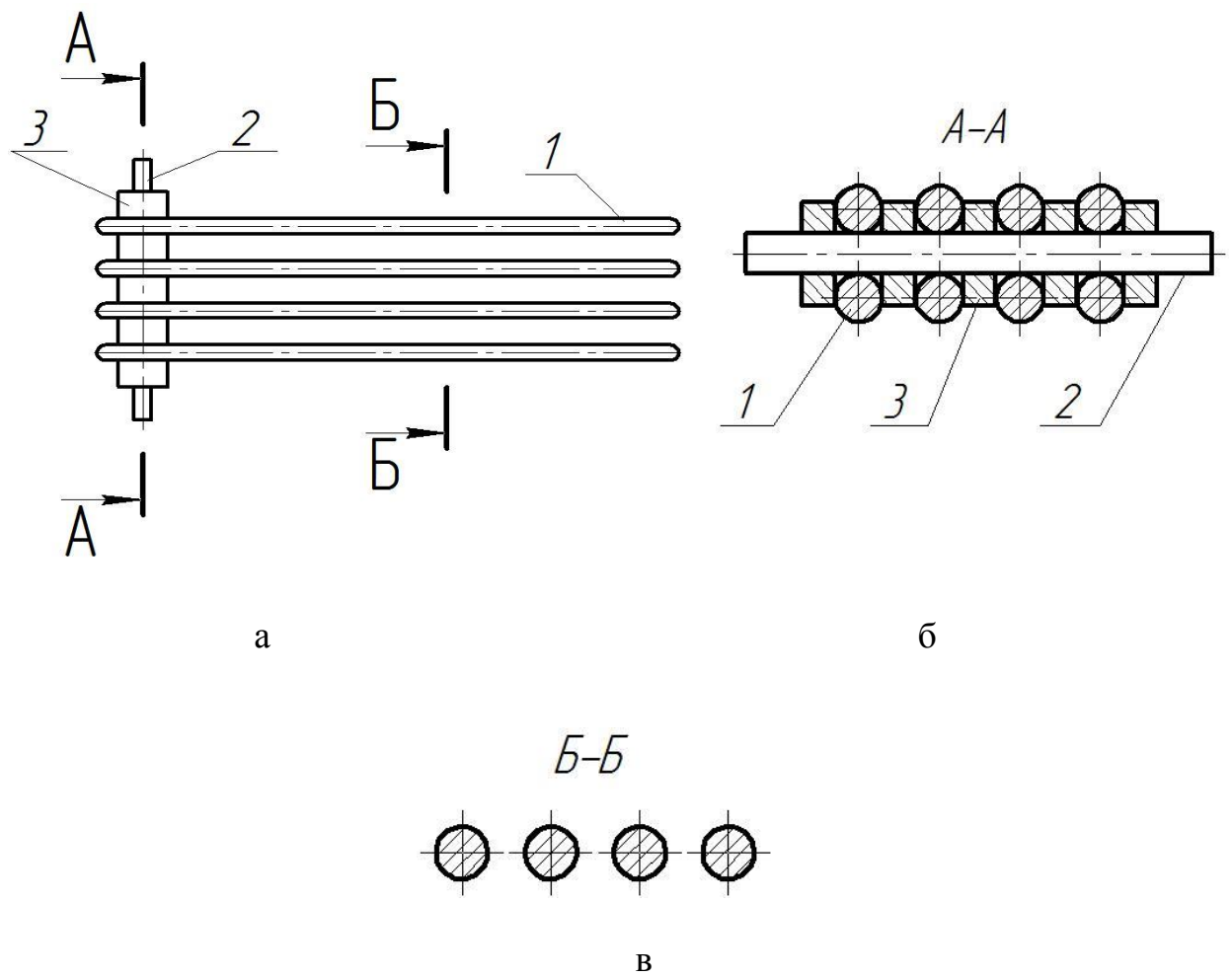


Рис. 3.4. Схема секції решета
 а – загальний вид зверху; б – переріз А-А; в – переріз Б-Б



Рис. 3.5. Решето

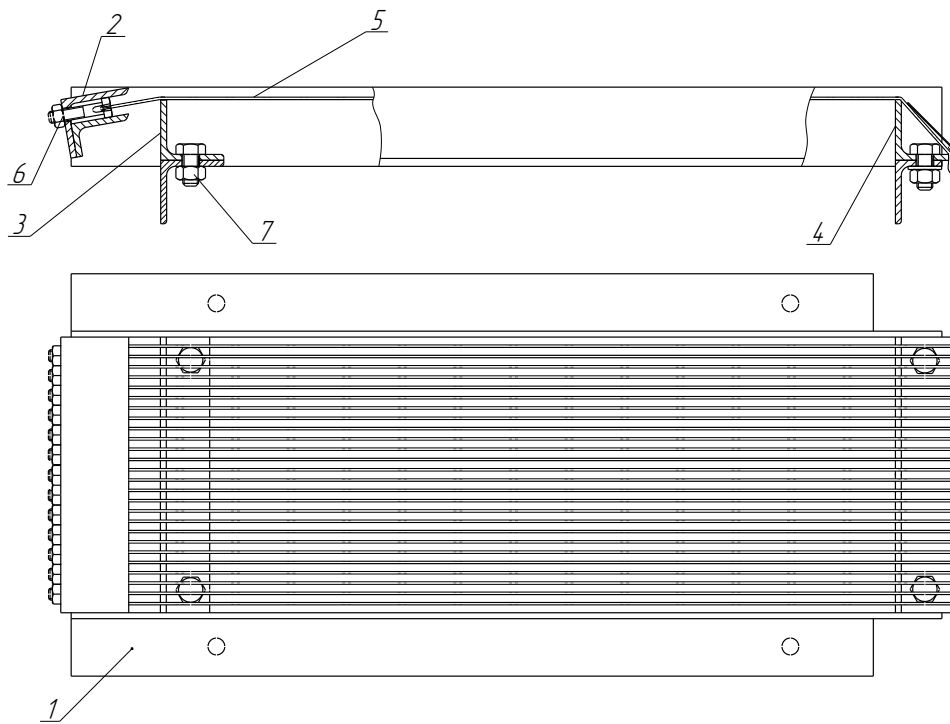


Рис. 3.6. Схема решета

Решето, діаметр перетинок якого становить 1 та 2 мм (рис. 3.6), складається з рамки 1, в середині якої з одного краю встановлено кронштейн 2. До поперечних елементів рамки 1 кріпляться регулюючі калібри 3 та 4 за допомогою різьбового з'єднання 7. На верхній поверхні регулюючих калібрів виконанні прорізи, які забезпечують необхідну ширину робочих каналів решета з врахуванням діаметру перетинки 5. Перетинка 5 складається з двох гілок, один край яких фіксується в отворах регулюючого калібру 4, а інший – проходить крізь отвір в натяжнику 6, який забезпечує її необхідний натяг. Для зменшення впливу на рух зернового вороху по робочій поверхні решета обидва краї прикривалися пластинками.

3.3.2. Прилади та обладнання

При проведенні експериментів використовувалось наступне обладнання.

Встановлення заданого кута нахилу транспортеру проводилось за допомогою кутоміра та рівня УС–2–11 ГОСТ 9416–83.

Тарування подачі зернового вороху з бункеру на поверхню решета здійснювалось із використанням секундоміру. Частота обертання приводного барабану контролювалось тахометром ТЧ 10–Р ГОСТ 21339–75, з похибкою вимірювання до 1%.

Решітний класифікатор (рис. 3.7) використовувався для визначення фракційного складу зернового вороху та його засміченості.

Визначення вологості досліджуваного матеріалу проводилось методом прямого висушування із застосуванням духової шафи, бюксів та електронних ваг ВЛК–500–3 (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Обладнання для визначення фізико–механічних властивостей зернового вороху

1 – ручний решітний класифікатор; 2 – сушильна шафа; 3 – бюкси; 4 – електронні ваги ВЛК–500

Торгівельні ваги РН–10Ц13М – для визначення ваги отриманих фракцій вороху.

Визначення потужності, необхідної для приводу в дію транспортера сепаратора, проводилось контрольно–вимірювальним приладом К–50, загальний вигляд та схема ввімкнення якого приведені на рис. 3.8 та 3.9.



Рис. 3.8. Загальний вигляд контрольно-вимірювального приладу К-50

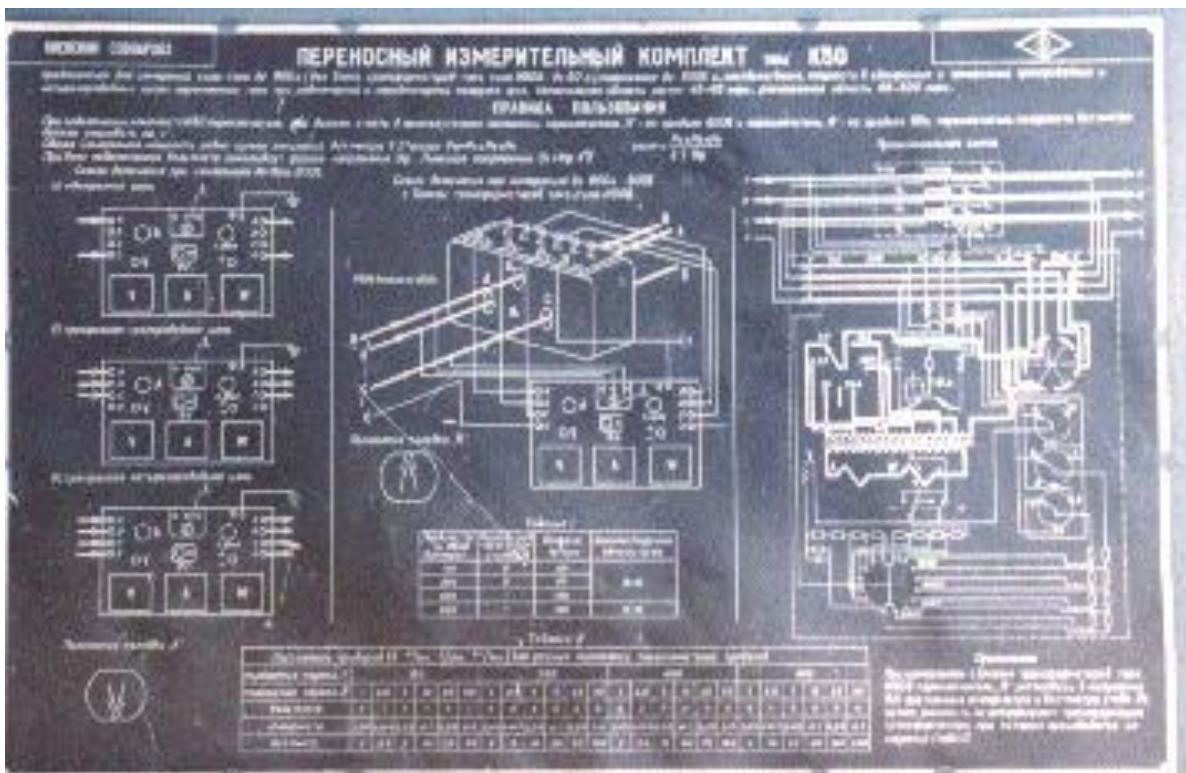


Рис. 3.9. Схема ввімкнення контрольно-вимірювального приладу К-50

3.3.3. Методика та умови проведення дослідів

Основні дослідження проводились на двох решетах. Довжина першого решета з діаметром поздовжніх перетинок 1 та 2 мм становила 1100 мм. Довжина другого решета з діаметром перетинок 3, 4, 5 та 6 мм, яке складалась із 3-х рівних за довжиною ділянок, становила 1200 мм. Ширина решіт обмежена боковими стінками корпусу транспортера і становить 100 мм.

В якості оброблюваного матеріалу використовували природній комбайновий ворох озимої пшениці вологістю 16,3% з вмістом крупних домішок 3,61%. Крупні домішки складались із решток соломи, рослинних решток бур'янів і їх насіння та інших природних домішок зернового вороху, отриманого із бункеру зернозбирального комбайну. Попереднє вилучення легких та дрібних домішок не проводилось.

У всіх залежних дослідах однієї серії використовували рівноцінний початковий матеріал однієї партії, який спочатку перемішували, а потім методом діагонального ділення по діагоналі розподіляли на всі досліди даної серії.

Подачу оброблюваного матеріалу до транспортеру здійснювали після його включення при сталому характері руху останнього.

Тривалість досліду визначали наступним методом. Одночасно з відкриттям заслінки 13 (рис. 3.1) вмикали годинниковий секундомір, який вимикали одразу після спорожнення бункеру 11.

Кожну отриману в приймальниках 6 і 7 фракцію зважували окремо, а отримані дані заносили до відповідної таблиці.

3.3.4. Методика визначення залежності впливу діаметру перетинок решета на просівання зерна

Дослідження впливу діаметру перетинок решета на просівання зерна крізь його канали проводили змінюючи діаметри поздовжніх перетинок. Для цього використовували решето (рис. 3.6), на яке встановлювали перетинки діаметром 1 та 2 мм та секції решета (рис. 3.3–3.4), в яких використовували перетинки діаметром 3, 4, 5 та 6 мм. Для цього до поперечних осей 2 (рис. 3.4) кріпили направляючі стержні 1 з різним розміром поперечного перерізу. Необхідну ширину каналів забезпечували калібруючими шайбами 3, товщина яких рівна робочій ширині перших. Зібрані секції решета закріплювали в нижній частині корпусу транспортера 2 (рис. 3.1).

3.3.5. Методика визначення швидкості руху часток нижнього шару

В досліджах по визначенню швидкості руху часток нижнього шару під дією верхніх шарів використовували зйомку відеокамерою. Для чого в кінці ковшового транспортера встановлювалось решето (рис. 3.5), на бічних поверхнях якого закріплено дві бічні засклені рамки. В нижній частині однієї з них кріпилась лінійка з ціною поділок 1 см довжиною 1100 мм, початок якої співпадав з початком решета. нижній край скла рамок знаходився на рівні робочої поверхні решета. Частину зернових часток було зафарбовано в кілька кольорів. Обробку результатів експериментів проводили на ПЕОМ з використанням програм для обробки цифрового відео Aurora Media Workshop.

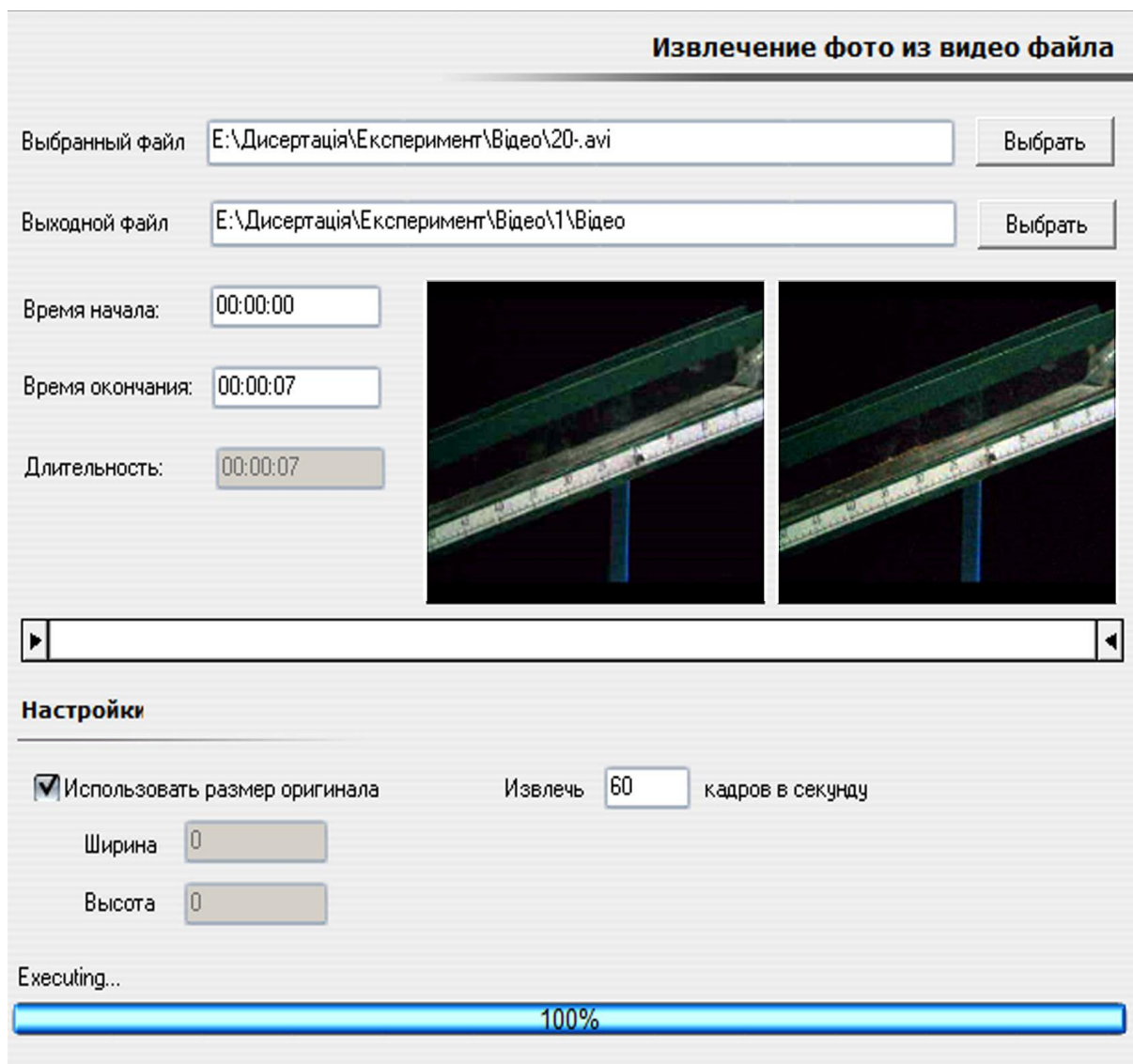


Рис. 3.10. Обробка відеоматеріалу з використанням програми Aurora Media Workshop

3.3.6. Визначення робочої довжини решета

Для візуального спостереження при визначенні робочої довжини решета використовувалися вікна в бокових стінках транспортера. До однієї боковини під вікном кріпили лінійку з ціною поділок 1 см довжиною 1100 мм, початок якої співпадав з початком решета. В приймальнику прохідової фракції встановили проміжні перетинки через 5 см.

3.3.7. Визначення показників технологічної ефективності роботи сепаруючого органу

Дослідження впливу параметрів решета та режимів роботи ковшового транспортера на ефективність виділення крупних домішок із зернового вороху на решеті проводили наступним чином.

В нижній частині корпусу транспортера 2 (рис. 3.2) встановлювали почергово решето з діаметром поздовжніх перетинок від 1 мм до 5 мм. Встановлення заданої швидкості руху ковшового транспортера 2 здійснювали шляхом зміни передаточного відношення КЗП 15. Нахил робочого органу відносно горизонту на певний кут забезпечували підняттям нижньої частини корпусу 2 на певну висоту.

Вміст крупних домішок змінювали шляхом додавання їх до зернової суміші або вилучення з неї.

Зміну вологості оброблюваного матеріалу проводили шляхом замочування його часток та витримкою на протязі трьох діб з періодичним перемішуванням маси.

Величину подачі зернового вороху із бункеру 11 змінювали за допомогою положення дозуючої заслінки останнього.

Після проведення кількох повторностей при встановлених значеннях, в залежності від кількості значень та впливу, параметри змінювали в наступній послідовності:

- швидкість руху транспортеру;
- кут нахилу робочого органу відносно горизонту;
- діаметр поздовжніх перетинок решета.

Отримані фракції, після проведення кожної повторності досліду, зважували, потім визначали за допомогою решітного класифікатора з решетами з продовгуватими отворами вміст зерна в сході (в крупних домішках).

3.4. Планування факторного експерименту

Аналіз сепарації зерна на прутковому решеті транспортера–сепаратора показує, що цей процес є складним. Його характер залежить одночасно від багатьох факторів, як постійних, так і випадково розподілених за часом. Тому для отримання математичної моделі процесу було використано метод планування багатофакторних експериментів.

3.4.1. Постановка задачі

Метод планування багатофакторних експериментів використовували при визначенні раціональних значень діаметра поздовжніх перетинок решета, швидкості руху транспортеру, кута нахилу транспортера, величини подачі матеріалу, впливу фракційного складу оброблюваного матеріалу та його вологості на ефективність роботи сепаруючої частини транспортера–сепаратора. При цьому задачею цих дослідів було також визначення величини і характеру (напрямку) впливу означених факторів на параметр оптимізації. Критерієм обрано чіткість сепарації – вміст повноцінного зерна у виділених крупних домішках.

3.4.2. Вибір факторів

Вибір факторів, які підлягають дослідженню при побудові математичної моделі процесу, базувався на відомостях, отриманих при попередніх однофакторних дослідів. Досліджуваний технологічний процес сепарації на решеті транспортера–сепаратора, який зображено на рис. 3.1, можна схематично представити у вигляді «чорної скрині» (рис. 3.11). Фактори, які впливають на процес, зображено у вигляді стрілок, що спрямовані в бік прямокутника, позначені літерами "X" із відповідними індексами.

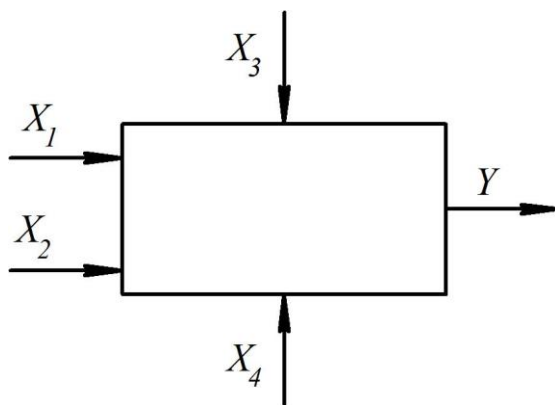


Рис. 3.11. Схема «чорної скрині» експерименту

Дослідження за приведеною схемою ґрунтуються на принципі: оптимальне управління можливе за відсутності повної інформації.

В схемі досліджуваного технологічного процесу були прийняті наступні закодовані позначення:

X_1 – кут нахилу транспортера (α); X_2 – діаметр перетинок пруткового решета (d); X_3 – швидкість руху транспортера (v); X_4 – питома продуктивність (q_B); Y – чіткість сепарації.

3.4.3. Розробка плану, його реалізація та побудова моделі

При розробці плану застосовуємо закодовані значення факторів. При цьому здійснюється перенесення початку координат в центрі (основний рівень) експерименту та вибір масштабу в одиницях варіювання факторів. Кодовані значення факторів пов'язані з натуральними (x_i) наступним відношенням:

$$x_i = \frac{X_{ij} - X_{ij0}}{\Delta X_i}, \quad (3.4)$$

де X_{ij} – натуральне значення i фактора;

X_{ij0} – натуральне значення i фактора на основному рівні;

ΔX_i – натуральне значення інтервалу варіювання.

Матриця планування серій експериментів приведена в розділі 4.

Рівняння регресії має вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{1,2}x_1x_2 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + \dots + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{kk}x_k^2. \quad (3.5)$$

Значення факторів, приведені в таблиці 4.3, кодували (x_1, x_2, x_3, x_4) та згідно з методиками [22, 97, 116, 146] знаходили коефіцієнти регресії b_i .

Значущість коефіцієнтів регресії перевірялась за допомогою рівності нулю коефіцієнтів при квадратичних членах регресії (нуль-гіпотеза). Для цього були проведені додаткові досліди в центрі експерименту, визначено середнє значення \bar{Y}_0 критерію оптимізації в центрі експерименту і розрахована різниця $b_0 - \bar{Y}_0$, яка являється характеристикою кривизни поверхні відгуку. Нуль гіпотеза приймається, якщо різниця $b_0 - \bar{Y}_0$ не перевищує похибки досліду. Значимість цієї різниці перевіряли за критерієм Стюдента (t -критерієм)

$$t_{розр} = \frac{(b_0 - \bar{Y}_0)\sqrt{N}}{\sqrt{S_y^2}}. \quad (3.6)$$

Потім розрахункове значення $t_{розр}$ порівнювали з табличним значенням, яке обирали за таблицями [22, 97, 116, 146] в залежності від рівня значимості $\alpha=0,05$, та ступеня вільності $f_t=N$. Якщо виконувалась нерівність $|b_i| < |\Delta b_i|$, відповідний фактор аналізували щодо вибору іншого інтервалу варіювання, якщо це можливо. При цьому всі необхідні досліди повторювали і, якщо після аналізу відповідний коефіцієнт знову відповідав попередній умові, тоді робили висновок про незначимість впливу фактора x_i на параметр оптимізації Y .

Відтворюваність експериментів визначали за допомогою критерію Кохрена (G -критерію), при цьому необхідною умовою є $G^P < G^T$. У випадку $G^P < G^T$ робиться висновок про не відтворюваність дослідів, а отже виникає необхідність перевірити ефективність регулювань досліджуваного об'єкту, та засоби вимірювань.

Адекватність статистичної математичної моделі перевіряли за допомогою критерію Фішера (F -критерію).

Метою інтерпретації одержаної статистичної моделі є аналіз впливу факторів на критерій оптимізації. При цьому ступінь впливовості фактору оцінювали за величиною коефіцієнту b_i з врахуванням знаку, що перед ним знаходиться, так знак плюс вказує на підвищення критерію оптимізації при збільшенні відповідного фактору і навпаки мінус – зменшення Y при збільшенні x_i .

3.5. Методика визначення потужності на привід

Визначення потужності, необхідної на привід в дію транспортера-сепаратора N проводили в залежності від швидкості руху транспортера, його кута нахилу, питомого завантаження решета.

Вирішення цієї задачі здійснювали на експериментальній установці, що описана вище. Потужність електродвигуна, яку він витрачає на привід приводного валу ковшового транспортеру через клинопасові та зубчаті передачі, визначали за допомогою приладу К-50 (рис. 3.8).

Обробка всіх експериментальних даних здійснювалась за загальноприйнятою методикою [17, 22, 97, 115–116, 146].

РОЗДІЛ 4
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ
ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТЕРА–СЕПАРАТОРА НА ПОКАЗНИКИ
ЙОГО РОБОТИ

4.1. Результати визначення фізико-механічних властивостей зерна

4.1.1. Фракційний склад зернового вороху

В таблиці 4.1 представлено результати визначення фракційного складу зернової суміші за ознакою товщини.

Таблиця 4.1

Усереднений фракційний склад оброблюваного вороху

№ вибірки	вибірки	Маса зерна, кг					Вміст крупних домішок, %
		що залишилось на решетах з отворами, мм					
		1,5×20	2,0×20	2,5×20	3,0×20	4,0×20	
1	0,2	0,01716	0,025	0,116	0,038	0,00384	1,92
2		0,00874	0,021	0,117	0,041	0,00826	4,15
3		0,01572	0,024	0,112	0,036	0,01228	6,14

Зерновий ворох з відносним вмістом крупних домішок 2% є природнім. Матеріал, з вмістом крупних домішок 4% та 6% отримано штучно, шляхом додавання часток відповідних розмірів. Об'ємна маса зернового вороху, що використовувався у дослідах, становила 768 кг/м³.

4.1.2. Визначення вологості зерна

В таблиці 4.2 наведені результати визначення вологості вороху.

Таблиця 4.2

Вологість зернового вороху

№ вибірки	Контроль висушуванням			
	маса навіски зерна, г		втрата вологи, г	вологість, %
	вологого	сухого		
1	50,0	44,97	5,03	10,06
2	50,0	42,04	7,96	15,92
3	50,0	41,07	8,93	17,86

Аналізуючи дані таблиці необхідно відмітити, що вологість матеріалу, який використовувався в дослідженнях відповідає реальним значенням вологості зернового вороху, що надходить на попереднє очищення.

4.2. Визначення впливу діаметру поздовжніх перетинок на просівання зерна

Для визначення впливу діаметра поздовжніх перетинок на просівання зерна були проведені експериментальні дослідження роботи решета при очищенні зернового вороху озимої пшениці від крупних та дрібних домішок відповідно на колосовому, сортувальному, підсівному решетах з різними діаметрами поздовжніх перетинок в межах від 1 до 6 мм.

При проведенні експериментальних досліджень по визначенню впливу діаметру поздовжніх перетинок на просівання зерна фактична ширина каналів решета становила, відповідно, 4,0 мм та 2,0 мм.

Результати досліджень для колосового решета представлено на рис. 4.1.

Результати експериментальних досліджень підсівного решета представлені на рис. 4.2. Аналіз графіку свідчить про те, що зі збільшенням діаметру перетинок від 1 до 5 мм маса виділеного підсіву збільшувалась. Але при його подальшому збільшенні маса виділеного підсіву поступово зменшувалась.



Рис. 4.1. Вплив діаметра калібруючих перетинок на просівну здатність колосового пруткового решета

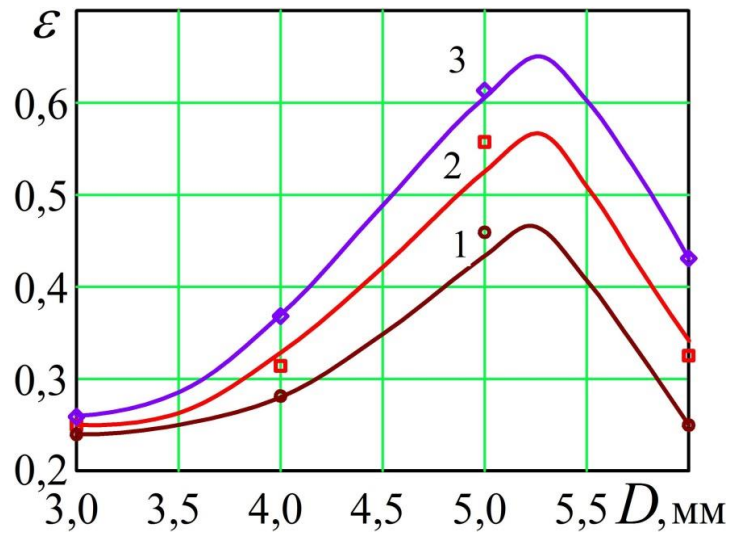


Рис. 4.2. Вплив діаметра калібруючих перетинок на просівну здатність підсівного пруткового решета:

1, 2, 3 – експериментальні дані за питомого навантаження, відповідно, 3,33 кг/(м×с); 5 кг/(м×с); 6,67 кг/(м×с)

Це пояснюється тим, що загальний вплив діаметру калібруючих перетинок підсівного решета на його просівну здатність визначають одночасно два різнонаправлених фактори, ступінь впливу яких зі збільшенням діаметру також змінюється. Зміна діаметру калібруючих перетинок підсівного та сортувального решіт впливає одночасно, але в зворотньому напрямках на його "живий" переріз і орієнтуючу здатність. Зменшення діаметру перетинок збільшує "живий" переріз решета, що підвищує вірогідність просівання зерна. Але при цьому погіршується орієнтовна здатність перетинок, що погіршує виділення підсіву.

Тобто, з одного боку збільшення діаметру калібруючих перетинок підсівних решіт в певних межах, в залежності від розмірів часток оброблюваного матеріалу, насамперед їх довжини, покращує орієнтуючу здатність робочої поверхні пруткового решета. Це позитивно впливає на ефективність сепарування зерна. В той же час збільшення діаметру зменшує "живий" переріз робочої поверхні пруткового решета, що негативно впливає на ефективність його роботи. В нашому випадку, тобто при відокремленні дрібних домішок на підсівному прутковому решеті із зернового вороху озимої пшениці, позитивний вплив діаметру перевищує його негативний вплив в межах до 5 мм, при якому його просівна здатність була найвищою. Подальше збільшення діаметру веде до погіршення ефективності роботи підсівного решета, в наслідок більш суттєвого негативного впливу на просівання зменшення його "живого" перерізу.

Таким чином, в нашому випадку раціональний діаметр перетинок підсівного решета становить 4,5...5,5 мм, а для колосового решета він повинен бути як можна меншим.

4.3. Визначення швидкості руху зерна по решітній поверхні під дією багат шарової взаємодії часток зернового вороху

Величину та характер зміни швидкості руху зерна під дією верхніх шарів визначали для різних кутів нахилу решета.

У всіх дослідях робоча довжина решета становила 1 м.

Результати дослідів представлені на рис. 4.3.

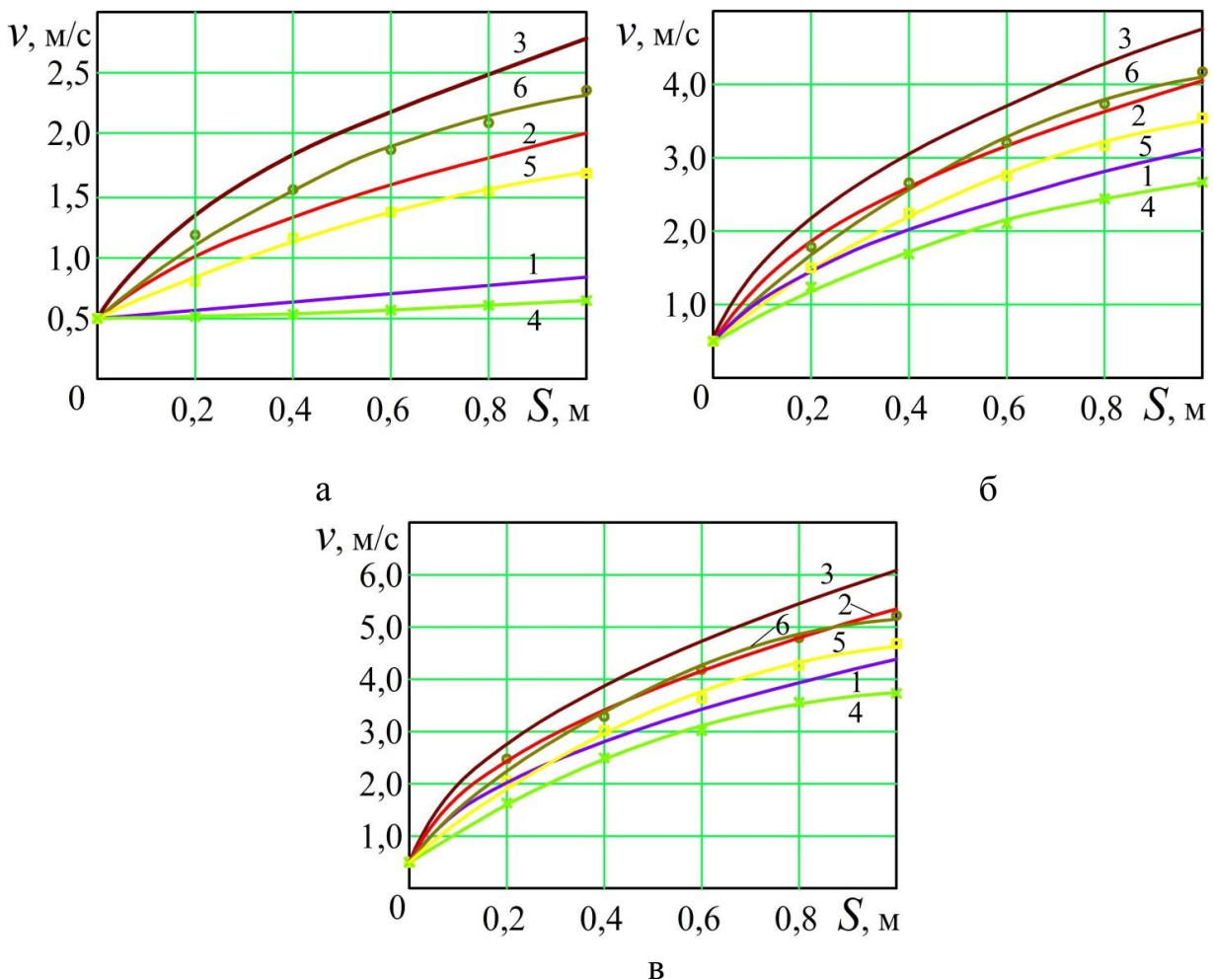


Рис. 4.3. Зміна швидкості руху зерна нижнього шару по довжині робочої поверхні:

а, б, в – відповідно при кутах нахилу поверхні 20° , 30° та 40° за умов одношарового руху по похилій поверхні (1, 4), в два шари (2, 5) та три шари – (3, 6); відповідно; 1, 2, 3 – теоретичні; 4, 5, 6 – експериментальні

Аналіз отриманих результатів показує, що:

- наявність багат шарового руху зерна сприяє прискоренню швидкості руху часток його нижнього шару;
- збільшення кількості шарів зерна на похилій робочій поверхні, та кута її нахилу до горизонту підвищують швидкість руху часток нижнього шару.

Таким чином, отримані теоретичні залежності впливу верхніх шарів на швидкість руху часток нижнього шару підтверджуються. Різниця між теоретичними та експериментальними даними пояснюється впливом факторів, що не були враховані під час теоретичних досліджень:

- неоднорідність шорсткості похилої поверхні;
- аеродинамічний опір руху часток;
- поверхня решета не являє собою суцільну площину, оскільки поздовжні перетинки утворюють жолоб, по якому рухаються частки;
- збільшення глибини жолобу при збільшенні діаметру перетинок призводить до збільшення сили тертя, та відповідно до зменшення їх швидкості руху.

Крім означеного необхідно відмітити, що в прискореному багат шаровому русі зерна кількість шарів на робочій поверхні безперервно зменшується, зменшуючи при цьому їх прискорювальний вплив на частки нижнього шару.

4.4. Визначення робочої довжини решета

Збільшення кута нахилу та навантаження призводить до зростання швидкості руху зерна по решеті. Зі збільшенням кута нахилу збільшується швидкість часток нижнього ряду внаслідок збільшення величини складової сили ваги, як власної, так і часток що знаходяться над нею. В результаті просівання часток нижнього ряду, частки що знаходились над ними переходять на робочу поверхню решета. При цьому вони отримують додаткове прискорення від часток, що рухаються за ними по поверхні решета. Таким чином їх швидкість руху здовж перетинок зростає, в той час як в поперечному напрямку вона незначна і збільшується поступово. Це пов'язано зі зменшенням тиску верхніх шарів на нижні внаслідок зменшення загальної товщини шару оброблюваного матеріалу, що рухається по поверхні сепарації.

Під час досліджень було встановлено залежність робочої довжини решета від його кута нахилу, питомого навантаження. Одночасно з цим було виявлено залежність від цих параметрів розташування часток зернового вороху по відношенню до задньої стінки попереднього ковша, які можуть:

- наздоганяти задню стінку попереднього ковша;
- розташовуватися між двома ковшами;
- транспортуватись не відриваючись від ковша, з якого вони розвантажились.

В першому випадку зі збільшенням питомого навантаження та кута нахилу транспортера–сепаратора спостерігалось накопичення оброблюваного матеріалу на задній стінці переднього ковша. Це пояснюється тим, що частки оброблюваного матеріалу, внаслідок дії прискорення, мають більшу швидкість руху, ніж ковші, які рухаються зі сталою швидкістю і наздоганяють їх. Внаслідок цього відбувається гальмування руху часток та вирівнювання їх швидкостей з швидкістю транспортера. При цьому задні частки, які мають більшу швидкість, наздоганяють їх і під тиском часток, що рухаються за ними, переміщуються поверх над попередніми. Таким чином відбувається накопичення зернового матеріалу біля задньої стінки попереднього ковша і сумісний рух по поверхні решета.

В другому випадку, коли кут нахилу решета становить 20–30°, частки, що першими зійшли з ковша теж наздоганяють попередній ківш. Наступні частки, сходячи з ковша і маючи швидкість дещо більшу ніж швидкість транспортера, починають наздоганяти попередні. Під дією сил тертя швидкість руху попередніх часток поступово знижується. Наступні за ними частки наздоганяють їх і переміщуються в шари над ними, при цьому за ними утворюються пустоти, в які надходять частки, перед якими нема попередників. Тобто, частки після сходу з ковша можуть знаходитися в кількох шарах, кількість яких збільшується в напрямку від попереднього ковша до наступного. Внаслідок тиску часток верхніх шарів на частки нижнього, останні, у випадку коли їх розміри та положення відносно перетинок і каналів дозволяють їм просіятися, проходять крізь решето. Таким чином виникають розриви не тільки між частками нижнього шару, а й між частками інших шарів, з яких частки надходять до поверхні решета. Внаслідок відсутності тиску на них інших часток, що могли б тиснути на них з боків, з заду чи зверху та отриманого прискорення, вони починають підстрибувати по поверхні решета, що виникає внаслідок збільшення їх швидкості руху.

В третьому випадку частки зернового вороху рухаються по поверхні решета товстим шаром. Для цього випадку було встановлено, що за одношарового руху оброблюваного матеріалу, через відсутність верхніх шарів та значного зростання швидкості, окремі частки нижнього шару починають підстрибувати, і виділяються крізь поверхню сепарації набагато далі ніж основна маса, що впливає на робочу довжину решета, збільшуючи її значення. Причому збільшення кута нахилу викликає збільшення ділянки такого руху зернин.

Порівнюючи між собою характер рух часток оброблюваного матеріалу в трьох випадках необхідно відмітити, що в першому випадку, порівняно з другим, довжина решета, на якій відбувається повне просівання прохідних часток в залежності від подачі матеріалу та кута нахилу решета, більша на 25–40 см. В третьому випадку, у порівнянні з другим, основна маса часток виділяється за тих же умов на 8–15 см раніше, але частина зерна, що рухається далі перевищує обмежені стандартом допустимі втрати зерна, навіть для первинного очищення.

Таким чином, найбільш раціональним для використання на практиці є варіант коли оброблюваний матеріал рухаються по поверхні решета, знаходячись між ковшами (другий випадок). При цьому відбуваються найменші втрати часток основного матеріалу.

Результати експериментальних даних для кутів нахилу решета 20 та 30° та питомих навантажень від 1,38 до 12,5 кг/(м×с) наведені на рис. 4.4.

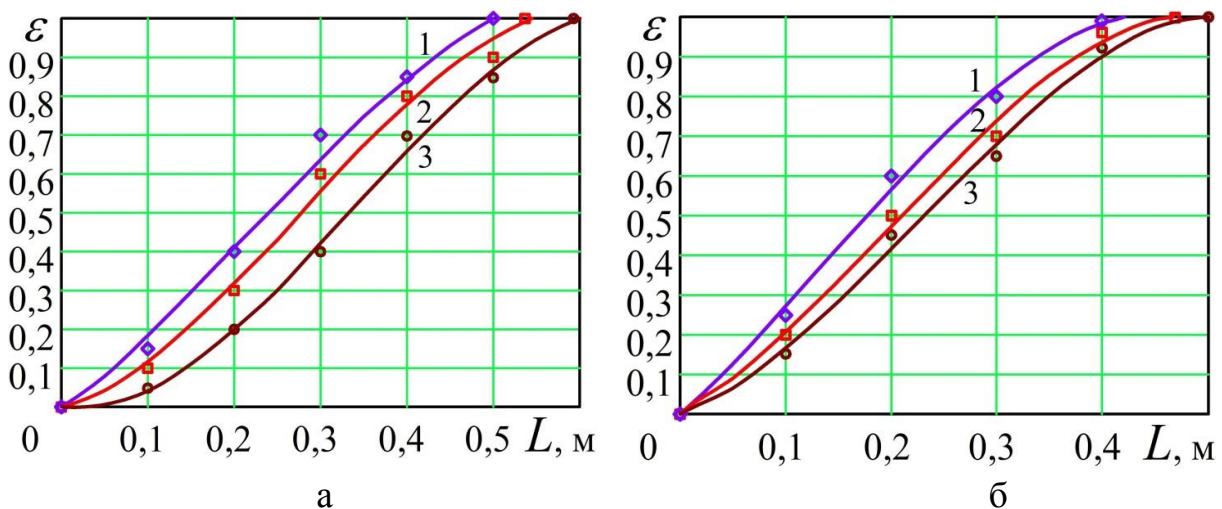


Рис. 4.4. Залежність повноти виділення зерна по довжині решета: а, б – кути нахилу решета 20° та 30°, відповідно; 1, 2 та 3 – питомі навантаження $q_{num}=1,38$ кг/(м×с), $q_{num}=6,9$ кг/(м×с), $q_{num}=12,5$ кг/(м×с), відповідно

Аналіз отриманих залежностей показує, що величина просівання зерна залежить від кута нахилу та питомого навантаження на решето. Зі збільшенням обох чинників просівання зменшується, а довжина решета, необхідна для виділення прохідних часток, збільшується.

При цьому необхідно зробити висновок, що збільшення кута нахилу решета, починаючи з 20° на кожні 5° збільшує його довжину на 10–13 см у даних діапазонах питомого навантаження. Збільшення питомого навантаження від 1,38 до 12,5 кг/(м×с) збільшує довжину решета при відповідних кутах нахилу решета на 2–7 см.

Таким чином, раціональні значення кута нахилу решета при питомих навантаженнях від 1,38 до 12,5 кг/(м×с) становить $25\text{--}30^\circ$. За цих же значень наведених параметрів робоча довжина решета становить 40–60 см. Причому максимальна його довжина відповідає максимальному навантаженню та куту нахилу.

4.5. Вплив фізико–механічних властивостей оброблюваного матеріалу на ефективність роботи транспортера–сепаратора

При проведенні дослідів по визначенню просівання зерна вивчався вплив вмісту крупних домішок вихідного матеріалу за наступних параметрів транспортера–сепаратора: кут нахилу – 30° ; швидкість руху транспортера – 0,5 м/с, діаметр поздовжньої перетинки – 2 мм (рис. 4.5).

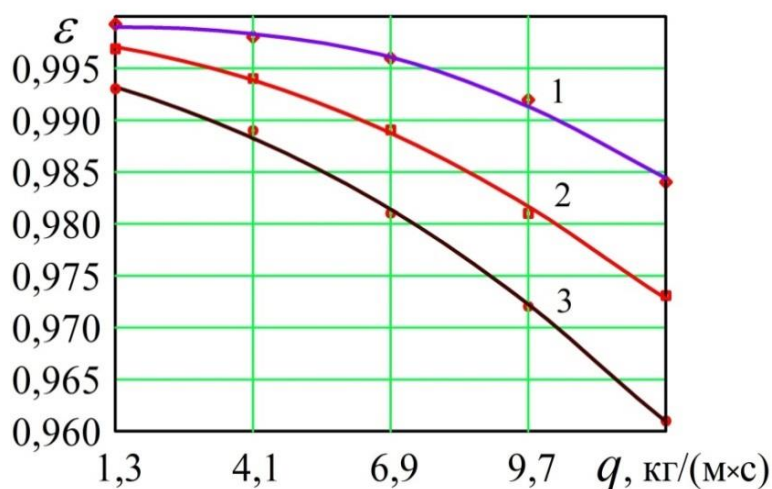


Рис. 4.5. Залежність просівання зерна решета від питомого навантаження за різних показників засміченості зернового вороху: 1, 2 та 3 – відповідно для засміченості вороху 2%, 4% та 6%

Вплив вологості вороху на просівання зерна визначався за тих же параметрів (рис. 4.6).

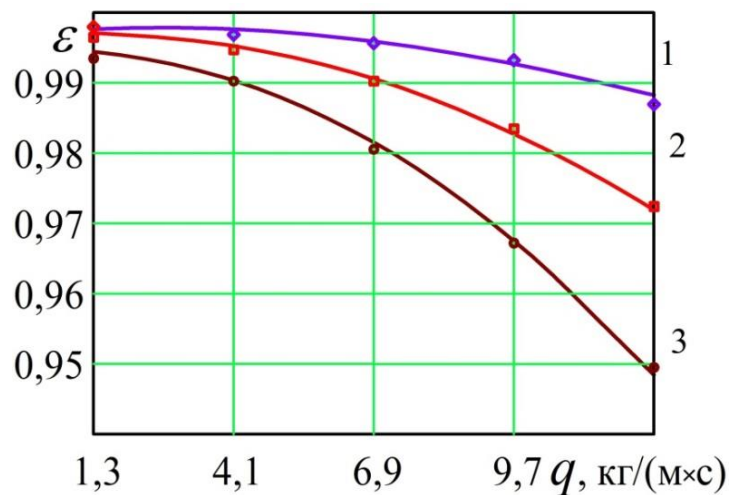


Рис. 4.6. Залежність просівання зерна від питомого навантаження за різних значеннях вологості зернового вороху:
1, 2 та 3 – відповідно для вологості вороху 10%, 14% та 18%

Аналіз графіків залежність просівання зерно крізь отвори решета від вмісту крупних домішок вказує на те, що зі збільшенням їх кількості просівання зменшується.

Така ж залежність спостерігається по впливу просівання зерна від його вологості – при збільшенні якої зменшується просівання, а втрат збільшуються.

4.6. Визначення впливу основних параметрів та режиму роботи досліджуваного робочого органу на технологічну ефективність сепарації

Для встановлення впливу досліджуваних факторів на чіткість сепарації та визначення напрямку руху до тієї частини поверхні відгуку, де умови протікання процесу оптимальні була реалізована матриця репліки типу 2^4 , незалежні змінні, інтервали варіювання та матриця планування представлені в табл. 4.3.

Основний рівень та інтервали варіювання факторів вибрані на основі аналізу результатів теоретичних досліджень, а також на основі попередніх даних експериментальних досліджень.

Після проведення дослідів отримане рівняння регресії, що описує локальну ділянку поверхні відгуку, яка характеризує чіткість сепарації:

$$y = 6,864 + 2,086x_1 + 2,226x_2 + 1,152x_3 + 3,748x_4 + 0,592x_1x_2 - 0,169x_1x_3 + 1,044x_1x_4 + 0,501x_2x_3 + 1,142x_2x_4 - 0,002x_3x_4. \quad (4.1)$$

Таблиця 4.3

Планування експерименту при вивченні процесу сепарації

Досліджуваний фактор	α , град	d , мм	v , м/с	q , кг/м×с		
Основний рівень	30	3	1	11		
Інтервал варіювання	±10	±2	±0,5	±3		
Кодові позначення	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_u	S_u^2
Дослід 1	+	+	-	+	16,10	0,012
2	+	-	+	-	3,91	0,012
3	-	+	-	-	1,03	0,0031
4	+	-	+	+	8,95	0,0052
5	-	-	-	+	4,13	0,0031
6	+	+	+	-	6,05	0,0043
7	-	-	+	+	6,08	0,011
8	+	+	+	+	20,10	0,280
9	-	-	-	-	0,15	0,0019
10	-	-	+	-	1,50	0,0013
11	-	+	+	+	11,2	0,317
12	-	+	+	-	4,90	0,210
13	+	+	-	-	4,10	0,0077
14	-	+	-	+	7,80	0,0067
15	+	-	-	+	9,10	0,280
16	+	-	-	-	1,85	0,0037

Статистичне оцінювання отриманих результатів включало перевірку на адекватність моделі за критерієм Кохрена, яке становить $f_u=0,274$. Оскільки отримане значення менше табличного 0,332 [22, 97, 116], то моделі властива відтворюваність, таким чином при плануванні можна передбачити очікувані результати експерименту.

Перевірку адекватності отриманої моделі (табл. 4.3) проводимо за допомогою критерію Фішера (F -критерію). Розрахункове значення F -

критерію, яке становить $F=0,211$, менше табличного значення $F_T=2,561$ [22, 91, 116] (вибраний для $p=0,95$; $f_{ad}=11$; $f_y=32$), яке визначається за допомогою методу інтерполяції. Таким чином, гіпотеза про адекватність лінійного рівняння підтверджується і його можна використовувати для опису процесу.

Значущість отриманих коефіцієнтів перевірена за критерієм Стюдента (t -критерію) для надійності оцінка 0,95 та числа ступенів свободи $f_t=15$ [115]. Аналіз довірчого інтервалу показує, що в досліджуваному інтервалі статистично незначущі коефіцієнти регресії b_1b_2 , b_1b_3 , b_2b_3 та b_3b_4 , оскільки отримані значення їх рівнів значимості за критерієм Стюдента більші за допустиме значення рівня значимості $p=0,05$ [17].

Із аналізу рівняння регресії можна отримати відомості про вплив досліджуваних факторів.

До статистично вагомих коефіцієнтів входять всі коефіцієнти крім коефіцієнтів b_1b_2 , b_1b_3 , b_2b_3 та b_3b_4 .

Провівши аналіз Парето-карти (рис. 4.7) можна зробити висновок, що на чіткість сепарації ε всі фактори, а також зазначені нижче взаємодії факторів: кута нахилу і подачі x_1x_4 ; діаметру і подачі x_2x_4 . Найбільшого впливу серед факторів мають подача x_4 , а найменшого – початкова швидкість руху вороху x_3 .

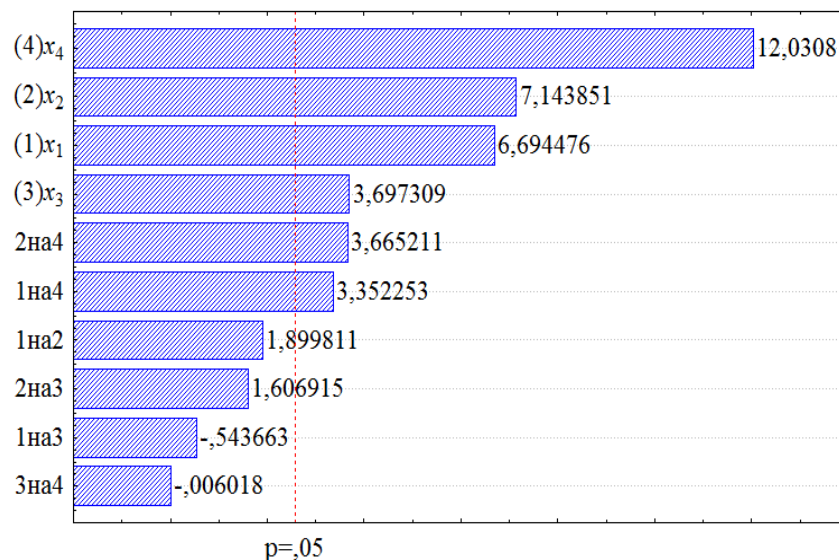
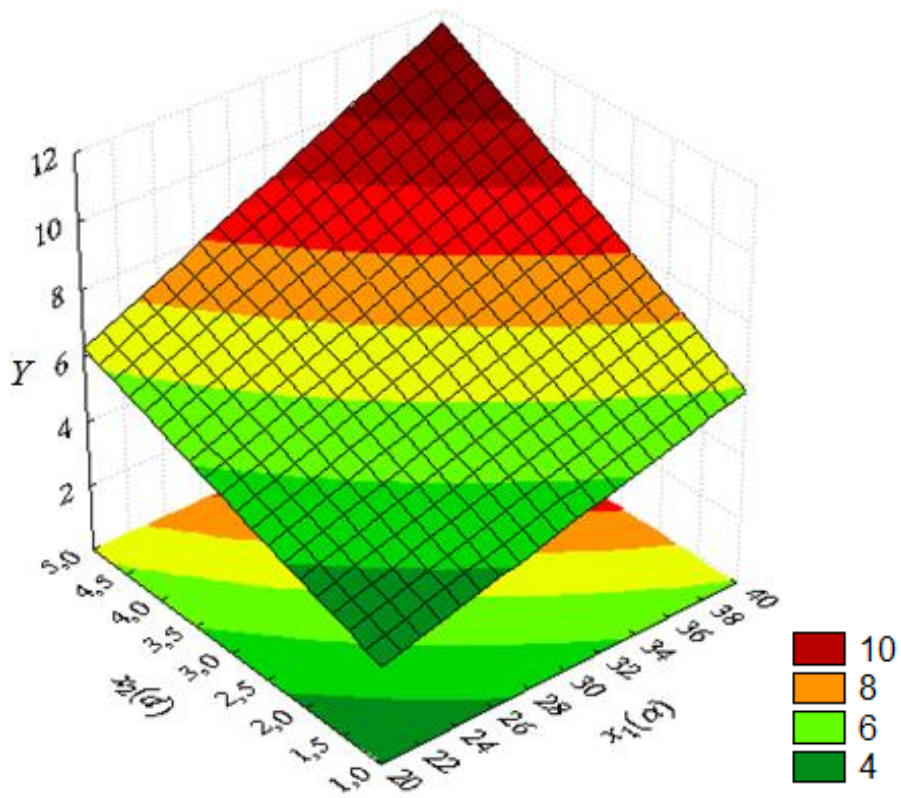
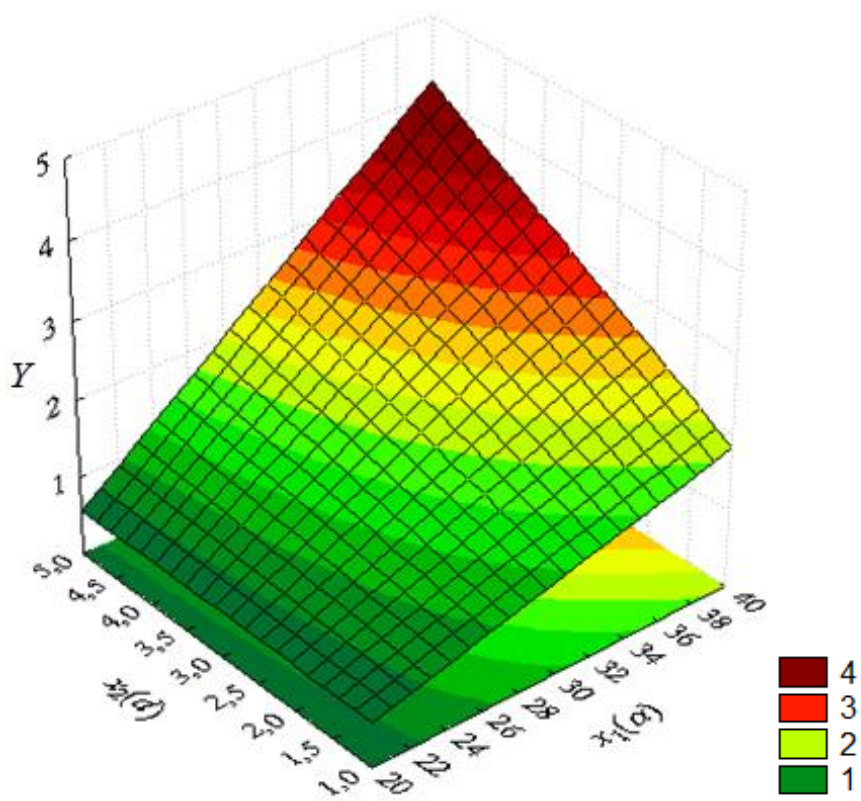


Рис. 4.7. Стандартизована Парето-карта для чіткості сепарації $Y(\varepsilon)$

Поверхні відгуку та карти ліній рівного виходу (рис. 4.8–4.13) дозволяють не тільки виявити сумісний вплив факторів на чіткість сепарації, а й визначити напрям руху до раціональних конструкторсько-технологічних параметрів

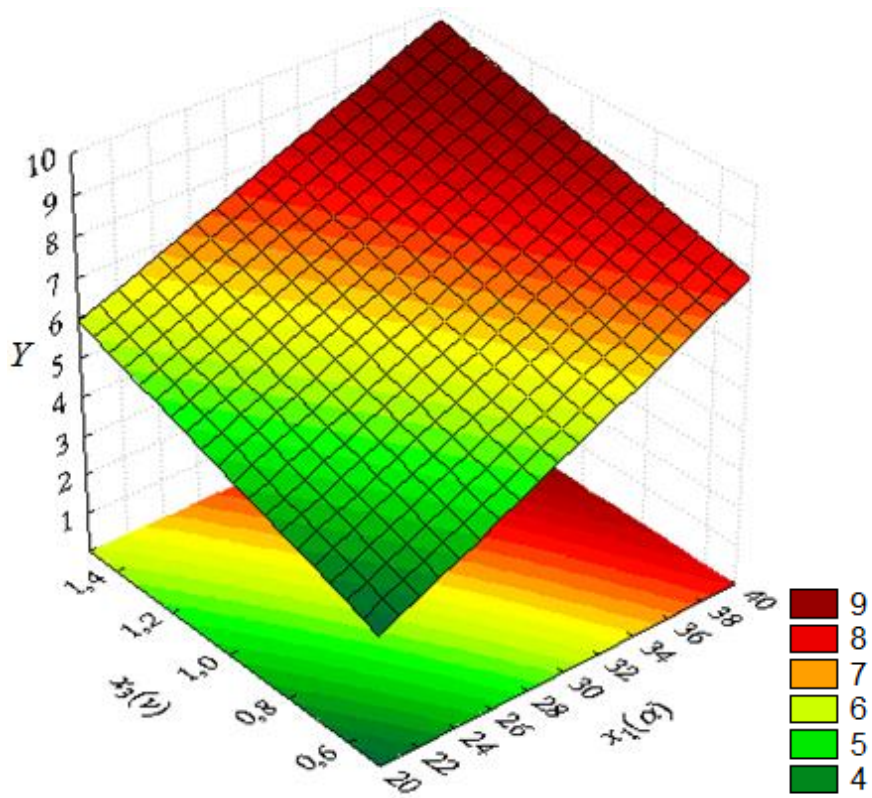


а

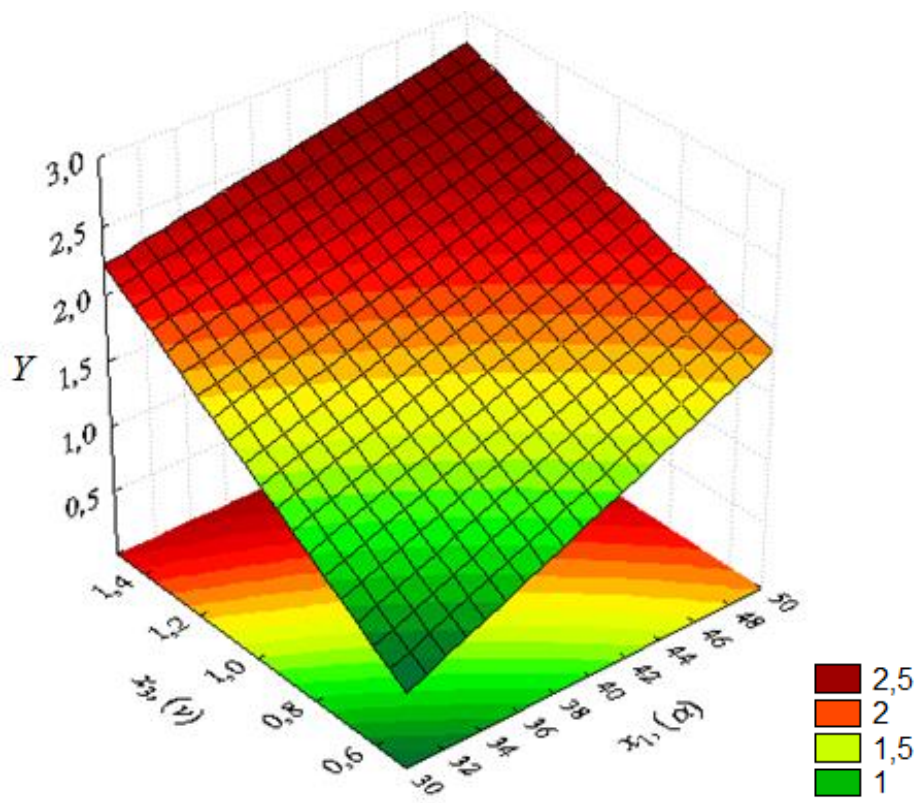


б

Рис. 4.8. Залежність чіткості сепарації від кута нахилу решета та діаметра поперечної перетинки решета:
а – основний рівень факторів; б – нижній рівень факторів

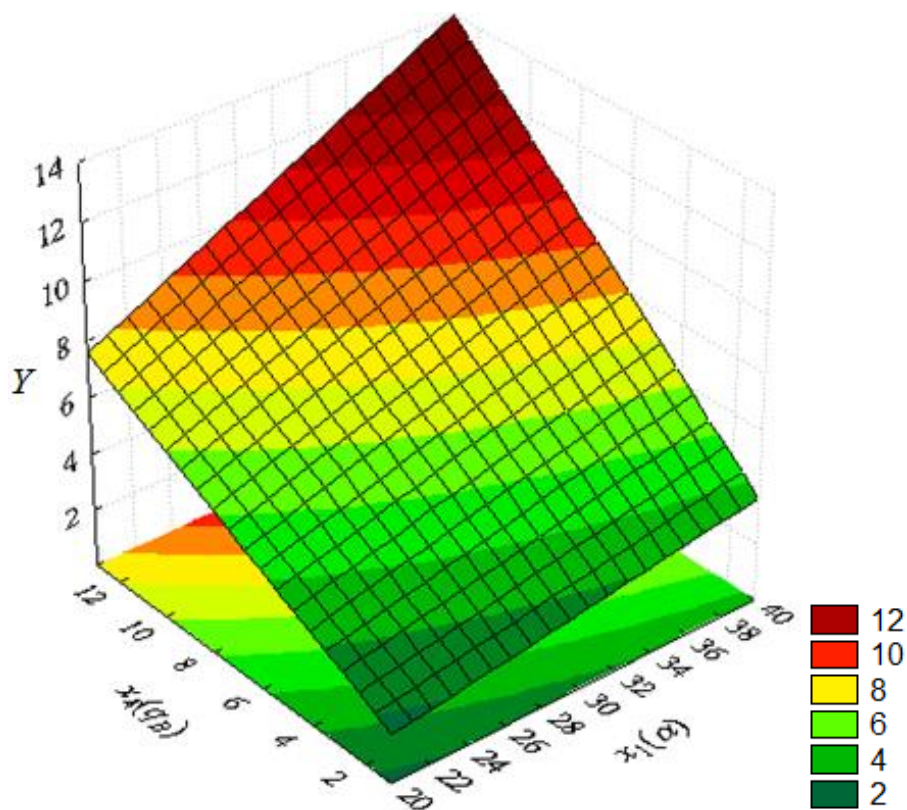


а

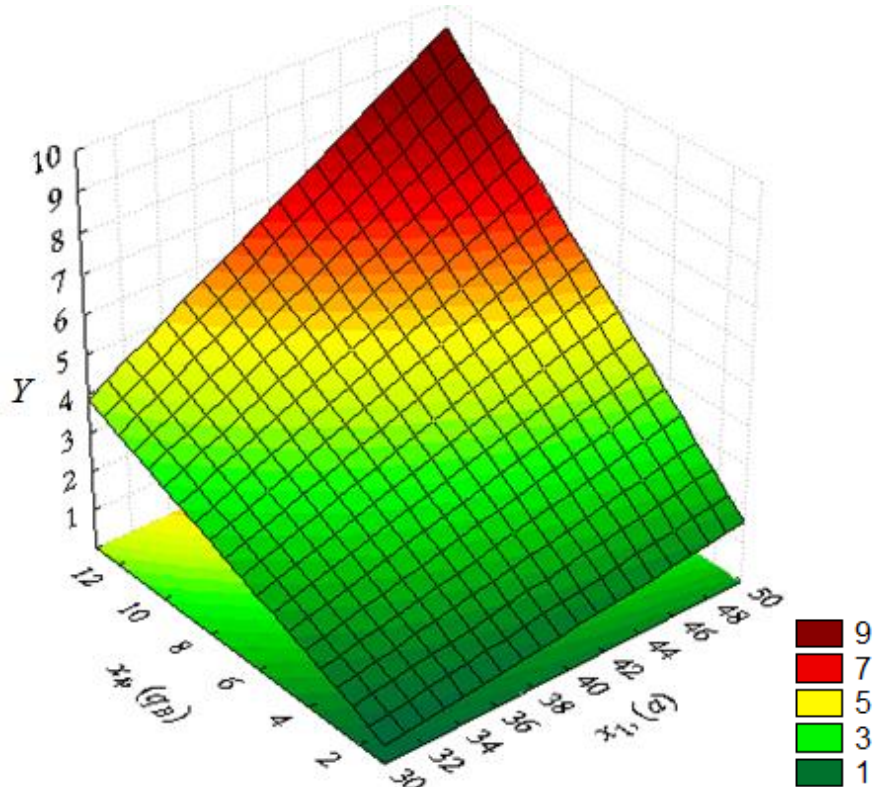


б

Рис. 4.9. Залежність чіткості сепарації від кута нахилу решета та початкової швидкості руху матеріалу:
а – основний рівень факторів; б – нижній рівень факторів



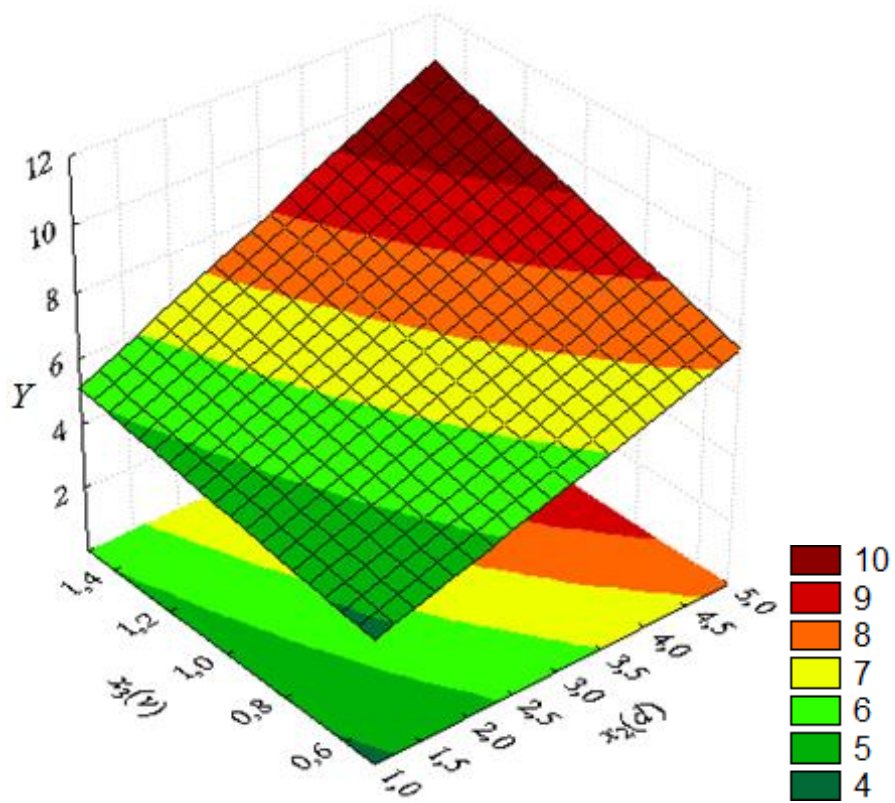
а



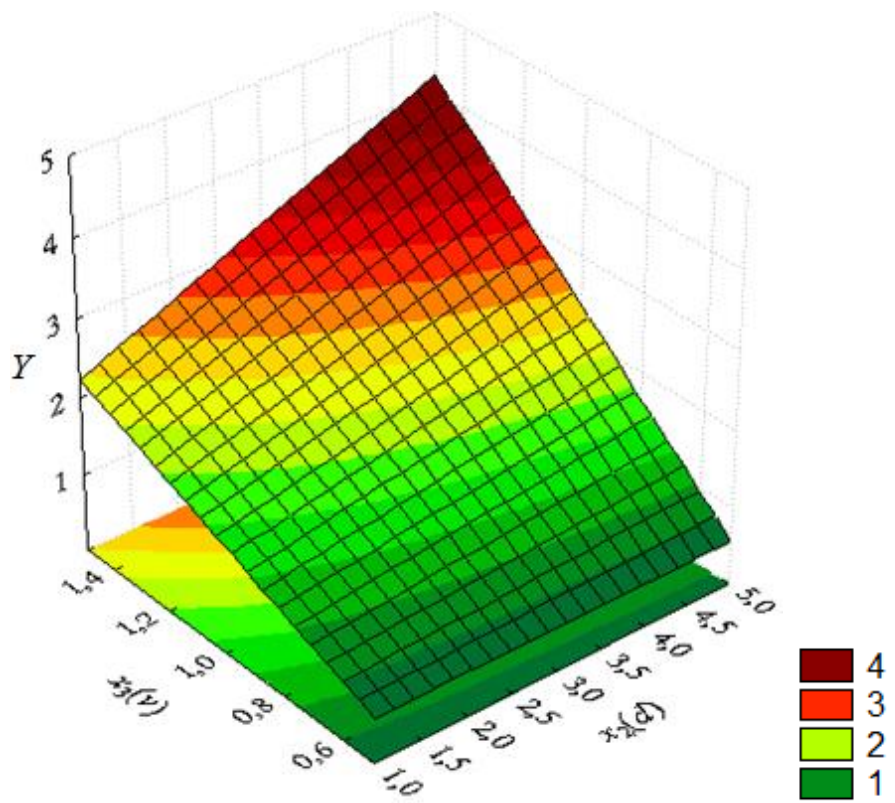
б

Рис. 4.10. Залежність чіткості сепарації від кута нахилу решета та подачі матеріалу:

а – основний рівень факторів; б – нижній рівень факторів

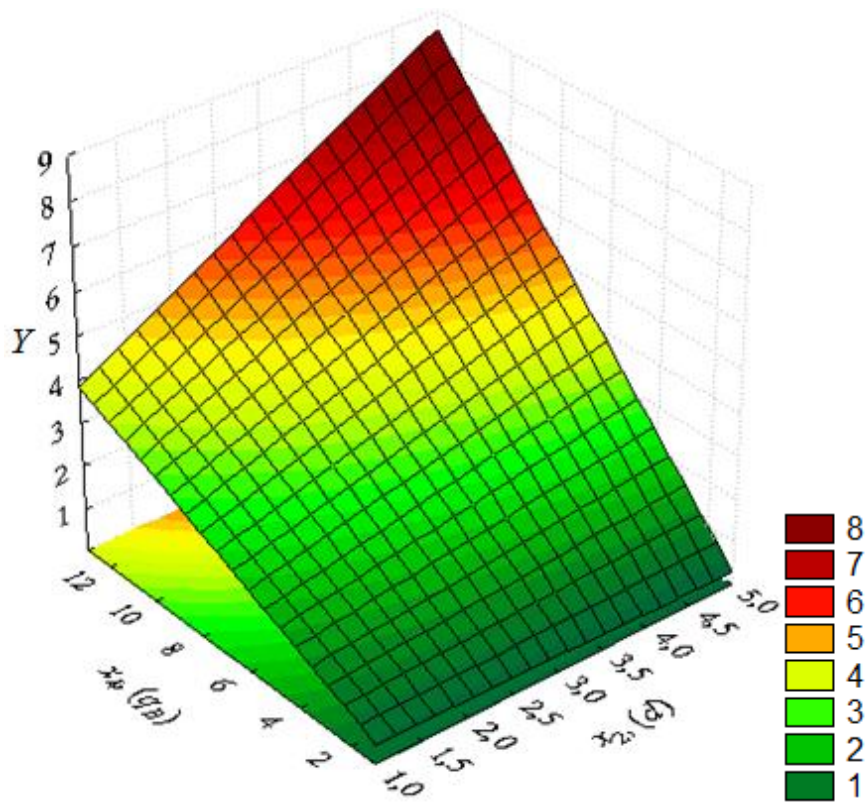


а

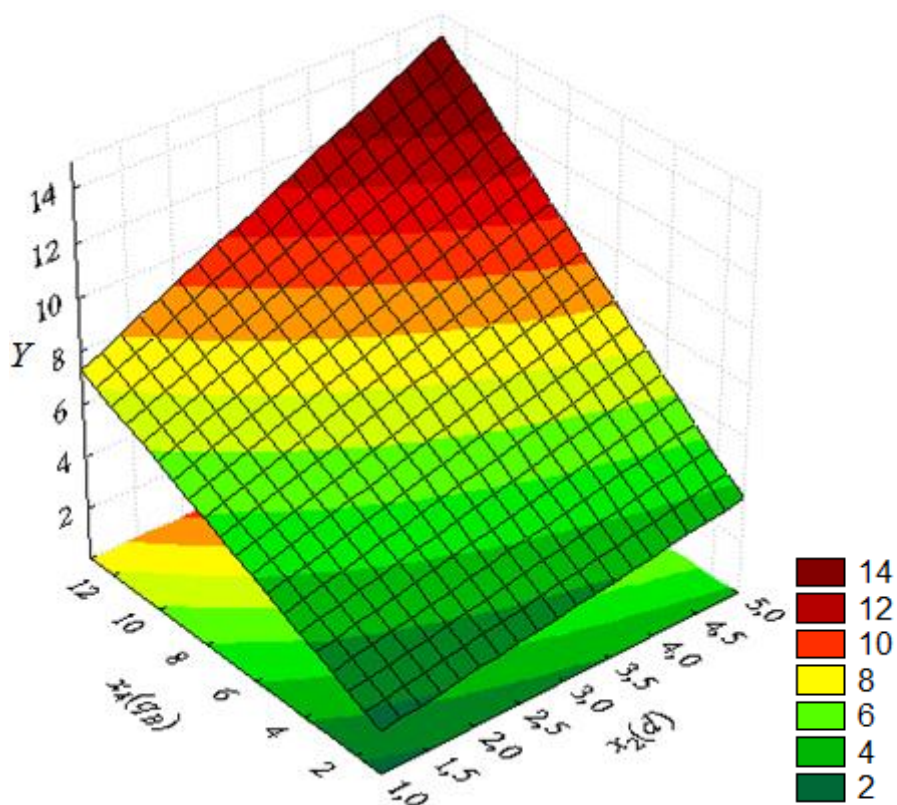


б

Рис. 4.11. Залежність чіткості сепарації від діаметра поперечної перетинки решета та початкової швидкості руху матеріалу:
а – основний рівень факторів; б – нижній рівень факторів



а



б

Рис. 4.12. Залежність чіткості сепарації від діаметра поперечної перетинки решета та подачі матеріалу:

а – основний рівень факторів; б – нижній рівень факторів

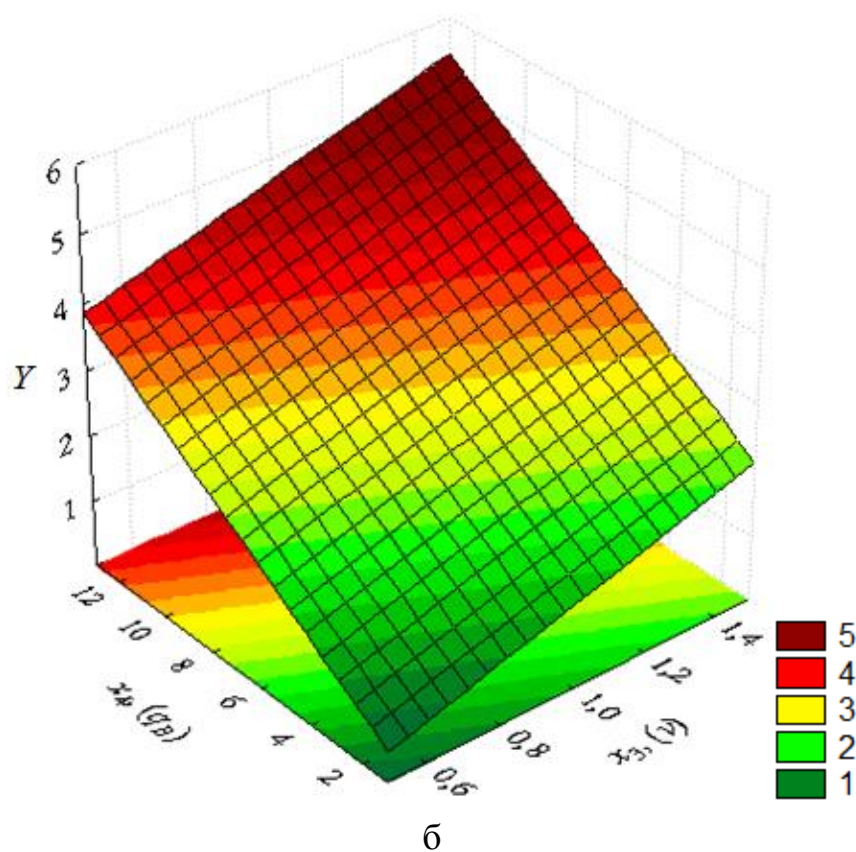
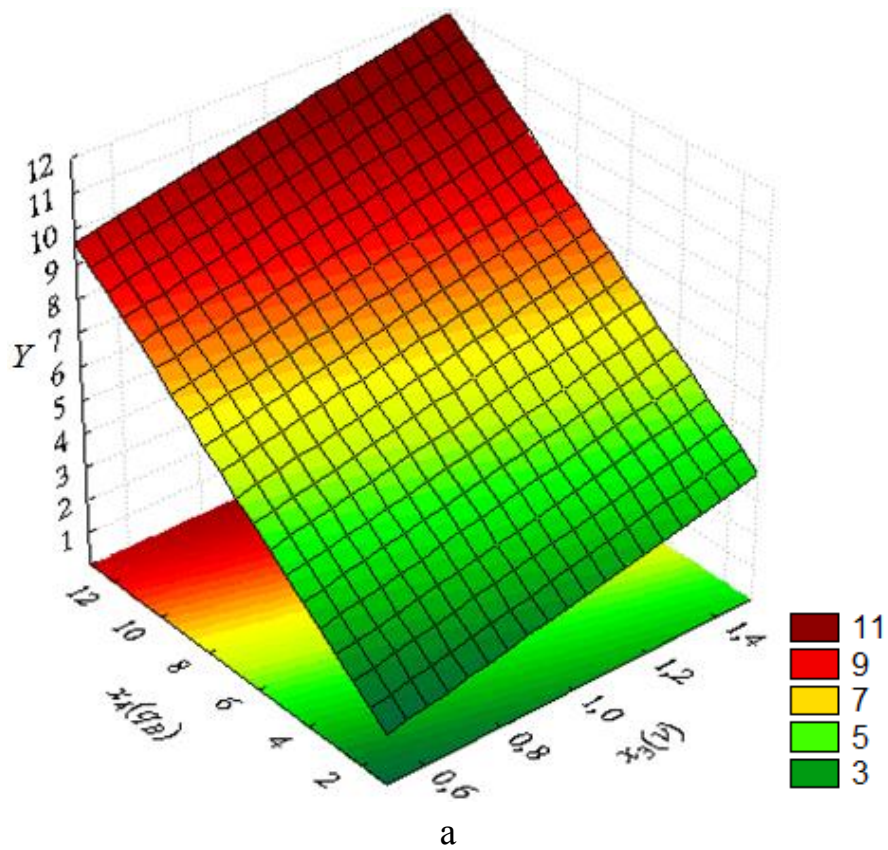


Рис. 4.13. Залежність чіткості сепарації від початкової швидкості руху матеріалу та подачі матеріалу:
 а – основний рівень факторів; б – нижній рівень факторів досліджуваного робочого органу.

Аналіз експериментальних даних дав можливість виявити характер зміни факторів та проаналізувати їх взаємний вплив на критерій оптимізації. Так, при збільшенні питомого зернового навантаження $x_4(q_B)$ чіткість сепарації пропорційно знижується. Виявлено, що збільшення кута нахилу решета $x_1(\alpha)$, діаметра його перетинок $x_2(d)$ та початкової швидкості руху зернового матеріалу $x_3(v)$ обумовлюють зменшення чіткості сепарації. Встановлено, що питоме зернове навантаження $x_4(q_B)$ не повинне перевищувати 7 кг/(м×с), початкова швидкість зернового матеріалу $x_3(v)$ знаходиться на рівні 0,5–1,2 м/с, а кут нахилу решета $x_1(\alpha)$ – у межах 20–30°. При вказаних вище чинниках раціональний діаметр перетинок решета $x_2(d)$ не повинен перевищувати 1–3 мм. За таких параметрів вдається досягти чіткості сепарації на граничному рівні 2%.

4.7. Визначення кроку ковшів транспортера–сепаратора

Відомо, що крок ковшового транспортера залежить від його продуктивності. Під час експериментальних досліджень було встановлено, що для питомої продуктивності транспортера–сепаратора 1,3–6,9 кг/(м×с), при кутах його нахилу 20–30° і швидкості руху до 0,5 м/с раціональна величина кроку між ковшами становить 0,17–0,2 м.

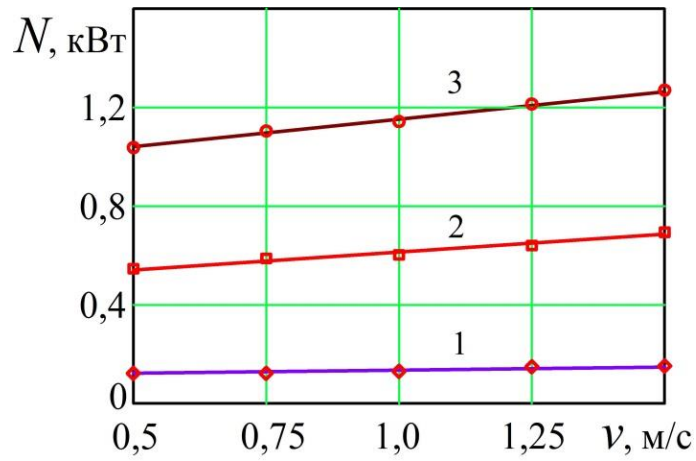
4.8. Визначення енергоємності роботи транспортера-сепаратора

Потужність, необхідну на виконання технологічного процесу, виконуваного робочим органом визначали при різних питомих навантаженнях, кутах нахилу та швидкостях руху транспортеру. На основі отриманих даних визначено закономірності витрат енергії (рис. 4.15 та 4.16).

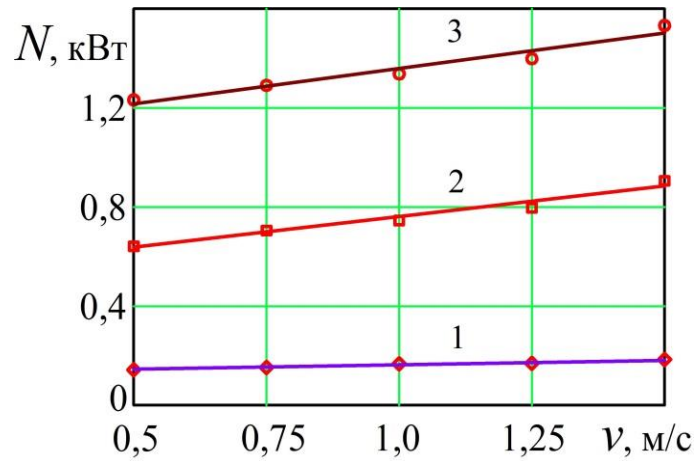
Із збільшенням питомого завантаження q , швидкості руху v , та кута нахилу транспортеру α витрати енергії на здійснення процесу також зростають.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що положення (кут нахилу) задньої стінки ковшів, при куті нахилу решета понад 30° та питомому навантаженні 6,9–12,5 кг/(м×с) впливає на характер руху зерна по поверхні решета між ковшами.

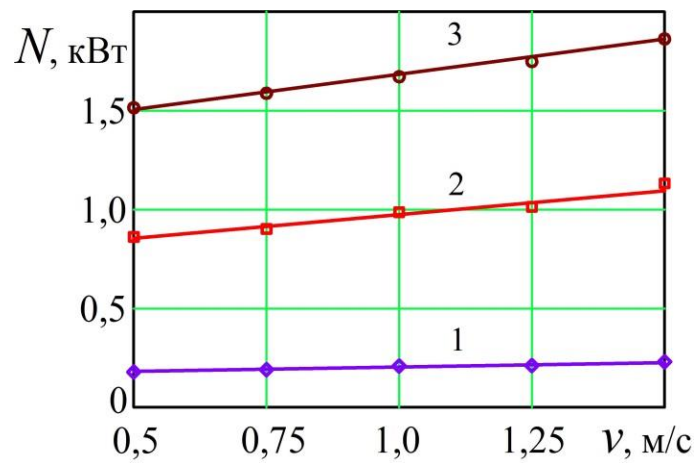
Перпендикулярне, по відношенню до решета, положення стінки ковшів сприяє накопиченню на ній і біля неї зернових часток, що призводить до збільшення довжини решета на 4–7 см.



а



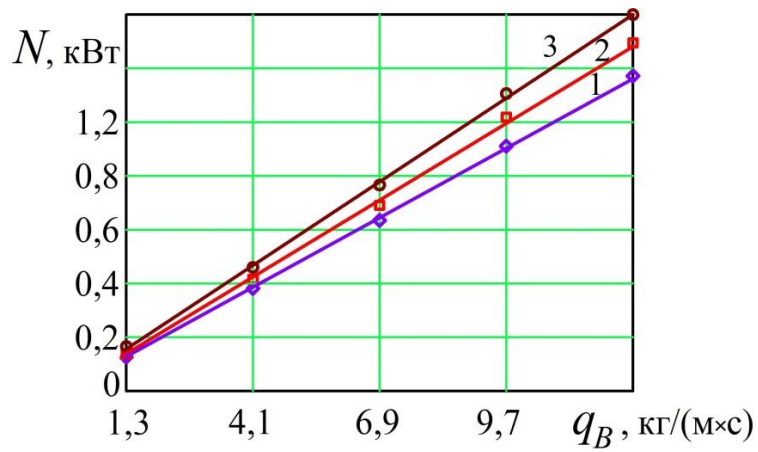
б



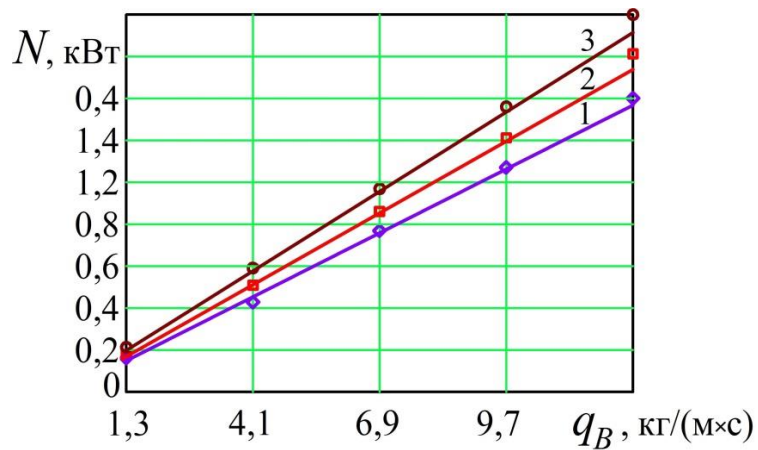
в

Рис. 4.14. Витрати потужності N на привод транспортера–сепаратора від його швидкості руху v для різних кутів нахилу решета α та питомих навантажень q_B :

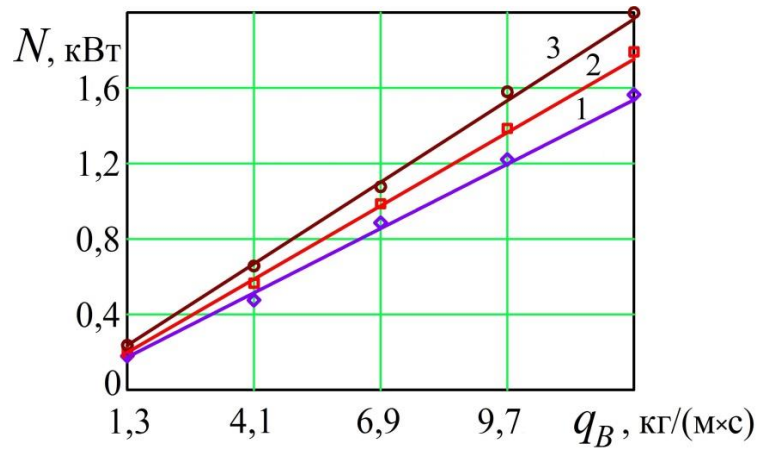
а, б, в – відповідно, для $\alpha=20^\circ, 30^\circ$ та 40° ; відповідно, 1 – $q_B=1,38$ кг/(м×с), 2 – $q_B=6,9$ кг/(м×с) та 3 – $q_B=12,5$ кг/(м×с)



а



б



в

Рис. 4.15. Витрати потужності на привод транспортера–сепаратора від питомого навантаження:

а, б, в – відповідно кути нахилу решета 20° , 30° та 40° ; 1, 2 та 3 – відповідно швидкість руху ковшів 0,5 м/с, 1 м/с та 1,5 м/с

Більш раціональним є вертикальне положення стінки, за якого на частки, які її наздогнали, нею створюється зворотній тиск, що сприяє просіванню зерна, не збільшуючи при цьому довжини решета.

4.9. Висновки по розділу

В результаті проведення експериментальних досліджень визначено:

- залежність діаметру поперечних перетинок від призначення решета (колосове, підсівне, сортувальне);
- залежності зміни просівання зерна крізь канали пруткового решета від параметрів та режимів роботи сепаруючої частини робочого органу;
- залежності виділення крупних домішок від параметрів та режимів роботи сепаруючої частини робочого органу;
- експлуатаційні показники роботи сепаратора.

За результатами проведених експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки

1. Експериментальні дослідження руху зерна на нерухомій похилій поверхні підтвердили висновки теоретичного аналізу, що зі збільшенням кількості шарів зерна на робочій поверхні швидкість часток нижнього шару збільшується порівняно з одношаровим рухом. При цьому, внаслідок реального зменшення кількості шарів зерна при його прискореному русі фактичні (експериментальні) значення його швидкості для всіх дослідів є меншими за розрахункові значення, що визначені в теоретичних дослідженнях. Але і теоретичні і експериментальні дані свідчать, що одношаровий і багатошаровий рух зерна відрізняються величиною швидкості, яка зі збільшенням шарів також збільшується.

2. Область раціональних значень діаметрів перетинок колосового решета для зерна пшениці знаходиться в межах від 0 до 2 мм. Експериментальними дослідженнями підтверджено теоретичні залежності, що зі збільшенням діаметрів перетинок технологічна ефективність сепарації зменшується.

3. Область раціональних значень діаметрів перетинок підсівного решета, для тих же культур, знаходиться в межах 4,5–5,5 мм. Причому зменшення та збільшення діаметрів перетинок за межами цього діапазону зменшує технологічну ефективність сепарації пруткового решета.

4. Потрібна довжина решета транспортера–сепаратора збільшується при збільшенні швидкості подачі та кута нахилу. Області раціональних значень вказаних параметрів лежать в межах: швидкість подачі – 0,5...0,7 м/с; кут нахилу решета – 20...30°. Довжина решета, на якій відбувається просівання всього матеріалу для вказаних умов складає 0,4...0,6 м.

5. На процес сепарації зернового вороху на прутковому решеті, у визначених довірчих інтервалах, впливають: кут нахилу решета, вміст крупних домішок та питоме навантаження на решето. При чому збільшення будь якого з цих параметрів призводить до збільшення втрат зерна.

6. Зі збільшенням кута нахилу решета при сталому питомому навантаженні питома продуктивність решета зменшується. Навпаки, зі збільшенням питомого навантаження при незмінному куті нахилу решета вона збільшується.

7. Повнота виділення крупних домішок на сепаруючій поверхні транспортера–сепаратора збільшується зі зменшенням діаметра поперечного перерізу поздовжніх перетинок, кута нахилу решітної поверхні та питомого навантаження решета.

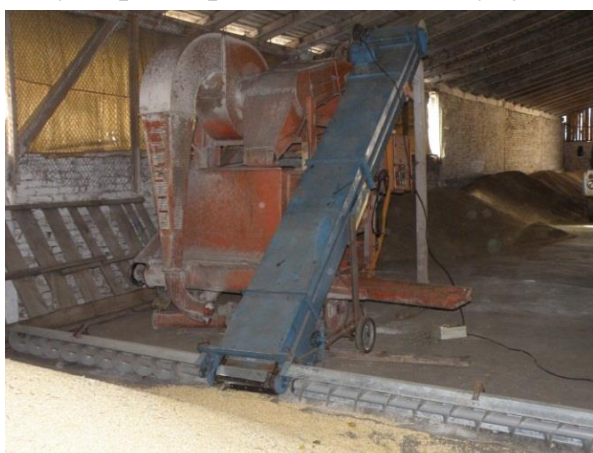
8. Крок між ковшами транспортера–сепаратора залежить від його продуктивності, кута нахилу решета та питомого навантаження.

9. Енергоємність сепарації вороху на прутковому решеті залежить від кута нахилу транспортеру, швидкості транспортування матеріалу та питомого навантаження і за раціональних значень $v=0,5$ м/с; $q_{num}=1,3-6,9$ кг/(м×с), $\alpha=20-30^\circ$, становить 0,12–0,64 кВт.

РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Практична реалізація результатів досліджень

З метою визначення ефективності запропонованого транспортера–сепаратора, з врахуванням проведених експериментальних досліджень розроблений та виготовлений дослідний зразок машини (рис.5.1), який пройшов господарчі випробування в складі ЗОМ ОВС–25 на зерновому току Кіровоградського інституту АПВ НААН України.



а



б



в

Рис. 5.1. Транспортер–сепаратор під час господарчих випробувань:
а – монтаж транспортера–сепаратора до очисника ОВС–25; б – агрегат перед роботою; в – живильно–завантажуючий транспортер в роботі

Результати теоретичних та експериментальних досліджень реалізовано при розробці нової зерноочисної машини загального призначення МЗП–10, створеної на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Загальний вигляд зерноочисної машини МЗП–10

5.2. Методика розрахунку параметрів транспортера–сепаратора

Порядок розрахунку

1. Ширина решета, м

$$B = \frac{Q}{q_B} = \frac{Q}{S \cdot q_F}, \quad (5.1)$$

де Q – продуктивність сепаратора, кг/с; q_F – питома продуктивність одиниці площі решета, $q_F=2,4-11,5$ кг/(м²×с); q_B – питома продуктивність одиниці ширини решета, $q_B=1,39-7$ кг/(м×с); S – довжина сепаруючої поверхні решета, м.

2. Вибір діаметру перетинки решета

Діаметр поздовжньої перетинки колосового решета обирають із рекомендованих значень $d=0,5-2$ мм.

3. Кількість робочих каналів решета, шт..

$$z' = \frac{B' + d}{\Delta + d}, \quad (5.2)$$

де Δ – потрібна ширина робочого каналу, $\Delta=0,004$ м.

3. Фактична ширина решета, м

$$b = \Delta \cdot z + d \cdot (z - 1). \quad (5.3)$$

4. Довжина решета, м

$$S = \frac{Q}{b \cdot q_F}. \quad (5.4)$$

Довжина решета в залежності від кута нахилу та питомого навантаження повинна становити 0,4–0,6 м.

5. Крок ковшів, м

$$k = \frac{L^2 \cdot g \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) - \left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^2 (L - l_3)}{\left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^2} + \frac{\sqrt{\left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^4 L^2 + L^2 \cdot g^2 (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)^2}}{\left(\frac{Q}{3,6 \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \gamma} \right)^2}, \quad (5.5)$$

де L – довжина розгінного майданчика, $L=0,1-0,2$ м; g – прискорення вільного падіння, $g=9,81$ м/с²; α – кут нахилу решета; f – коефіцієнт тертя зернових часток по похилій шорсткій поверхні; a – середня ширина зернини, м; n – кількість шарів розташування часток між ковшами; γ – об'ємна маса зернового вороху, кг/м³.

6. Швидкість руху транспортера

Швидкість руху транспортера обирають в межах $v=0,5-0,7$ м/с.

7. Об'єм ковша [78], м³

$$V_\kappa = \frac{Q \cdot k}{3,6 \cdot v_0 \cdot \gamma \cdot \psi}, \quad (5.6)$$

де ψ – коефіцієнт заповнення ковша.

8. Опір робочої гілки транспортера при завантаженні [78], Н

$$W_1 = \frac{Q \cdot v_0}{3,6 \cdot g}. \quad (5.7)$$

9. Опір переміщенню тягового органу [78], Н

$$W_2 = \sum \left(\frac{Q}{3,6 \cdot v_0} + k' \cdot Q \right) \cdot L_{mp} \cdot \varpi \cdot \cos \alpha + \frac{Q \cdot L_{mp}}{3,6 \cdot v_0} \sin \alpha, \quad (5.8)$$

де L_{mp} – довжина транспортера, м; k' – коефіцієнт, який враховує тип тягового органу та вид ковшів; ϖ – коефіцієнт опору переміщення.

10. Зусилля на привід тягового органу [78], Н

$$P_0 = (W_1 + W_2) \cdot c_1 \cdot c_2, \quad (5.9)$$

де c_1 – коефіцієнт, що враховує опір при обертанні барабану чи зірочки; c_2 – коефіцієнт, що враховує жорсткість тягового органу при перегибах.

11. Потужність, необхідна для приводу транспортера [78], кВт

$$N_n = \frac{v_0 \cdot P_0 \cdot c_0}{102}, \quad (5.10)$$

де c_0 – коефіцієнт, що враховує опір жорсткості тягового органу та опір обертанню привідного валу транспортера.

5.3. Економічна ефективність від впровадження результатів досліджень у виробництво

Для визначення економічної ефективності за базову модель взято серійну зерноочисну машину ОВС–25, обладнану скребковим завантажувачем. В новій машині якості живильника використовується ковшовий транспортер–сепаратор продуктивністю 25 т/год. Розрахунок економічної ефективності від впровадження у виробництво проводився по загальноприйнятій методиці.

Розрахунки показують, що очікуваний річний економічний ефект від впровадження ковшового транспортера–сепаратора в складі ОВС–25 замість існуючого скребкового складе понад 9000 грн/рік.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Узагальнюючи результати проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу проведених досліджень способів очищення зернового матеріалу та конструкцій зерноочисних машин загального призначення встановлено, що існуючі послідовності виконання технологічних операцій у більшості сучасних повітряно-решітних ЗОМ нераціональні, внаслідок чого стримується реалізація їх потенційних технологічних можливостей, підвищуються енергетичні та матеріальні витрати. У дисертації наведено теоретичне узагальнення та запропоноване нове вирішення наукової задачі щодо підвищення технологічної ефективності процесу очищення зерна на нерухомому решітці транспортера-сепаратора, що відображено в математичному описі впливу верхніх шарів на характер руху частки нижнього шару та руху прохідної частки по поверхні калібруючої перетинки. Отримані теоретичні та експериментальні закономірності процесу розділення зернового вороху дозволили обґрунтувати раціональні конструктивні параметри запропонованого транспортера-сепаратора.

2. Визначено, що при переміщенні сипких зернових матеріалів збільшення кількості його шарів сприяє підвищенню швидкості часток нижнього шару. Так, на відстані 1 м від точки сходу часток з ковша транспортера при куті нахилу 20° збільшення кількості шарів, що знаходяться над частками нижнього шару, від 0 до 4 підвищує швидкість від 0,5 до 6,2 м/с, а при куті 30° , за тієї ж кількості шарів, їх швидкість зростає від 0,7 до 7,3 м/с.

3. Встановлено, що на довжину сходу прохідної частки з поверхні поздовжньої перетинки пруткового решета суттєво впливає діаметр останньої. Так, при збільшенні діаметра перетинки з 1 мм до 5 мм при куті нахилу решета 30° та за раціональної початкової швидкості 0,5 м/с довжина ділянки сходу частки зростає з 0,07 м до 0,17 м.

4. Робоча довжина пруткових колосових решет залежить від кута їх нахилу, величини питомого навантаження та початкової швидкості руху оброблюваного матеріалу, збільшення яких веде до збільшення потрібної робочої довжини решета. Робоча довжина пруткового колосового решета з діаметром поздовжніх перетинок 1 мм та кутом нахилу $20...30^\circ$ на питомих

навантаженнях у межах 1,3–6,9 кг/(м×с) і початковою швидкістю руху зерна 0,5 м/с складає 0,4...0,5 м.

5. Величина кроку між ковшами транспортера-сепаратора залежить від його продуктивності, кута нахилу решета та швидкості транспортера. Для питомої продуктивності транспортера-сепаратора в межах 1,3–6,9 кг/(м×с), при кутах його нахилу 20–30° і швидкості руху до 0,5 м/с раціональна величина кроку між ковшами становить 0,17–0,2 м.

6. Збільшення вмісту крупних домішок з 2 до 6% призводить до суттєвого зменшення якості решітної сепарації, особливо за умов великих навантажень. Регламентованої якості розділення зернового вороху пшениці можна досягти при забезпеченні питомої продуктивності до 6,9 кг/(м×с) у зазначеному діапазоні засміченості при вологості вороху 10–18%.

7. Потужність на привід транспортера-сепаратора залежить від кута його нахилу, швидкості та питомого навантаження і, за раціональних значень $v=0,5$ м/с; $q_{\text{ном}}=1,3–6,9$ кг/(с×м), $\alpha=20–30^\circ$, становить 0,12–0,64 кВт.

8. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво зерноочисної машини ОВС–25 із запропонованим робочим органом становить понад 9000 грн./рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авдеев Н.Е. Повышение эффективности зерноочистительно-сушильных комплексов и линий / А.В. Авдеев, М.Ф. Машковцев, В.Н. Полуэктов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – №9. – С. 53–54.
2. Авдеев Н.Е. Принципы построения модели идеального сепаратора / Н.Е. Авдеев // Доклады ВАСХНИЛ, 1978, №11. – С. 38–40.
3. А.с. 203350 СССР, МКИЗ А 01 D 41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / Л.А. Барсуков (СССР). – №1078897/30–15; заявл. 24.05.66; опубл. 28.11.67, Бюл. №20.
4. А.с. 232642 СССР, МКИЗ А 01 D 41/42. Зерноуборочный комбайн / А.Д. Логин, В.М. Медведчиков, В.П. Гаврилов, Ю.И. Прибытков (СССР). – №1172163/30–15; заявл. 10.08.67; опубл. 11.11.68, Бюл. № 1 за 1969.
5. А.с. 235451 СССР, МКИЗ А 01 D 41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / Р.К. Калимуллин (СССР). – №1222191/30–15; заявл. 28.02.68; опубл. 16.01.69, Бюл. № 5.
6. А.с. 240362 СССР, МКИЗ А 01 D 41/00. Зерноуборочный комбайн / В.П. Луговой, В.В. Гавриленко, А.Н. Любичский (СССР). – № 1170985/30–15; заявл. 03.08.67; опубл. 21.03.69, Бюл. № 12.
7. А.с. 971149 СССР, МКИЗ А 01 D 41/42. Наклонная камера / С.Г. Ломакин, Н.И. Кленин, Ю.А. Ярмашев, В.И. Кукушкин, М.И. Иванов, А.И. Гетьманов, В.Е. Бердышев (СССР). – №2748920/30–15; заявл. 09.04.79; опубл. 07.11.82, Бюл. №41.
8. А.с. №512804 СССР, МКИЗ В 07 В 1/30. Решето для разделения зерновой смеси / С.А. Алферов, Ю.И. Ермольев, П.П. Колышев, Е.Г. Шелякин (СССР). – №1901500/28–13; заявл. 04.04.73; опубл. 05.05.76, Бюл. №17.
9. А.с. №61751 СССР, МКИЗ В 07 В 01/30. Сито колосникового типа / В.М. Цединовский (СССР). – №494; заявл. 27.07.39.
10. Аналіз руху матеріальної частки по поверхні циліндричної перетинки пруткового решета / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Гончаров В.В., Мороз С.М. / Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 17. – Кіровоград: КНТУ, 2006. – С. 89–94.
11. Асадула Э. Обоснование параметров подсевных решет с профилированной рабочей поверхностью для решетных станков рисоочисных машин: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" / Э. Асадула. – Ростов–на–Дону, 1984. – 29 с.
12. Бабченко В.Д. Высокопроизводительные машины для очистки зерна / В.Д. Бабченко, А.М. Корн, А.С. Матвеев. – М.: ВНИИТЭИСХ, 1982. – 250 с.

13. Бакум М.В. Результаты порівняльних випробувань решітного сепаратора із змінним нахилом решіт на сортуванні насіння огірків / М.В. Бакум // Вісник ХНТУСГ. Механізація сільськогосподарського виробництва. – Х.: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 93. – С. 176–181.
14. Бакум М.В. До розробки прогнозування результатів сепарації насіннєвих сумішей на решетах / М.В. Бакум // Вісник ХНТУСГ. Механізація сільськогосподарського виробництва. – Х.: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 107, Т. 1. – С. 363–372.
15. Барсуков Л.А. Исследование возможности частичного обмолота хлебной массы наклонным транспортером зерноуборочного комбайна: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" / Л.А. Барсуков. – Омск, 1975. – 18 с.
16. Борисов М.И. Обмолот хлебной массы в наклонной камере комбайна / М.И. Борисов, А.А. Жуков, Р.В. Кунц // Тр. Саратовского СХИ. – Саратов, 1976. – Вып.68. – С. 98–103.
17. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. / Владимир Боровиков – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
18. Валиев Х.Х. К анализу рабочего процесса ворохоочистителя с цилиндрическими решетками / Х.Х. Валиев, Н.М. Митрофанов, Л.И. Ерошенко // Научн. труды НИИТИМЭСХ С–З. – Л., 1975. – Вып 18. – С. 100–104
19. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко. – К.: Изд-во Украинской академии сельскохозяйственных наук, 1960. – 283 с.
20. Васильковський М.І. Здатність часток основного матеріалу до самоорієнтації на плоских решетах / Васильковський М.І., Мороз С.М., Мороз М.М. // Сільськогосподарські машини. Зб. наук. ст., вип. 8. Ред.–вид. відділ ЛДТУ, 2001. – С. 38–43.
21. Вдосконалення технологічного процесу очищення зерна зерноочисними машинами загального призначення / М.І. Васильковський, О.М. Васильковський, С.М. Мороз [та ін.] // Вісник ЛДАУ.: Агроінженерні дослідження. – 1999, №3. – С. 102–107.
22. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г.В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 199 с.
23. Вольф Т.Т. Исследование технологического процесса работы двухбарабанного бильного молотильного аппарата с первым барабаном, вынесенным в наклонную камеру: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" / Т.Т. Вольф. – Новосибирск, 1974. – 24 с.
24. Гехтман А.А. Машина МПО–50 для предварительной очистки зерна / А.А. Гехтман, В.В. Антихин // Тракторы и сельхозмашины. – 1983. – №5. – С. 24–25.

25. Гладков Н.Г. Зерноочистительные машины. Конструкция, расчет, проектирование, эксплуатация. Изд. 2-е перераб. и доп. / Н.Г. Гладков. – М.: Машгиз, 1961. – 367 с.
26. Гончаров Е.С. О рациональной форме поверхности центробежно-вибрационных решет / Е.С. Гончаров //Механизация и электрификация соц. сельского хозяйства. –1962. –№5. –С. 53–55.
27. Гончаров. Е.С. Технические резервы интенсификации послеуборочной обработки зерна / Е.С. Гончаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – К: Урожай, 1980. – Вып. 47.
28. Гончаров Е.С. Универсальные виброцентробежные сепараторы / Е.С. Гончаров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1984. – №1. – С. 15–17.
29. Гортинский В.В. К вопросу о послыном движении продуктов измельчения зерна на сите отсева / В.В. Гортинский //“Сообщения и рефераты” ВНИИЗ. – М., 1959. – Вып. 8. – С.11–13.
30. Гортинский В.В. Теоретические основы послыного движения продуктов измельчения зерна на сите отсева / В.В. Гортинский // Тр. ВНИИЗ. – М., 1960. – Вып. 39. – С. 65–83.
31. Гортинский В.В. Сортирование продуктов измельчения зерна в отсевах / В.В. Гортинский // Тр. ВНИИЗ.– М., 1961. –Вып. 40. –С. 115–138.
32. Гортинский В.В. Послыное движение продуктов измельчения зерна при сепарации на плоских решетках / В.В. Гортинский // Тр. ВНИИЗ. – М., 1963. –Вып. 42. –С. 19–30.
33. Гортинский В.В. Сортирование сыпучих тел при их послыном движении по ситам / В.В. Гортинский //Тр. ВИМ. –М., 1964. –Т. 34.– С.51–64.
34. Гортинский В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. –М.: Колос, 1980. – 303 с.
35. Горячкин В.П. Теория просеивания зерна и вороха: / В.П. Горячкин // Собр. сочинений. Т.1. – М.: Колос, 1965. – С. 244–253.
36. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л.В. Гячев – М.: Машиностроение, 1968. – 184 с.
37. Дринча В.М. Направления производства конкурентоспособной техники для очистки зерна и семян / В.М. Дринча, С.С. Ямпилев // Техника и оборудование для села. –1999. –№3.
38. Дюк. В. Обработка данных на ПК в примерах / Дюк.В. – СПб.: Питер, 1997. – 240 с.
39. Ермольев Ю.И. Обоснование и исследование гофрированного решета для очистки зерна от крупных примесей: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.06.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" / Ю.И. Ермольев. – Ростов–на–Дону, 1972. – 28 с.

40. Ермольев Ю.И. Исследование очистки пшеницы решетом со сплошной щелью в желобках, образованных угловыми гофрами / Ю.И. Ермольев // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1973. – Вып. 69. – С. 93–98.
41. Ермольев Ю.И. Применение гофрированных решет для первичной очистки зерновых культур / Ю.И. Ермольев // Тракторы и сельхозмашины. – 1981. – №10. – С. 25–27.
42. Ермольев Ю.И. Применение гофрированных подсевных решет для очистки зерновых культур / Ю.И. Ермольев // Тракторы и сельхозмашины. – 1984. – №6. – С. 17–18.
43. Иванов Н.М. Характер движения зерна по калибрующему каналу / Н.М. Иванов // Интенсификация процессов послеуборочной обработки зерна: Сб. научн. тр. ВАСХНИЛ, С.О. – Новосибирск, 1985. – С. 58–66.
44. Иванов Н.М. Траектория движения зерна на струнном коническом решете / Н.М. Иванов // Повышение эффективности процессов послеуборочной обработки зерна и переработки кормов /НТБ ВАСХНИЛ, С.О. – Новосибирск, 1986. – Вып. 26. – С. 34–39.
45. Иванов Н.М. Ориентация зерновки на продольных перемышках конического решета / Н.М. Иванов //Индустриальные технологии и перспективные рабочие органы машин для послеуборочной обработки зерна: Сб. научн. тр. /ВАСХНИЛ, С.О. – Новосибирск, 1986. – С. 79–85.
46. Иванов Н.М. Сепарация зерна на конических решетках с профилированной поверхностью: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / Н.М. Иванов. – Новосибирск, 1988. – 19 с.
47. Иванов Н.М. Определение факторов, существенно влияющих на процесс сепарации струнными коническими решетками / Н.М. Иванов // Совершенствование технологии и технических средств послеуборочной обработки зерна: Сб. научн. тр./ВАСХНИЛ, С.О. – Новосибирск, 1990. – С. 54– 59.
48. Иванов Н.М. Сепарация зернового материала на струнном коническом решете / Н.М. Иванов //Очистка и сортирование семян сельскохозяйственных культур: Сб. науч. тр. /РАСХН С.О. – Новосибирск, 1991. – С. 70–74.
49. Инструкция по эксплуатации виброцентробежных сепараторов на основе блока Р8–БЦС. – Житомир, 1995. – 16 с.
50. Информационный проспект машин К–526А, К–527А фирмы “Petkus Wutha” (ФРГ), 1996. – 8с.
51. Информационный проспект зерноочистительного оборудования выпускаемого СМП "Торнадо". – Житомир, 2001. – 4 с.
52. Информационный проспект зерноочистительного оборудования выпускаемого АО "Карловский машиностроительный завод". – Карловка, 2001. –4с.

53. Информационный проспект зерноочистительного оборудования выпускаемого заводом имени Фрунзе. – Харьков, 2001. – 2с.
54. Информационный проспект зерноочистительного оборудования выпускаемого ОАО "Хорольский механический завод". Хорол, 2001. – 6 с.
55. Исследование эффективности сепарирования зерновой смеси на профилированных решетках: Отчет о НИР (заключит.) /ВНИИ с.-х. машиностроения (ВИСХОМ). – М., 1990. – 183 с.
56. К созданию нового поколения зерноочистительных машин общего назначения / Васильковський М.І., Васильковський А.М., Косинов М.М., Мороз С.М. // Вісник Харківського державного технічного університету сільськогосподарського господарства, вип. 22. – Харків: ХДТУСГ, 2003. – С. 28–32.
57. Киреев М.В. Результаты испытаний цилиндрических решетных сепараторов в производственных условиях / М.В. Киреев, Л.И. Ерошенко // Научн. труды ЛСХИ. – Т. 143. – Вып. 1. – Л., 1969. – С. 105–111.
58. Киреев М.В. Опыт исследования цилиндрического решета с наружной рабочей поверхностью для очистки свежееубранного зерна / М.В. Киреев // Актуальные вопросы послеуборочной обработки зерна: сб. науч. тр. – М.: ВИМ, 1973. – С. 56–78.
59. Киреев М.В. Результаты испытаний цилиндрических решетных сепараторов в производственных условиях / М.В. Киреев, Л.И. Ерошенко, Г.Е. Травина // Научн. труды ЛСХИ. – Т. 174, Вып. 1. – Л., 1973.– С. 69–72.
60. Климок А.И. Исследование работы струнного решета на первичной обработке пшеницы/ А.И. Климок //Тр. ВНИИЗ. Материалы IV научн. конф. – М., 1970. – С. 52–67.
61. Климок А.И. Анализ работы струнного решета на первичной обработке пшеницы / А.И. Климок // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1971. – Вып. 52. – С. 142–147.
62. Климок А.И. Обоснование оптимального профиля рабочей поверхности решета / А.И. Климок // Тр. ЧИМЭСХ. –Челябинск, 1973. –Вып. 62.– С. 82–89.
63. Климок А.И. Выбор размерного признака разделения семян на фракции / А.И. Климок, Н.Ф. Конченко // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1973. – Вып. 62. – С. 286–289.
64. Климок А.И. Способ сепарации трудноразделимых зерновых смесей / А.И. Климок, М.М. Пучков //Научн.–техн. бюллетень СибНИИМЭСХ. –Новосибирск, 1977. –Вып. 1. – С. 23–28.
65. Климок А.И. Исследование процесса сепарации на решетках с профилированной рабочей поверхностью: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / А.И. Климок. – Новосибирск, 1981. – 24 с.
66. Климок А.И. Взаимодействие проходových частиц с продольными перемычками прямоугольных отверстий решета / А.И. Климок //

Совершенствование технологии и организации уборки и послеуборочной обработки зерна: Сб. научн. тр. ВАСХНИЛ, С.О. – Новосибирск, 1983. – С. 55–70.

67. Климок А.И. Экспериментальные исследования процесса движения частицы на решетке / А.И. Климок, Н.М. Иванов // Совершенствование технологии и организации уборки и послеуборочной обработки зерна: Сб. научн. тр. ВАСХНИЛ, С.О. – Новосибирск, 1983. – С. 71–78.

68. Ковалев Ю.П. Элеваторы Канады / Ю.П. Ковалев, Л.И. Кочетков – М.: Колос, 1973. – 217 с.

69. Кожуховский И.Е. Исследование работы плоских решет при больших нагрузках / И.Е. Кожуховский // Тр. ВИМ. – М., 1960. – Т.27. – С. 132–171.

70. Кожуховский И.Е. Исследование работы плоских решет / И.Е. Кожуховский // Тр. ВИМ. – М., 1960. – Т.28. – С. 5–40.

71. Кожуховский И.Е. Расчет и проектирование зерноочистительных машин / И.Е. Кожуховский // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1973. – Вып. 652. – С. 138–145.

72. Кожуховский И.Е. Механизация очистки и сушки зерна / И.Е. Кожуховский, Г.Т. Павловский. – М.: Колос, 1978. – 438 с.

73. Комаристов В.Ю. Довідник з механізації післязбиральної обробки зерна / В.Ю. Комаристов, М.М. Петренко. – К.: Урожай, 1990. – 184 с.

74. Конченко Н.Ф. Повышение ориентирующей способности струнного решета / Н.Ф. Конченко, А.И. Климок // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1972. – Вып. 69. – С. 99–107.

75. Конченко Н.Ф. Исследование процесса сепарации зерна на решетках с активными рабочими элементами: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / Н.Ф. Конченко. – ЧИМЭСХ, 1973. – 24 с.

76. Конченко Н.Ф. Обоснование рабочих параметров вибрационного струнного решета с активными элементами / Н.Ф. Конченко // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1973. – Вып. 69. – С. 108–111.

77. Конченко Н.Ф. Исследование процесса сепарации зерна на решетках с активными рабочими элементами / Н.Ф. Конченко, А.И. Климок, М.А. Тулькибаев // Тр. ВИМ. – М., 1974. – Т.65, ч. II. – С.75–83.

78. Корнеев Г.В. Транспортеры и элеваторы сельскохозяйственного назначения / Г.В. Корнеев. – М. – К.: Машгиз, 1961. – 231 с.

79. Котляр Л.И. Конструкция и эксплуатация сит просеивающих машин / Л.И. Котляр. – М.: Колос, 1963. – 132 с.

80. Котов Б.І. Перспективи розвитку конструкцій зернонасінеочисної техніки / Б.І. Котов, М.І. Волошин // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград, 2001. – Вип. 31. – С. 110–111.

81. Котов Б.І. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів / Б.І. Котов, С.П. Степаненко,

- М.Г. Пастушенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград, 2003. – Вип. 33. – С. 53–59.
82. Котов Б.І. Інтенсифікація вібропневматичного розділення зернових матеріалів на решетах / Б.І. Котов, С.П. Степаненко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград, 2005. – Вип. 35. – С. 209–214.
83. Кубышев В.А. Определение нагрузки на машины для послеуборочной обработки зерна / В.А. Кубышев // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1967. – Вып. 26. – С. 35–41.
84. Кубышев В.А. О возможности ориентации эллипсоидных частиц вдоль прямоугольного отверстия сепарирующей поверхности / В.А. Кубышев, М.А. Тулькибаев, Е.С. Коренченко // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1968. – Вып. 31. – С. 264–271.
85. Кубышев В.А. Технологические основы интенсификации процесса сепарации зерна / В.А. Кубышев // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1969. – Вып. 36. – С. 102–128.
86. Кубышев В.А. Пути повышения производительности и качества работы решет с продолговатыми отверстиями / В.А. Кубышев, М.А. Тулькибаев, А.И. Климок, [и др.] // Сб. науч. тр. Челябинской опытной станции. – Челябинск, 1973. – Вып. 4. – С. 158–172.
87. Кубышев В.А. Пути интенсификации процессов послеуборочной обработки зерна / В.А. Кубышев, М.А. Тулькибаев, А.И. Климок, [и др.] // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1974. – Вып. 97. – С. 6–12.
88. Кубышев В.А. Пути интенсификации процессов послеуборочной обработки зерна / В.А. Кубышев, М.А. Тулькибаев, А.И. Климок, [и др.] // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1974. – Вып. 97. – С. 53–62.
89. Кубышев В.А. Элементы теории центробежных струнных сепараторов / В.А. Кубышев, Н.Е. Авдеев, В.Д. Олейников // Доклады ВАСХНИЛ, 1981. – №9. – С. 38–40.
90. Кулагин М.С. Механизация послеуборочной обработки и хранения зерна и семян / М.С. Кулагин, В.М. Соловьев, В.С. Холтов. – М.: Колос, 1979. – 283 с.
91. Лапшин И.П. Исследование процесса сепарации зерна на решетах с повышенной ориентирующей способностью: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / И.П. Лапшин. – Челябинск, 1996. – 17 с.
92. Ленивцев Н.И. О повышении живого сечения пробивных решет в целях увеличения производительности / Н.И. Ленивцев // Сб. научн. тр. ЛИМСХ. – Л, 1953. – Т. 10. – С. 36–41.

93. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытания / М.Н. Летошнев. – М-Л.: Госиздат. с.х. л-ры., 1955. – 764 с.
94. Лопан А.А. Обоснование технологии очистки и сортирования семян пшеницы в системах промышленного семеноводства: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / А.А. Лопан. – Челябинск, 1981. – 23 с.
95. Мачихина Л.И. Очистка риса зерна / Л.И. Мачихина. – М.: Колос, 1981. – 367 с.
96. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов / [З.Л. Тиц, В.И. Анискин, Г.А. Баскакян, Н.Г. Гладков и др.]; под ред. З.Л. Тица – М.: Машиностроение, 1967. – 446 с.
97. Мельников С.В. Планирование экспериментов в исследованиях сельскохозяйственных процессов / в С.В. Мельнико, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин. – К.: Колос, 1972. – 200 с.
98. Механизация подготовки и хранения семян / [Под ред. Н.Н. Ульриха]. – М.: изд-во с.-х. литературы, журналов и плакатов, 1962. – 472 с.
99. Минаев В.Н. Пути повышения производительности зерноочистительных машин / В.Н. Минаев, Х. Регге //Тракторы и сельхозмашины. – 1984. – №6. – С. 16–17.
100. Минаев В.Н. Влияние параметров плоских профилированных решет на отделение мелких примесей / В.Н. Минаев, Х. Регге // Техника в сельском хозяйстве. – 1990. – №6. – С. 54–55.
101. Михайлов Е.В. Методы и средства интенсификации процесса предварительной очистки зерна повышенной влажности: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 06.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / Е.В. Михайлов. – Л.– Пушкино, 1984. – 34 с.
102. Мороз С.М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета / С.М. Мороз, М.І. Васильковський, О.М. Васильковський // Техніка в с.-г. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту. – Вип. 14. – Кіровоград: КДТУ, 2004. С. 72–78.
103. Мороз С.М. Аналіз технологічності роботи живильних та завантажувальних транспортерів ЗОМ загального призначення / С.М. Мороз, О.М. Васильковський, М.І. Васильковський, [та ін.] // Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. – Вип. 18. – Луцьк: ред. вид. відділ ЛНТУ, 2009. – С. 311-317.
104. Морозов І.В. Сільськогосподарські машини. Практикум з теорії і розрахунків процесів та робочих органів сільськогосподарських машин / І.В. Морозов, М.В. Бакум, В.І. Пастухов. – Х.: ХНТУСГ, 2011. – 271 с.
105. Павловский Г.Т. Основные вопросы технологии очистки семян зерновых культур: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 538 / Г.Т. Павловский. – М., 1969. – 64 с.

106. Павловский Г.Т. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна / Г.Т. Павловский, С.Д. Птицын. – М.: Высшая школа, 1972. – 256 с.
107. Пат. 48337 А Україна, 7 В02В13/04, В07В1/00, А01Д41/12. Решітний сепаратор / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М.; заявник і патентотримач Кіровоградський державний технічний університет. – №99126856; заявл. 16.12.99; опубл. 15.04.04, Бюл. № 4.
108. Пат. 49137 А Україна, МПК В07Д1/12, А01Д57/20. Транспортер-сепаратор / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М.; заявник і патентотримач Кіровоградський державний технічний університет – №2000042309; заявл. 24.04.00; опубл. 16.09.02, Бюл. № 9.
109. Пат. 57101 С2 Україна, МПК В07В13/04. Решето / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лузан П.Г., Мороз С.М.; заявник і патентотримач Кіровоградський державний технічний університет – №2000021149; заявл. 28.02.00; опубл. 16.06.03, Бюл. № 6.
110. Плис А.И. MathCAD Математический практикум для инженеров и экономистов: Учебное пособие / А.И. Плис. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 656 с.
111. Приспособление к зерноуборочному комбайну СК–5 для уборки кориандра: Отчет о НИР/ Всесоюзный НИИ эфиромасличных культур. – Симферополь, 1983. –108 с.
112. Система машин для комплексной механизации сельского, водного и лесного хозяйства на 1981–1990 г.г. –М.: ЦНИИТЭИ, 1982. –Ч. I. –348 с.
113. Совершенствование технологий и рабочих органов зерноочистительных машин / М. Васильковский, М. Косинов, С. Мороз [и др.] // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий наук.–техн. збірник. – Кіровоград: КДГУ. – 2000. – Вип. 29. – С. 36–39.
114. Сысоев Н.И. К теории просеваемости решета / Н.И. Сысоев //Тракторы и сельхозмашины. – 1962. – №10. – С. 19–21.
115. Таблица значений критерия Стьюдента (t-критерия). Статистика в аналитической химии. Режим доступа: <http://chemstat.com.ru/node/17>.
116. Тамразов А.М. Планирование и анализ регрессионных экспериментов в технологических исследованиях / А.М. Тамразов. – Киев: Наук. думка, 1987. – 176 с.
117. Таран А.И. Влияние направленности колебаний плоских решет на просеваемость / А.И. Таран // Тр. ВНИИЗ, – М.: 1963. – Вып. 12.
118. Тарасенко А.П. Снижение травмирования зерна при послеуборочной обработке / А.П. Тарасенко, М.Э. Гульстен //Техника в сельском хозяйстве. –1985. –№9. – С. 14–15.
119. Терентьев Ю.В. Условия перемещения семян по струнной сепарирующей поверхности / Ю.В. Терентьев // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1967. – Вып. 35. –С 121–125.

120. Терентьев Ю.В. Исследование технологии разделения семян по толщине: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / Ю.В. Терентьев. – Челябинск, 1968. – 25 с.
121. Терсков Г.Д. О влиянии основных факторов на пропускную способность решет с круглыми отверстиями / Г.Д. Терсков // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1958. – Вып. 6. – С. 85–126
122. Терсков Г.Д. Изучение пропускной способности зерновых смесей / Г.Д. Терсков // Материалы научно–технической конференции по вопросам сепарирования зерна. – М.: ВИСХОМ, 1958. – С.67–93.
123. Терсков Г.Д. Основные закономерности просевания семян на решетках с круглыми отверстиями / Г.Д. Терсков // Конструирование и производство сельскохозяйственных машин. – М.: Машгиз, 1959. – С. 151–167.
124. Терсков Г.Д. Расчет зерноуборочных машин / Г.Д. Терсков. – Москва – Свердловск: Машгиз, 1961. – 215 с.
125. Терсков Г.Д. Основные закономерности процесса прохождения семян в отверстия решет и ячеек триеров / Г.Д. Терсков // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1969. – Вып. 36. – С. 73–101.
126. Тищенко Л.М. Интенсификация сепарирования зерна: [монография] / Л.Н. Тищенко. – Х.: Основа, 2004. – 224 с.
127. Тищенко Л.М. Моделирование процессов зерновых сепараторов: [монография] / [Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, М.В. Пивень и др.]. – Х.: Міськдрук, 2010. – 359 с.
128. Тулькибаев М.А. К вопросу выбора оптимальной формы перемычек отверстий решета / М.А. Тулькибаев // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1971. – Вып. 52. – С. 67–77.
129. Тулькибаев М.А. Технологические основы оптимизации процесса работы зерноочистительных машин: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 / М.А. Тулькибаев. – Челябинск, 1971. – 21 с.
130. Тулькибаев М.А. Зависимость интенсивности просеивания частиц сыпучего материала от скорости их перемещения и геометрических параметров / М.А. Тулькибаев // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1976. – С. 79–84.
131. Ужнєев И.И. Результаты исследования работы ворохоочистителя с цилиндрическими решетками на очистке семян многолетних трав / И.И. Ужнєев // Научн. тр. НИИМЭСХ С–3. – Л., 1979, – С. 83–85.
132. Халанский В.М. Обоснование параметров и режима работы пневмоцентробежного сепаратора при обработке вороха семенников трав / В.М. Халанский, И.В. Горбачев, А.В. Сиротин, [и др.] // Повышение производительности и качества работы зерноуборочных и зерноочистных машин. – ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1984. – С.49–55.
133. Цециновский В.М. Элементы теории калибрования кукурузы при помощи профилированных решет / В.М. Цециновский // Тр. ВНИИЗ. – М., 1955. – Вып. 5. – С. 42–57.

134. Цециновский В.М. О выборе оптимальных кинематических параметров сит с возвратно–поступательным движением / В.М. Цециновский // Тр. ВНИИЗ. – М., 1956. – Вып. 4. – С. 17–19.
135. Цециновский В.М. Калибрование семян кукурузы / В.М. Цециновский. – М.: Хлебоиздат, 1958. – 92 с.
136. Цециновский В.М. Выбор оптимальных параметров профилированных сит для калибровки семян кукурузы / В.М. Цециновский // Сообщения и рефераты ВНИИЗ. – М., 1959. – Вып. 4. – С. 18–21.
137. Цециновский В.М. Выбор оптимальных параметров желобчатых сит с продольными отверстиями / В.М. Цециновский // Тр. ВНИИЗ. – М., 1960. – Вып. 6. – С. 8–11.
138. Цециновский В.М. Исследование процесса калибрования семян (основы теории и практики)/В.М. Цециновский.– М.: МТИМП, 1965. – 213 с.
139. Цециновский В.М. Влияние геометрии “трудных” зерен и отверстий сита на условия сортирования / В.М. Цециновский, И.Г. Шапиро // Тр. ВНИИЗ. – М., 1970. – Вып. 68. – С. 45–54.
140. Цециновский В.М. Технологическое оборудование зерноперерабатывающих предприятий / В.М. Цециновский, Г.Е. Птушина. – М.: Колос, 1976. – 368 с., с ил.
141. Шабанов М.П. Розробка та обґрунтування пристрою для сепарації очесаного вороху в похилій камері зернозбирального комбайна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механізація сільського господарства" / М.П. Шабанов. – Сімферополь, 1997. – 26 с.
142. Шелякин Е.Г. Исследование технологического процесса очистки зерна от крупных примесей на гофрированных решетках: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 "Механизация сельского хозяйства" / Е.Г. Шелякин. – Ростов–на–Дону, 1981. – 24 с.
143. Ягудин Г.М. Предварительная очистка влажного вороха семян трав / Г.М. Ягудин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986.– №1. – С. 12–14.
144. Ямпиров С.С. Сепараторы для предварительной очистки зерна / С.С. Ямпиров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. № 12. – С. 17–21.
145. Ямпиров С.С. Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян / С.С. Ямпиров. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. – 262 с.
146. Jeffrey T.Lufting&Victoria S.Jordan Design of Experiments in Quality Engineering. – McGraw-Hill UK Oxford. 1998. – 480 p.

Наукове видання

Сало Василь Михайлович
Мороз Сергій Миколайович
Васильковський Олексій Михайлович
Лещенко Сергій Миколайович
Петренко Дмитро Іванович

РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПНЕВМОРЕШІТНОЇ ЗЕРНООЧИСНОЇ МАШИНИ

Том 1

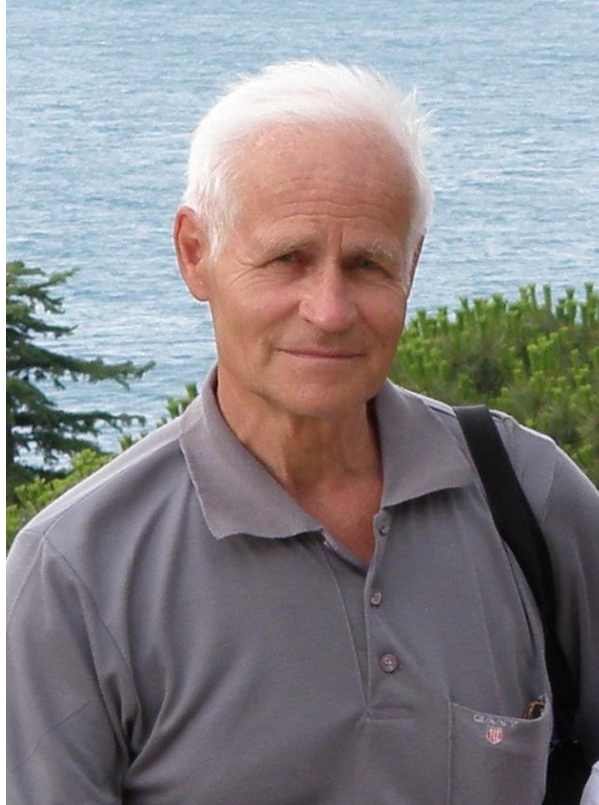
**Обґрунтування параметрів
транспортера-сепаратора**

МОНОГРАФІЯ

Редактор: Сало В.М.
Технічний редактор: Лисенко В.Ф.
Комп'ютерна верстка: Анісімов О.В.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 6.3
Облік. видан. арк. 3.5. Тираж 300. Зам. № 31

Видавець і виготовлювач СПД ФО Лисенко В.Ф.,
25029, м. Кіровоград, вул. Пацаєва, 14, к. 1, кв. 101.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи №3904 від 22.10.2010 р.



Васильковський Михайло Ігорович

З ПОВАГОЮ ДО ВЧИТЕЛЯ

Автори монографії висловлюють глибоку вдячність Вчителю, засновнику і ідеологу напряму зерноочищення в Кіровоградському національному технічному університеті, кандидату технічних наук, доценту кафедри сільськогосподарського машинобудування Васильковському Михайлу Ігоровичу